

文章编号: 1009-3850(2015)03-0042-09

山东省灵山岛负载构造和球-枕构造研究

张风霄, 周瑶琪, 王安东, 于珊珊

(中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 本文运用野外露头考察、沉积岩石学、地质统计等方法,对灵山岛的负载构造和球-枕构造进行研究。这些负载构造和球-枕构造侧向延伸好,在整个剖面上连续分布,具有多尺度、多形态、多组合等特点。形成负载构造和球-枕构造的前提条件是地层密度的倒置(上大下小),变形的根本驱动力是沉积物自身的重力。球-枕构造和负载构造的形成机制相同,只是变形程度和阶段不同。根据不对称负载构造受横向剪切力分析,证明早白垩世时该盆地存在古斜坡,并且SE高、NW低。综合考虑地震触发形成震积岩的标志特征和灵山岛的构造地质背景,认为本研究区的负载构造和球-枕构造系古地震触发形成。

关键词: 灵山岛; 早白垩世; 负载构造; 球-枕构造; 地震震级

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

负载构造(load structure)和球-枕构造(ball-pillow structure)是与重力相关的液化变形构造。Kuenen^[1]首次提出沉积岩粒序层中的构造为负载构造;Owen^[2]通过实验模拟了上覆中砂下陷到下伏细砂层的负载构造的地震震动成因。球-枕构造是一个描述性名词,在沉积学中具有悠久的历史^[3]。Kuenen^[4]实验模拟了地震震动作用下球-枕构造的形成,并证明其来源于负载构造。近年来许多国内学者对中国不同地区不同地质时代地层中的负载构造和球-枕构造进行了研究,并讨论了地震触发机制^[5-10]。杜远生^[11]认为负载和球枕构造是在准同生时期由地震震动形成的,代表已被充填了的沉积盆地处于活动的构造背景;乔秀夫^[12]举例讨论了不同时期的地层中地震成因的球-枕构造,认为其记录了Ms>5的古地震事件。

吕洪波^[13]首次发现了灵山岛的滑塌沉积层,探讨了其中的软沉积物变形构造的地震成因,此后,灵山岛成为地学同行研究的热点地区^[14-17,19-20]。在灵山岛早白垩世地层中识别出大量的软沉积物变形构造^[14,15],其中负载构造和球-枕构造是非常重

要的一类变形构造,对分析古构造活动的分布和强度有着重要作用。前人对灵山岛的负载构造和球-枕构造研究较少。本文将描述灵山岛典型的负载、球-枕构造的形态特征、分布规律,论述其形成机制和地质意义。

1 地质背景

灵山岛地理位置处于原胶南市东南的黄海海域,行政上属于青岛市黄岛区,其距最近的陆地大珠山5.3海里,距积米涯9海里,总面积7.66km²,海拔513.6m,是我国北方第一高岛。由于远离大陆,交通不便,过去有关灵山岛的地质考察文献较为少见。

灵山岛在大地构造位置上(图1)处于苏鲁造山带中^[21-22],周边主要断层为西侧的郯庐断裂带和南北两侧的五莲烟台断裂与千里岩断裂,这3条断裂与区域构造活动密切相关,诱发研究区软沉积物变形构造的古地震主要就是这3条断层活动产生的。

山东省第四地质矿产勘察院出版的山东区域地质^[23]显示灵山岛由下部莱阳群法家莹组(K₁f)沉

收稿日期: 2014-07-31; 改回日期: 2014-08-04

作者简介: 张风霄(1988-),女,硕士生,主要从事地质学方面研究。E-mail: zfxiao1988@163.com

积岩和上部青山群八亩地组(K_1b)火山岩组成。灵山岛沉积环境尚存在争议。吕洪波等^[13,19]认为下部发育的陆源碎屑岩为海相远源浊积岩,并指出这是华北板块、扬子板块在晚中生代尚未碰撞拼合的残余洋盆沉积。钟建华^[20]则认为灵山岛下部地层是一套陆内体制下的浅水三角洲沉积,与板缘、碰撞造山无关。张海春^[17]认为灵山岛下部发育的是晚中生代海相浊积岩,并建议将其命名为灵山岛组(K_1lsd)。

野外踏勘并结合前人研究将灵山岛沉积地层大致划分为6个单元,自下而上依次为:(1)巨厚浊积岩层;(2)滨浅海沉积地层;(3)浊积岩层;(4)白色火山流纹质熔岩层;(5)陆相碎屑岩层;(6)巨厚安山质火山碎屑岩层,并构成灵山岛出露地层的上部主体^[17]。其中浊积岩层是经常发现软沉积物变形的地层^[18]。

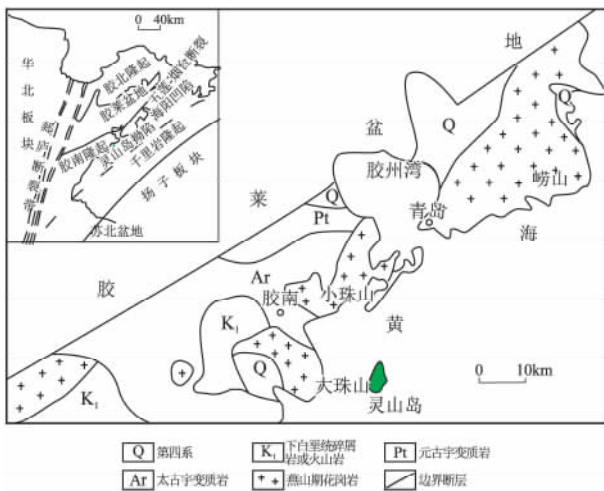


图1 灵山岛区域概况简图^[13]

Fig. 1 Location of the Lingshan Island, Shandong (after Lu Hongbo et al., 2011)

2 灵山岛的负载构造和球-枕构造

负载构造是在液化作用和重力作用下,上覆密度相对较大的沉积单元(如粗砂)下沉陷入下伏密度相对较小(如粉砂层)沉积单元之中的一种构造。在地震震动摇晃的剪切力和重力作用下,负载构造呈球状或枕状脱离母岩陷落到下伏地层中形成球-枕构造。一般球-枕构造与其它未与母岩分离的负载构造相邻^[12],球枕构造和负载构造形成机制相同,只是形成的变形程度和阶段不同。

2.1 负载构造分类描述

负载构造在灵山岛的各个野外剖面中都有发

现,具有多种尺度、多种形态、多种组合的特点。

(1)按尺度分为:宽度最小的为小于1cm的小型负载构造,大的达到米级,厚度1~30cm的大型负载构造;

(2)按形态分为:两侧不对称形、对称的下“凹”形;

(3)按岩石组合分为:上砂下泥、上砾下砂、上粗砂下细砂等组合;

2.1.1 小型不对称负载构造

灯塔剖面有一层厚约1cm左右,宽1~3cm的小型负载构造(图2a),土黄色砂岩覆盖在黑色泥岩之上。该负载构造规模小,侧向分布稳定,每一个负载构造的大小基本相同。负载层顶面平直,上下层位都是未变形层,与负载构造层平行接触。在负载构造形成过程中,上覆岩层受到沿斜坡存在横向剪切力的分量的作用,在这个力作用下形成了下部的NW侧角度大,SE侧角度小的不对称负载构造。而下伏地层被下陷的地层挤压,在两个负载构造中间向上侵入,形成伴生的火焰构造,其尖端一致指向NW。

灵山岛灯塔剖面还可以识别出多层厘米级的不对称负载构造(图2d、2e),其倾向相同,火焰构造尖端指向一致。Morreti^[18]讨论了浊积岩中的不对称枕状构造,认为区域性斜坡产生横向剪切力造成不对称负载体和火焰构造向某一方向倾斜^[2],据此分析认为其倾倒的方向(挤入构造的指向)为古斜坡下游方向。因此利用不对称负载构造的倾向和火焰构造的指向,证明存在区域古斜坡,并且SE高、NW低,这也印证了吕洪波^[13]的古斜坡SE高、NW低的结论。

2.1.2 大型多层负载构造

千层崖剖面下部观察到3组厚负载构造层(图3a),上下两层为砂岩与薄纹层状泥页岩组合,中间一层是砂岩与块状泥岩组合。上覆砂岩下陷至泥页岩时,中间下凹变厚,两侧拉伸减薄,通过很薄的砂岩层连接。多处负载构造之间完全拉断分离,形成独立的负载构造(图3b)。下伏泥页岩形成宽缓的向形和背形。中间一层砂岩厚度远大于其下伏泥岩层,形成的负载构造宽缓且紧密排列。受砂岩层下陷挤压,泥岩不规则向上侵位,个别位置泥岩向上挤入并穿透砂岩层。

这3组岩层中的负载构造侧向展布非常稳定,整个剖面都可见,同一层之间的规模和形状基本一致。负载构造的顶面平直,两层之间接触面基本平

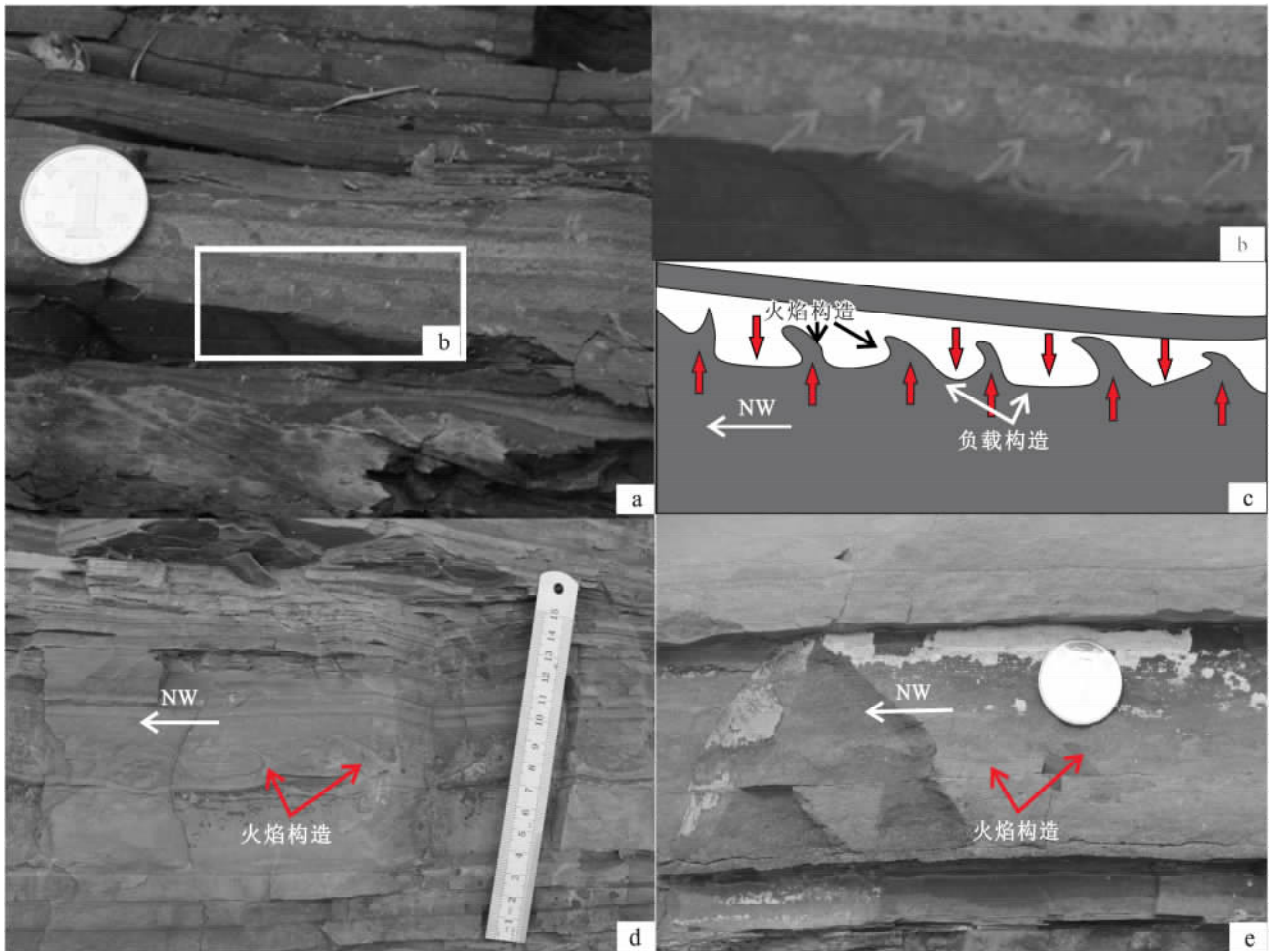


图2 厘米级不对称负载构造(火焰构造尖端指向NW)

a. 薄层负载构造,上下层均为未变形层;b. 负载构造局部放大;c. 负载构造素描图,红色箭头指示沉积物活动方向;d. 薄层负载构造;e. 薄层负载构造

Fig. 2 The cm-scale asymmetrical load structures(The flame structures direct to NW)

行,与其接触的泥页岩底部纹层平行,无变形现象,说明每一层的负载构造变形都是独立的,每一层对应一期地震事件。

灯塔剖面下部有一连续四层厚负载构造层(图3c),变形地层的岩性与上下未变形层的岩性相近,四层变形地层的厚度变化大,变形层与层之间的接触面都是弯曲变形的,因此推断整个厚层变形是由一次强地震引起的。与 Moretti^[24] 报道的内乌肯盆地(北巴塔哥尼亚,阿根廷)的负载构造基本相同。Moretti 详细阐述了负载构造的形成机理,逐个排除了所有可能的触发机制,认为最合理的解释为地震诱发。

2.2 球-枕构造分类描述

多个层位都大量发育球-枕构造,同其它地震软变形一样,球-枕构造不会单个孤立出现,每层顺走向追踪都会发现有规律出现的多个球-枕构造。以

扁平椭球体为主,长轴顺层展布,规模为 5~30cm,长轴/短轴为 2~3 之间。本区球-枕构造多为粗砂岩沉入液化细砂粉砂岩,上层母岩已完全消失,差异风化使其易于识别。

2.2.1 千层崖剖面球-枕构造

如图 4 所示的是较为典型的球-枕构造,其分布在不同深度、大小不一、形状不同。母岩层和球-枕构造都是灰白色砂岩,而弱岩层是浅灰色粉砂岩,观察到母岩层已经断断续续,图 4b 中左侧部分母岩层已经消失,仅剩图片中右侧部分。如图 4c 所示,球-枕构造随深度下陷,由近圆状变成了扁平状。与 Morreti^[25] 发现的球-枕构造长轴与短轴比与沉降深度有关,下降越深,球-枕构造越扁平的理论相符合。球-枕构造层上部变形层中的砂岩和泥岩不是发生垂向侵位、扰动,而是比较少见的形成侧向的混插、互相侵位,称之为侧向液化。其与下层球-枕构造的

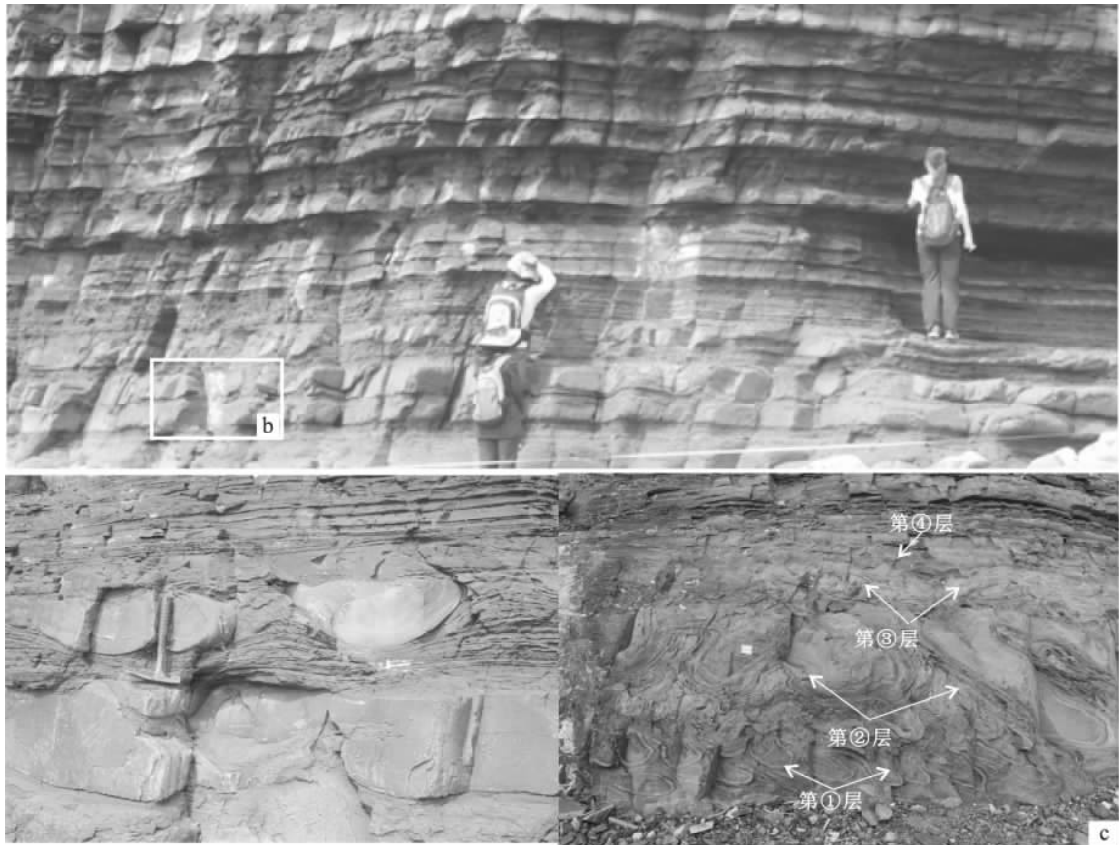


图3 厚层负载构造

a. 灵山岛千层崖剖面下部厚层负载构造,侧向分布稳定; b. 负载构造上覆地层平直未变形,地质锤处负载构造与左边负载构造通过薄的砂岩层连接,与右边负载构造则完全断开; c. 四层负载构造,每一层之间接触面都是变形接触

Fig. 3 Thick-bedded load structures in the Qiancengya section

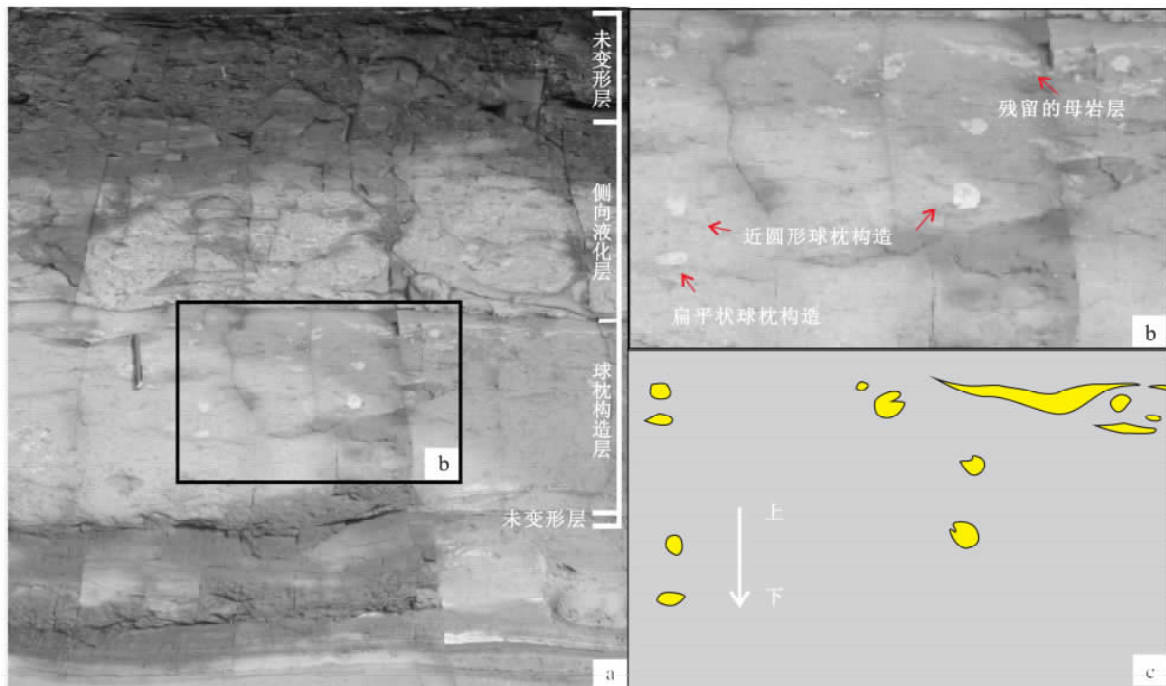


图4 千层崖剖面球-枕构造

a. 千层崖剖面下部地层,上下为未变形层,中间第一层为球-枕构造层,第二层为侧向液化层; b. 放大球-枕构造,浑圆状; c. 球-枕构造素描图

Fig. 4 The ball-and-pillow structures in the Qiancengya section

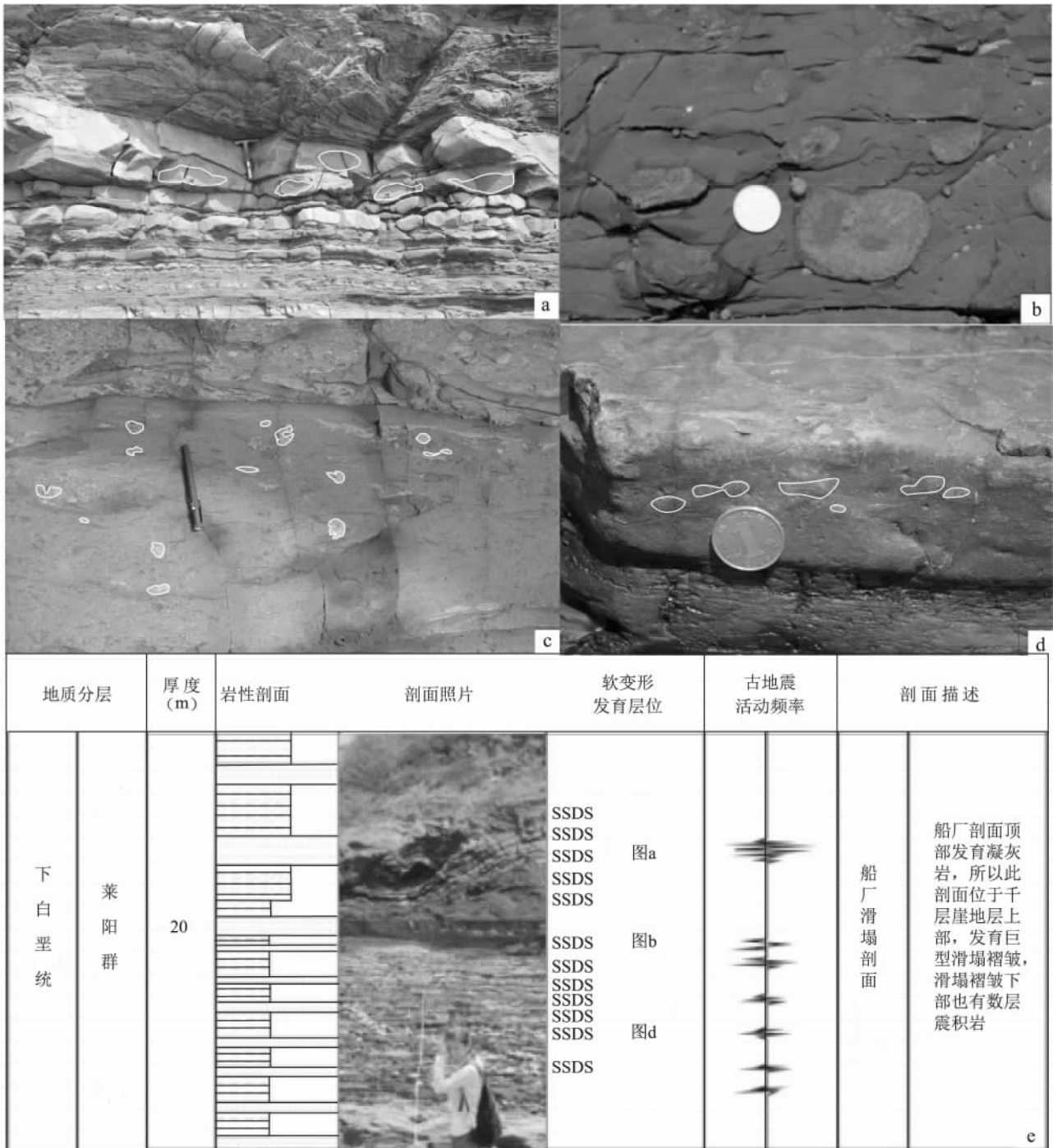


图5 不同大小的球-枕构造及分布层位

a. 船厂剖面顺层扁平的5个球-枕构造; b. 船厂剖面球-枕构造, 泥岩地层散布着大小不一的5个砂岩球; c. 千层崖剖面14个球-枕构造, 其分布在不同深度、大小不一、形状不同; d. 船厂剖面6个球-枕构造, 泥质粉砂岩的基质和内部不均匀散布着的砂质团块, 以长轴顺层的扁平椭圆形和近圆形为主; e. 船厂剖面软沉积物变形构造发育层位及地层柱状示意图^[15]

Fig. 5 Distribution of the ball-and-pillow structures with varying sizes (modified from Wang Andong et al. , 2013)

接触面略有弯曲,但是界线明显,没有发生相互侵入。在这两层变形层上下各有未变形层,呈平行接触。

2.2.2 船厂剖面扁平状球-枕构造

船厂剖面的球-枕构造(图5a)位于大约50cm

厚的黄色砂岩中,形状以扁平椭球体为主,沿约30cm的长轴顺层展布,短轴10cm左右,长短轴比约3:1。地震发生时,上覆土黄色砂岩和下伏泥岩均发生液化现象,重力驱动和地震剪切摇晃使上覆负载构造脱离母岩向下伏液化的黑色泥岩下陷。在下

沉过程中,球-枕构造受到强液化泥岩的浮力的阻挠,形成扁平状球-枕构造。

在同一个盆地具有同样的岩石学特征的软沉积物构造,较大的构造可能表明形成时受到的地震震级相对较高^[35]。统计图 5 中的 4 幅照片中砂岩组成的球-枕构造与下伏强液化泥岩层的接触范围,即球-枕构造的大小,用球-枕构造的周长和面积表示。假设其周长的平均值分别为 La, Lb, Lc, Ld, 面积平均值分别为 Sa, Sb, Sc, Sd。分别对应图 5 中 a, b, c, d 4 幅图中球-枕构造周长和面积的平均值。其中, La = 277.82cm, Lb = 29.2cm, Lc = 21.48cm, Ld = 10.67cm(表 1), 即周长的相对大小为 La > Lb > Lc > Ld, 面积的相对大小也是 Sa > Sb > Sc > Sd, 据此可以认为形成上述球-枕构造的震级的相对大小为图 5a > 图 5b > 图 5c > 图 5d, 即大的球-枕构造代表的震级要大于小的球-枕构造代表的震级。据图 e 可知,图 d、b、a 在船厂剖面上由下到上依次出现,说明船厂剖面由下而上经历的地震震级是逐渐增大的。

3 负载构造和球-枕构造形成机制

软沉积变形构造的形成过程中受驱动力的大小、变形机制、触发条件等多种因素控制^[26]。触发机制作为引起软沉积变形的初始作用是非常重要的;随之,沉积物的性质决定变形机理的类型,驱动力和初始的沉积条件决定变形形态。负载构造和球-枕构造作为软沉积物变形构造也需要满足上述 3 个条件。

3.1 驱动力

驱动力的大小必须满足能够改变已经形成的沉积特征,主要包括:不稳定的反密度梯度、自身重力、剪切力、不均匀的负载等。驱动力的识别主要是通过变形构造的几何学特征和体系的初始特征进行重建。负载构造常常受到多重作用力的影响,由不均匀的负载和不稳定的反密度梯度产生,有上覆密度大的沉积物的自身单一重力、重力与液化异常高压侵位、重力与剪切力水平分量等多种类型。因此,形成负载、球-枕构造需要有一个密度相对较大的砂岩层覆盖在密度相对较小的粉砂岩或泥岩之上,形成反密度梯度。

3.2 变形机制

正确识别软沉积变形构造的变形机制对于确定变形的触发因素非常重要。液化作用被认为是形成负载构造和球-枕构造的主要机理。研究发现与负载体相连的母岩和下伏赋存负载体的岩层一定都发生了液化作用,否则上覆粗粒层不可能下陷到下伏细粒层中。而下伏的液化层为负载构造与球-枕构造的赋存提供载体,负载体和球-枕的大小和形状与高度液化的细粒岩层的厚度有关。某些性质的负载力或者剪切力引起沉积物强度的减弱^[27],孔隙流体的排出受到阻碍或者抑制,使得孔隙水压力增加,最终发生液化。研究发现,砂岩可以液化的平均粒径在 0.02 ~ 1mm 之间^[28],而小于 0.11mm 粒径的细砂质更容易被液化^[29],泥岩很难被液化。灵山岛软沉积物的地层岩石类型主要是砂岩、粉砂岩与泥岩,都可以发生软沉积物变形,个

表 1 各个球枕构造的周长和面积的统计表

Table 1 Statistics of the perimeters and areas of individual ball-and-pillow structures

	序号	1	2	3	4	5		总和	平均值
图 7a	周长(cm)	353.8	200.1	229.1	261	345.1		1389.1	277.82
	面积(cm ²)	2029.17	2059.14	3321.12	2635.06	4281.86		14326.35	2865.27
图 7b	序号	1	2	3	4	5		总和	平均值
	周长(cm)	27.6	15.3	22.3	59.9	23.4		148.5	29.7
	面积(cm ²)	48.57	18.24	32.72	253.99	38.32		391.84	78.368
图 7c	序号	1	2	3	4	5	6	7	8
	周长(cm)	34.9	10.6	23	20.1	22.4	26	22.4	12.4
	面积(cm ²)	47.88	8.2	37.2	16.78	33.72	39.5	19.83	10.54
	序号	9	10	11	12	13	14	总和	平均值
	周长(cm)	40.2	24.8	33.7	17.7	17.1	12.4	171.8	21.475
	面积(cm ²)	48.69	30.78	55.83	21.95	8.12	7.35	213.65	26.71
图 7d	序号	1	2	3	4	5	6	总和	平均值
	周长(cm)	9.4	15.2	16	4.2	12.2	7	64	10.67
	面积(cm ²)	5.53	6.97	10.07	1.11	6.96	2.57	33.21	5.54

别的砾岩层也可以。

3.3 触发条件

许多的自然因素和作用可以作为触发机制,包括地震、海啸、波浪、洪水、快速沉积和地下水活动^[30-33]。对触发因素的确定不仅要识别出与地震相关的软沉积变形构造的标志,还要详尽研究区域构造背景^[10]。

综上所述,负载构造和球-枕构造的形态和侧向分布具以下特点:(1)同一层中的变形构造规模相当,大小差别不大;(2)侧向延伸好,整个剖面地层连续分布;(3)均表现出液化、流化的性质;(4)不对称变形构造倾向相同。这些分布特点符合地震触发形成震积岩的标志特征^[26],而且负载构造是判断地震触发形成变形构造的有利证据。Moretti和Sabato^[34]认为负载构造宽度大于1cm时地震成因概率最大。灵山岛在早白垩世时期构造活动频繁,具有多次发生古地震的条件,所以判断灵山岛地区的负载构造和球-枕构造由地震触发引起。

4 地质意义

(1)挤入构造与负载构造可以证明区域古斜坡的存在。灵山岛地层中识别出多层不对称负载构造,这些不对称负载构造倾向相同,挤入构造尖端指向一致,倾倒的方向(挤入构造的指向)为古斜坡下游方向。利用不对称负载构造的倾向和火焰构造的指向,证明存在区域古斜坡,并且SE高、NW低。

(2)负载构造和球-枕构造可用于判断古地震震级。前人研究认为,形成负载构造的震级超过6.5级^[4],火焰状构造表明有低强度的地震,地震震级(5.5~8)可以诱发形成球-枕构造^[35]。鄢继华^[36]通过模拟实验得出,负载构造和球-枕构造是在地震作用早期形成的,地层中保留下来的是地震作用的强度最大时形成的。变形构造的大小和类型可能代表了地震震动的相对强度。灵山岛形成负载构造的震级小于球-枕构造的震级,而大的球-枕构造代表的震级要大于小的球-枕构造代表的震级。灵山岛与五莲-烟台断裂、千里岩断裂距离约为40Km,据刘颖等^[28]研究的震级(M)与液化变形最大震中距的关系图(图6),判断上述断裂在早白垩世的地震震级大约为7~8级。

(3)包括球-枕构造与负载构造的软沉积物变形构造可用来判断古断裂的活动时间^[12],这是因为负载构造和球-枕构造是由地震触发形成的,而断裂

活动又会诱发地震。灵山岛与其NW侧的五莲-烟台断裂带直线距离约为40km,五莲-烟台断裂活动时间为早白垩世(K₁)^[37],与灵山岛震积岩形成时间空间有很好的匹配。

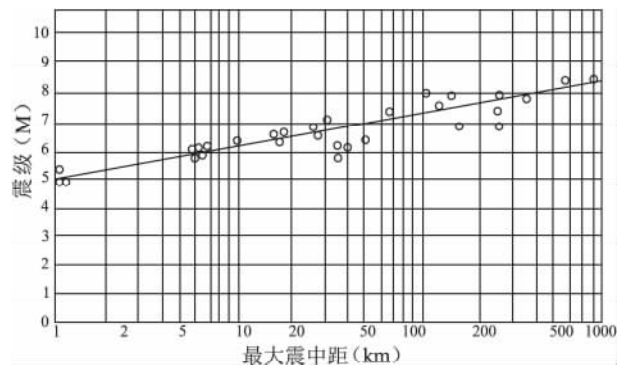


图6 震级与液化变形最大震中距关系^[28]

Fig. 6 The relationship between earthquake magnitudes and maximum distances from the epicenter which led to liquefaction (after Liu Ying and Xie Junpei, 1984)

5 结论

灵山岛的负载构造和球-枕构造具有多种尺度、多种形态、多种组合的特点。形成负载构造和球-枕构造要有上覆密度大的岩层覆盖在密度小的岩层之上,上覆沉积物在自身的重力驱动和地震诱发的液化作用下向下伏岩层陷入。通过对不对称负载构造的形态描述,证明了灵山岛古斜坡的存在。统计球-枕构造的大小,可判断地震震级的相对强度。灵山岛存在大量负载构造和球-枕构造说明其构造活动频繁,还可以据此判断古断裂活动时间,但断裂集中发育的地区除外(存在多解性和不确定性)。研究负载构造和球-枕构造必须要考虑研究区的沉积-构造背景、沉积环境等因素的影响作用。

参考文献:

- [1] KUENEN P. Significant feature of graded bedding [J]. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geologist, 1953, 37: 1044-1066.
- [2] OWEN G. Experimental soft-sediment deformation; structures formed by the liquefaction of unconsolidated sands and some ancient examples [J]. Sedimentology, 1996, 43(2): 279-293.
- [3] SMITH B. Ball-or-pillow-form structure in sandstone [J]. Geol. Mag., 1911, 3: 146-156.
- [4] KUENEN P. Experiments in Geology [C]. Transactions of the Geological Society of Glasgow, 1958. 23: 1-28.
- [5] 张传恒, 刘典波, 张传林, 王自强. 新疆博格达地区早二叠世软沉积物变形构造: 弧后碰撞前陆盆地地震记录 [J]. 地学前缘,

- 2006, 13(4): 255-266.
- [6] 曹高社, 高立祥, 林玉祥, 等. 晚白垩世西峡盆地和夏馆盆地古地震事件的发现及意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(4): 11-18.
- [7] 杨剑萍, 聂玲玲, 杨君. 柴达木盆地西南缘新近系与地震沉积有关的软沉积物变形构造及其地质意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 967-974.
- [8] 庞军刚, 国吉安, 宋立军, 等. 鄂尔多斯盆地延长期坳陷湖盆事件沉积记录[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(1): 31-37
- [9] 乔秀夫, 郭宪璞, 李海兵, 等. 龙门山晚三叠世软沉积物变形与印支期构造运动[J]. 地质学报, 2012, 86(1): 132-156.
- [10] 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): 593-610.
- [11] 杜远生. 中国地震事件沉积研究的若干问题探讨[J]. 古地理学报, 2011, 13(6): 581-586.
- [12] 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.
- [13] 吕洪波, 王俊, 张海春. 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[J]. 地质学报, 2011, 85(6): 938-946.
- [14] 吕洪波, 张海春, 王俊, 等. 山东胶南灵山岛晚中生代浊积岩中发现巨大滑移岩块[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 80-81.
- [15] 王安东, 周瑶琪, 闫华, 等. 山东省灵山岛软沉积物变形构造特征[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 717-728.
- [16] 栾光忠, 李安龙, 王建, 等. 青岛主要海岛成因分类及其地质环境分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(8): 111-116.
- [17] 张海春, 吕洪波, 李建国, 等. 山东青岛早白垩世新地层单位—灵山岛组[J]. 地层学杂志, 2013, 37(2): 216-222.
- [18] MORETTI M, SORIA J M, ALFARO P, WALSH N. Asymmetrical soft-sediment deformation structures triggered by rapid sedimentation in turbiditic deposits (Late Miocene, Guadix Basin, Southern Spain) [J]. *Facies*, 2001, 44: 283-294.
- [19] 吕洪波, 张海春, 王俊, 等. 灵山岛早白垩世复理石不是陆内三角洲沉积——答钟建华教授[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 11-14.
- [20] 钟建华. 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 [J]. 地质论评, 2012, 58(6): 1180-1182.
- [21] 蔡乾忠. 横贯黄海的中朝造山带与北、南黄海成盆成烃关系[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 185-196.
- [22] 张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪人地构造: 综评与新认识[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1462-1480.
- [23] 山东省第四地质矿产勘查院. 山东省区域地质[M]. 济南: 山东省地图出版社, 2003. 1-970.
- [24] MORETTIA M, RONCHI A. Liquefaction features interpreted as seismites in the Pleistocene fluvio-lacustrine deposits of the Neuquén Basin (Northern Patagonia) [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235(3-4): 200-209.
- [25] MORETTI M, PIERI P, TROPEANO M. Late Pleistocene soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in paralic deposits in the city of Bari (Apulian foreland, Southern Italy) [A]: Ettensohn F R, Rast N and Brett C E. Ancient Seismites [C]: Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper, 2002, 359: 75-85.
- [26] OWEN G, MORETTI M, ALFARO P. Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235(3-4): 133-140.
- [27] OWEN G. Deformation processes in unconsolidated sands [A]. Jones M E, Preston R M F. Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks [C]. London: London Geological Society, Special Publication, 1987, 29: 11-24.
- [28] 刘颖, 谢君裴. 沙土振动液化[M]. 北京: 地震出版社, 1984.
- [29] 冯先岳. 地震震动液化变形的研究[J]. 内陆地震, 1999, 3(4): 299-307.
- [30] 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, 33(8): 609-611.
- [31] 乔秀夫, 宋天锐, 高林志, 等. 地层中地震记录(古地震) [M]. 北京: 地质出版社, 2006. 1-263.
- [32] 张琴, 朱筱敏, 张军, 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.
- [33] 杜远生, 韩欣. 论震积作用和震积岩[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 389-394.
- [34] MORETTI M, SABATO L. Recognition of trigger mechanisms for soft-sediment deformation in the Pleistocene lacustrine deposits of the Sant Arcangelo Basin (Southern Italy): Seismic shock vs. overloading [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 196(1-4): 31-45.
- [35] BERRA F, FELLETTI F. Syndepositional tectonics recorded by soft-sediment deformation and liquefaction structures (continental Lower Permian sediments, Southern Alps, Northern Italy): Stratigraphic significance [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 235(3-4): 249-263.
- [36] 鄢继华, 崔永北, 陈世悦. 几种常见震积岩相标志在模拟实验中的识别[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1131-1137.
- [37] 周建波, 郑永飞, 赵子福. 山东五莲中生代岩浆岩的锆石 U-Pb 年龄[J]. 高校地质学报, 2003, 9(2): 185-194.

Load structures and ball-and-pillow structures on the Lingshan Island, Shandong

ZHANG Feng-xiao, ZHUO Yao-qi, WANG An-dong, YU Shan-shan

(*School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China*)

Abstract: The load structures and ball-and-pillow structures on the Lingshan Island, Shandong are examined in the light of outcrop observation, sedimentary petrology and geostatistical analysis. These load structures and ball-and-pillow structures are laterally extensive in the studied sections, and have the features of multiple scales, multiple morphologies and multiple associations. They are interpreted to be originated from the stratigraphic density inversion (bigger in the upper part and smaller in the lower part). In other words, the gravity-induced overlying deposits with greater densities and earthquake-induced liquefaction penetrated into the underlying strata, resulting in the formation of the load structures and ball-and-pillow structures. The asymmetrical morphology of the load structures strongly support the existence of the Lingshan palaeoslope during the Early Cretaceous. The statistics of the sizes of the load structures and ball-and-pillow structures may be used to deduce those of earthquake magnitudes. The presence of abundant load structures on the Lingshan Island indicates that frequent structural activities, especially the seismic activities may be responsible for the formation of the load structures and ball-and-pillow structures in the study area.

Key words: Lingshan Island; Early Cretaceous; load structure; ball-and-pillow structure; earthquake magnitude