

文章编号: 1671-1505(2017)04-0567-16 DOI: 10.7605/gdxb.2017.04.044

山东省灵山岛下白垩统青山群火山地震 软沉积物变形构造特征及成因机制*

周瑶琪^{1 2} 周腾飞^{1 2} 张振凯^{1 2} 梁 钊^{1 2} 梁文栋³ 王安东⁴ 于姗姗⁵

1 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2 中国石油大学(华东)地球化学与岩石圈动力学开放实验室, 山东青岛 266580

3 米兰比可卡大学地球与环境科学系, 米兰 20126, 意大利

4 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 山东东营 257091

5 中海石油研究总院, 北京 100027

摘 要 近年来, 针对山东省灵山岛地区软沉积物变形构造的研究呈现热潮, 但研究层位主要集中于下白垩统莱阳群的浊积岩, 对下白垩统青山群未见详述。利用野外露头与镜下薄片资料, 详细描述了灵山岛地区下白垩统青山群的岩性特征、岩相组合、软沉积物变形构造类型与特征, 指出研究区青山群软沉积物变形构造主要宿主岩层为陆相扇三角洲沉积, 其沉积水体逐渐变浅, 并伴随多次火山爆发。软沉积物变形构造类型主要有负载构造、球-枕构造、泄水构造、挤入构造、水塑性褶皱、塑性砂岩团块包卷构造、火山地震落石构造和“V”型地裂缝等, 形成原因主要为火山爆发引起的古火山地震作用, 成因机制主要分为地震波、火山碎屑物重力及惯性作用与瞬时差异气压效应3种, 这与莱阳群浊积岩层位的软沉积物变形构造主要为滑塌与构造古地震机制不同。通过分析火山碎屑流堆积层位与软沉积物变形构造发育层位的关系, 建立了青山群软沉积物变形构造的分布模式, 即随着与火山口距离的变化, 近源易见的脆性变形逐渐消失, 中源以液化软沉积物变形与塑性变形为主体, 远源呈现弱的液化软沉积物变形, 且软沉积物变形构造的规模与距离呈负相关。

关键词 灵山岛 下白垩统 青山群 软沉积物变形构造 火山地震

第一作者简介 周瑶琪, 男, 1963年生, 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院教授、博士生导师, 主要从事地球化学、地球动力学及盆地沉积学的教学与科研工作。E-mail: zhouyq@upc.edu.cn。

中图分类号: P512.2; P315.2 文献标志码: A

Characteristics and formation mechanism of soft-sediment deformation structures related to volcanic earthquakes of the Lower Cretaceous Qingshan Group in Lingshan Island, Shandong Province

Zhou Yaoqi^{1 2} Zhou Tengfei^{1 2} Zhang Zhenkai^{1 2} Liang Zhao^{1 2}

Liang Wendong³ Wang Andong⁴ Yu Shanshan⁵

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

2 Laboratory of Geochemistry & Lithosphere Dynamics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong

* 国家自然科学基金项目(编号: 41272123)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(编号: 15CX06011A)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41272123) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 15CX06011A)]

收稿日期: 2016-08-26 改回日期: 2016-10-21

3 Department of Earth and Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca, Milano 20126, Italy

4 Authority of Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve, Dongying 257091, Shandong

5 CNOOC Research Institute, Beijing 100027

Abstract Recently, the study on the soft-sediment deformation structures (SSDS) of Lingshan Island is a hot topic. The research is focused on the SSDS in turbidite system of the Lower Cretaceous Laiyang Group, while specific study on the SSDS in fan delta system of the Lower Cretaceous Qingshan Group is not illustrated in details. With the field outcrops and thin sections, we analyzed the lithologic characteristics, lithofacies associations, classification and characteristics of SSDS of the Lower Cretaceous Qingshan Group in the study area. A conclusion was acquired that the palaeoenvironment is a fan delta system with several volcanic eruptions, and the water became shallower gradually. The types of SSDS include load structure, ball and pillow structure, water escape structure, sediment-injection structure, hydroplastic deformation, plastic sandstone breccia, volcanic drop stone and “V” shaped ground fissure. They were mainly caused by volcanic earthquakes of three types: seismic wave, the gravity and inertia effect of pyroclastic deposition and instant differential air pressure, which are different from the slumping and tectonic earthquake occurred in the Laiyang Group. In addition, with the analysis of association between the pyroclastic flows and the SSDS horizons, a distribution model of SSDS related to volcanic earthquake can be built: The types of SSDS range gradually with the variation of distance from volcanic vent. The brittle deformation structure, common type in proximal zone, disappears gradually; in the medial zone, liquefied and plastic SSDS become dominant types; while in distal zone, slightly liquefied SSDS develops. Additionally, the scale and size of SSDS is negatively correlated with the distance from the volcanic vent.

Key words Lingshan Island, Lower Cretaceous, Qingshan Group, soft-sediment deformation structure, volcanic earthquake

About the first author Zhou Yaoqi, born in 1963, is a professor and doctoral supervisor in China University of Petroleum (East China). He is mainly engaged in teaching and researches of geochemistry, geodynamics and basin sedimentology. E-mail: zhouyq@upc.edu.cn.

软沉积物变形构造的概念最先用来描述古地震所引起的沉积物变形,在众多沉积学家的共同努力下,逐渐成为沉积学中重要的研究领域,其对于恢复古地震及古地理条件均具有重要意义(Allen, 1982; Owen *et al.*, 2011; Shamugam, 2016)。中国自1988年宋天锐针对华北地区元古代震积岩进行研究以来,有大量学者在塔里木盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、郯庐断裂带邻区针对震积岩与软沉积物变形在不同方面进行相关研究(袁静等, 2006; 乔秀夫和李海兵, 2008, 2009; 杨剑萍等, 2008; 宋天锐和刘燕学, 2009; 何碧竹等, 2010, 2012; 杜远生, 2011; 吕洪波等, 2011; 乔秀夫和郭宪璞, 2011; 钟建华, 2012),呈现百花齐放的研究热潮(冯增昭, 2013)。引起软沉积物变形的机制有古地震、海啸、波浪作用等,而古地震作用是主要的动力机

制,其所引起的差异压实、液化、滑移和滑塌作用是主要因素(杜远生, 2011),并主要分为液化变形、触变变形、水塑性变形、重力叠加牵引变形和脆性变形(He and Qiao, 2015)。自然地震主要分为构造地震、火山地震与塌陷地震,在已发表的软沉积物变形研究中,构造地震成因占主要地位(80%),火山地震也常引起下伏岩层的软沉积物变形(Robertson 1998; Jurado-Chichay and Walker, 2000; 杜远生等, 2005; Montenat *et al.*, 2007; 王国栋等, 2010; Moronzo and Delino, 2013; Basilone *et al.*, 2014)。

山东省灵山岛地区发育极其丰富的软沉积物变形构造,近年来,有大量学者针对其进行研究(董晓鹏等, 2013; 吕洪波等, 2013; 王安东, 2013; 王安东等, 2013, 2014; 邵珠福等, 2014; 周瑶琪等, 2015b; 钟建华等, 2016; Zhou *et al.*,

2017), 但主要研究层位为下白垩统莱阳群滑塌浊积岩, 对灵山岛上覆岩层, 即下白垩统青山群陆源碎屑沉积层中发育的软沉积物变形构造的研究未见详述。由于青山期为陆相沉积环境, 而莱阳期为海相沉积环境 (吕洪波等, 2013; 周瑶琪等, 2015a), 故二者古地理环境截然不同, 其软沉积物变形构造发育背景亦差别显著。文中针对青山群中的软沉积物变形构造进行研究, 探讨了青山期火山地震事件和软沉积物变形之间的内在联系, 建立了火山地震软沉积物变形构造分布的模式, 并初步讨论了莱阳期古地震与青山期古地震的异同。

1 下白垩统青山群剖面特征及地层序列

灵山岛 ($35^{\circ}45'26.0''N$, $120^{\circ}09'48''E$) 位于山东省青岛市黄岛区东南的黄海之中, 面积约为 7.2 km^2 , 最高海拔 513 m, 距离积米崖约 17 km。灵山岛上主要发育下白垩统莱阳群浊积岩以及青山群陆源碎屑岩及火山岩、火山碎屑岩层, 其对于山东东部地区下白垩统有较完整的沉积记录。莱阳群

主要出露于该岛北端的背来石剖面、西北侧的船厂剖面以及该岛西南端的灯塔、千层崖剖面, 青山群沉积于莱阳群之上, 在灵山岛青山群出露最全的地点为洋礁洞剖面 (图 1) 进行研究。

洋礁洞剖面位于灵山岛东南角 ($35^{\circ}45'18.3''N$, $120^{\circ}11'1.2''E$), 发育较为完整的青山群火山—沉积地层, 由下向上发育火山碎屑岩与陆源碎屑岩沉积、流纹岩、陆源碎屑岩夹多套火山碎屑流堆积、火山熔岩层 (图 2, 图 3)。地层剖面岩性简述如下:

第 4 段: 大套紫红色火山碎屑岩与火山熔岩

厚层火山角砾岩、火山熔岩层, 与下伏地层呈不整合接触。洋礁洞剖面出露 40 余米, 直达山顶, 估计总厚度大于 100 余米。

第 3 段: 陆源碎屑岩夹火山碎屑流堆积层

发育一套扇三角洲相的砂砾岩和泥岩互层沉积, 夹 8~12 套火山灰流沉积和 3 套玄武岩, 共厚 55 m。陆源碎屑岩主体为灰色含砾砂岩、粗砂岩与粉砂岩、粉砂质泥岩构成的碎屑岩沉积, 见粒序层理、水平层理、槽状层理、板状交错层理、冲刷—充填构造、泥岩干裂缝、植物炭屑、生物潜穴和球形风化壳等。水体总体向上变浅, 沉积相判定为扇三角洲平原—前缘亚相。火山碎屑流堆积层中砾石多

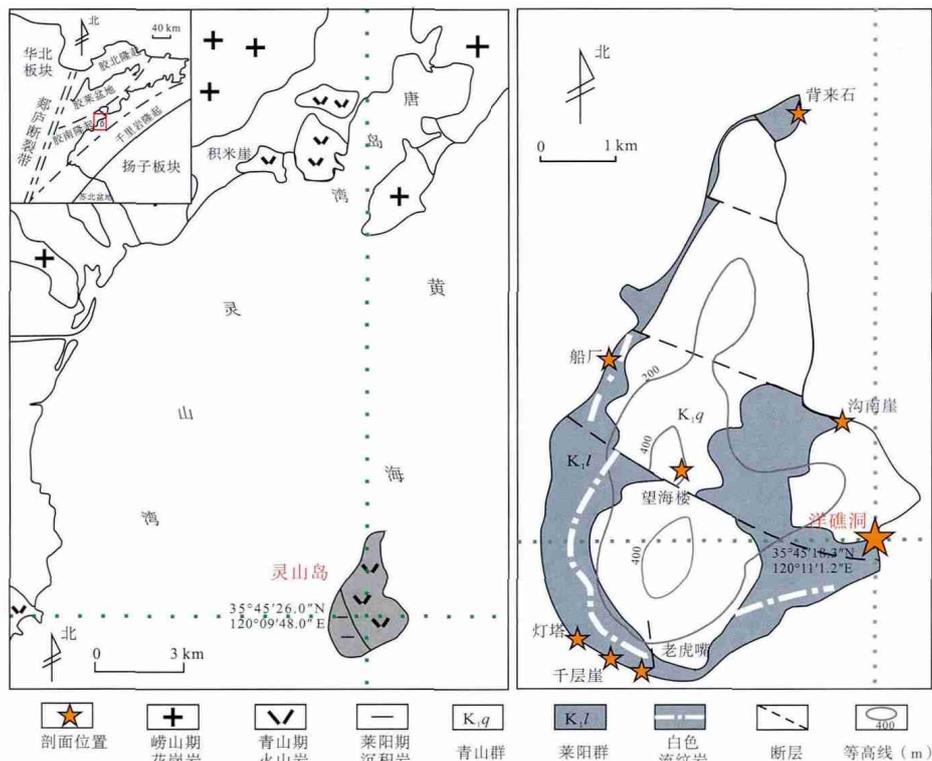


图 1 山东省灵山岛区域地质图及剖面分布 (据栾光忠等, 2010; 有修改)

Fig. 1 Regional geological map and distribution of sections in Lingshan Island of Shandong Province (modified from Luan *et al.*, 2010)



图 2 山东省灵山县洋礁洞剖面宏观照片
Fig. 2 Outcrop of Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

为变质岩砾石，薄片镜下观察含晶屑和岩屑，凝灰结构，定名为含砾晶屑岩屑凝灰岩，其中 2/3 的成分为火山灰，故为火山灰流。砾石分选差，磨圆多次棱角状，搬运距离不远，无熔结构，部分层位卷入砂岩团块，最大集块长轴可达 1 m。

——— 植被、滚石覆盖 ———
第 2 段：厚层灰白色流纹岩
白色溢流流纹岩层，厚约 20 m，在灵山县地区发育较

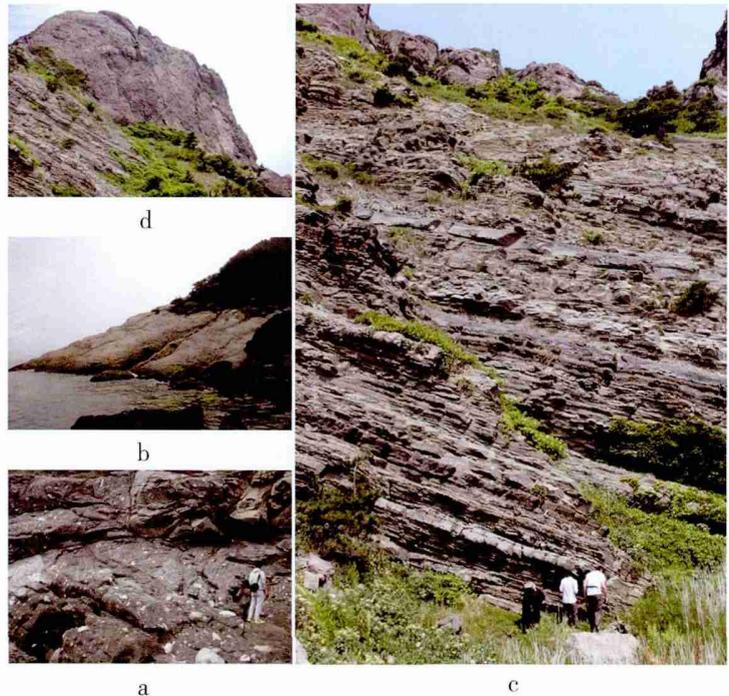


图 3 山东省灵山县洋礁洞剖面下白垩统青山群地层柱状简图

Fig. 3 Sketch showing stratigraphic column of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

为广泛，厚度变化大，岩层整体呈南东厚、北西薄。下伏地层在洋礁洞地区为 1 套近源火山碎屑堆积与陆源碎屑沉积层，在灵山县其他地区为莱阳期浊积相砂泥岩沉积层。

第 1 段：火山碎屑岩与陆源碎屑岩

上部为陆源碎屑岩，主要以砂砾岩为主，砾石分选差，磨圆差，为冲积扇沉积。下部为近源火山碎屑堆积，砾石成分复杂，包括变质岩砾石与沉积岩塑性团块，见巨型包卷砂岩团块。地层向下没入海平面，不见底，厚约 20 m。

2 陆源碎屑沉积地层中的软沉积物变形构造

2.1 软沉积物变形构造类型与特征

青山群陆源碎屑岩层段中发育的软沉积物变形构造主要有 3 种类型：(1) 液化变形：负载构造、挤入构造、球-枕构造和泄水构造；(2) 塑性变形：水塑性褶皱、塑性砂岩团块、火山地震落石构造；(3) 脆性变形 “V” 型地裂缝。

2.1.1 负载构造

负载构造在青山群陆源碎屑岩沉积中发育较多，在火山碎屑岩层下伏的沉积岩层段中尤为显著。包括 2 种类型的负载构造：第 1 种为震积岩常



a—负载构造与挤入构造, 是传统意义由于沙层液化与差异重力压实作用所导致的负载构造; b—第 2 种负载构造, 由于上覆火山碎屑流堆积物自身重力作用所致, 挤入构造并不明显; c—大型负载构造与挤入构造, 发育于近源火山碎屑流岩层; d—“火焰状”挤入构造; e—负载构造与挤入构造, 见挤入构造刺穿上覆砂岩负载层; f—“火焰状”挤入构造, 上覆粗碎屑负载层, 下伏细碎屑层液化后挤入上覆沙层

图 4 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群负载—挤入构造野外照片

Fig. 4 Field photos showing load and injection deformation structures of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

见的软沉积物变形构造, 是由于地震作用导致未固结沙层液化形成的, 常与挤入构造相伴生(图 4-a, 4-c); 第 2 种主要为高密度火山碎屑流直接对下层未固结砂岩差异压实作用所致, 不与挤入构造相伴生(图 4-b)。二者具有不同的成因机制(表 1)。

2. 1. 2 挤入构造

常与负载构造相伴生, 主要为沉积物未固结时, 由于地震作用, 上覆未固结沙层发生液化, 在差异压实和沙层液化双重作用下, 下伏细粒沉积物在挤入上覆粗粒沉积层中时, 形成形状如常规形、梯形、火焰状、X 形、尖峰形和穹顶形的挤入构造(王安东, 2013)。灵山岛青山群主要发育的挤入

表 1 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群 2 种负载构造对比

Table 1 Correlation between two types of load structures of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

| 类别 | 第 1 种 | 第 2 种 |
|------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 物质组成 | 砂岩、泥岩组合, 负载构造层位为较粗粒沉积物, 下伏为较细粒沉积物 | 火山碎屑流堆积物与砂岩, 负载构造层位为火山碎屑流堆积物, 下伏为砂岩 |
| 形态结构 | 起伏明显, 常与挤入构造相伴生 | 起伏较缓, 无挤入构造相伴生 |
| 成因 | 沙层液化 | 高密度火山碎屑流堆积物差异压实 |

构造为“火焰状”(图4-d, 4-f)和“尖点状”(图4-a, 4-e)2种类型。

特别地,火山碎屑流亦可以作为挤入层,挤入至上覆液化沙层中。远源火山碎屑流堆积物熔结作用已经非常小,此时火山碎屑流堆积物的粒度、密度亦逐渐变小。当其密度小于上覆砂岩层时,在其刚刚堆积而未成岩时,在火山地震作用的影响下,与周缘沙层一起发生液化并向上底辟,刺穿沙层,形成负载构造和挤入构造,负载层为沙层(图5)。

2.1.3 枕状构造与球—枕构造

枕状构造常与球—枕构造相混淆,但在形态特征与成因机制上二者均不尽相同:前者呈现“凹”型,主要由于下伏沙层强烈液化向上覆沙层穿刺侵位,形成“枕”型的“向斜”褶皱;后者则与负载构造机制相似(乔秀夫和李海兵,2008),即地震发生时上覆粗粒砂层与下伏细粒砂层的重力系统重新平衡所形成,多表现为粗沙陷落至细沙层中。灵山岛青山群陆源碎屑沉积层段中球—枕构造与枕状构造均有发育(图6;图7-a)。

2.1.4 泄水构造

泄水构造为常见的沙层液化的软沉积物变形构造,表现为下伏沙层向上液化,未完全刺穿上覆沙层,可以清晰地观察到砂岩层内部的泄水通道。形成机理为:在火山地震发生时,包含水的未固结沙层液化,沿泄水通道排水,未刺穿上覆沙层,在此过程中,两侧沙质被水带向中间,导致在向上液化的部位造成上覆沙层牵引变形与流动变形,形成枕状构造与枕状层(图7-a)。

2.1.5 水塑性褶皱

水塑性褶皱是软沉积物在原地或者准原地,在地震发生时或之后遭受挤压应力所产生的褶皱变形。一般而言,水塑性变形并无液化参与,但由于沉积层富水并且伴随流动牵引,常呈现为一种弱的液化层。研究区青山群主要发育纹层卷曲变形(图7-b)与褶皱变形(图7-c)2种类型的水塑性变形。

2.1.6 塑性砂岩团块

不同于液化角砾岩,塑性砂岩团块包卷构造是火山地震作用近源堆积特有的软沉积变形构造(火山爆发相),其是火山爆发所引起的火山碎屑流(高密度)在流动过程中,对下伏正常沉积岩层产生一定的侵蚀作用,并且将未固结的沙层卷入碎屑流堆积物中,之后冷凝成岩所形成的塑性砂岩团块(图8-d)、包卷构造。特别地,近源火山碎屑流堆积由于其强大的冲击力、巨量的事件沉积物体积以及火山崩落堆积和火山碎屑流堆积2种火山事件沉积方式,可将未固结的塑性沙层卷入,形成巨型塑性砂岩团块(图8-e)。

2.1.7 火山地震落石构造

杜远生等(2005)针对广西北海市涠洲岛晚更新世火山地震研究中,系统地探讨了火山角砾坠入邻近尚未固结的沉积岩层中致使软沉积物局部发生塑性形变所形成的火山地震落石构造。火山地震落石构造是火山地震作用近源堆积特有的变形构造(火山爆发相),是火山通道近邻的围岩(可为前期火山活动形成的火山岩砾石,也可为火山盆地基底的变质岩砾石),

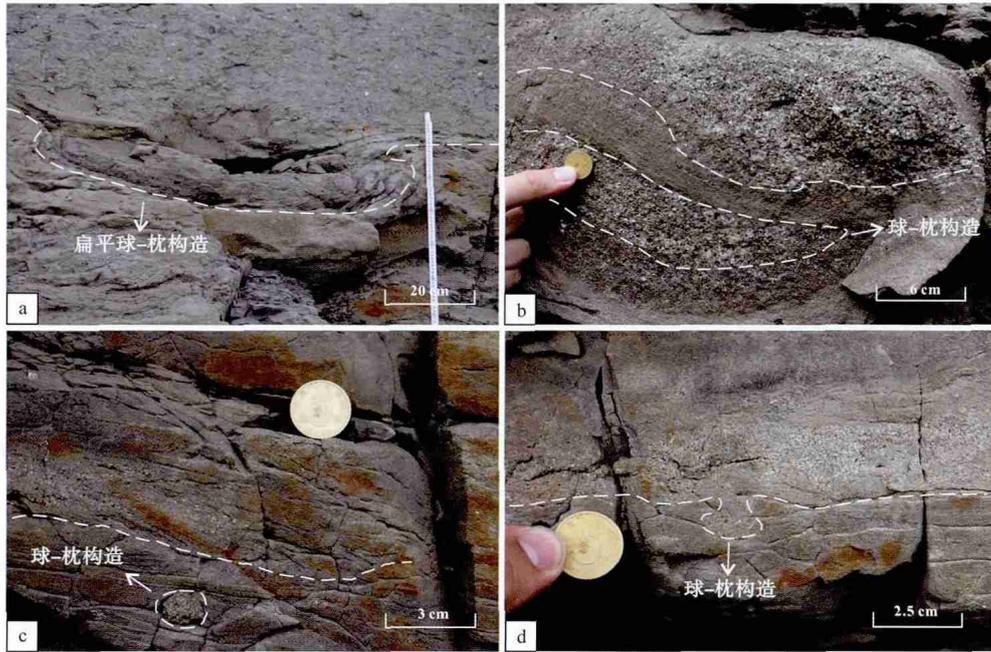


a—挤入构造,远源火山碎屑流堆积物发生液化,向上挤入上覆沙层,形成机制类似于液化砂岩脉;

b—挤入构造,远源火山碎屑流堆积物液化向上挤入而成

图5 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群火山碎屑流堆积物挤入构造野外照片

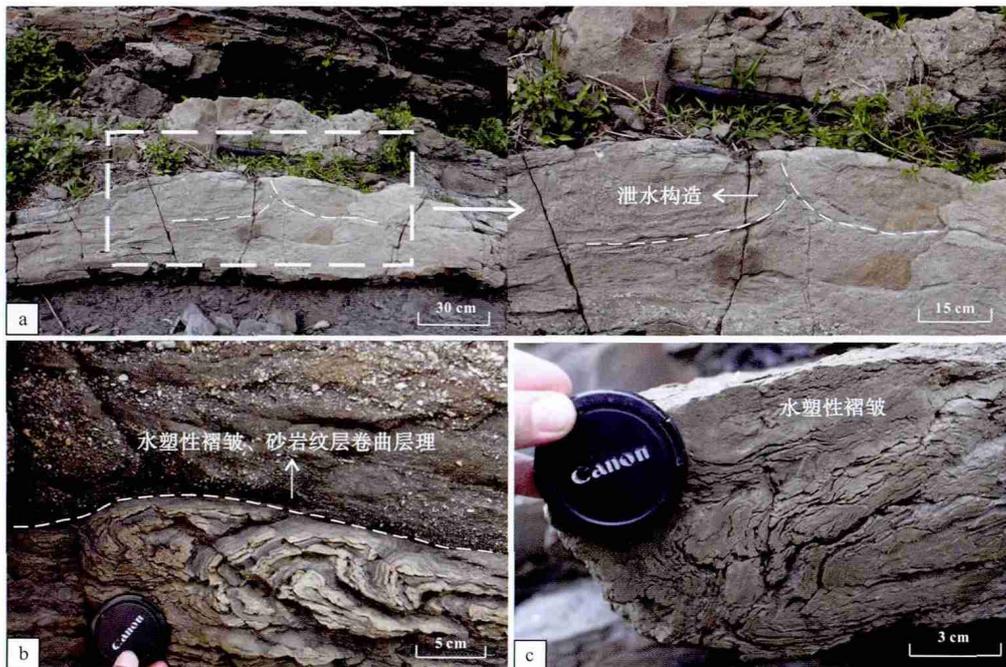
Fig. 5 Field photos showing injection deformation structure of pyroclastic flow deposits of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province



a—大型扁平球—枕构造, 下伏细沙层发生液化, 由于重力失衡, 向上底辟 (较弱), 上覆粗沙层向下坠入, 未完全脱离母层; b—粗砂质“梭型”球—枕构造, 上覆粗沙层坠入下伏细沙层中, 已完全脱离母沙层; c, d—小型球—枕构造, 上覆粗砂“坠入”下伏细沙中, c 中沙球已完全脱离母沙层, d 中呈现半脱离状态

图 6 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群球—枕构造野外照片

Fig. 6 Field photos showing ball-pillow structure of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

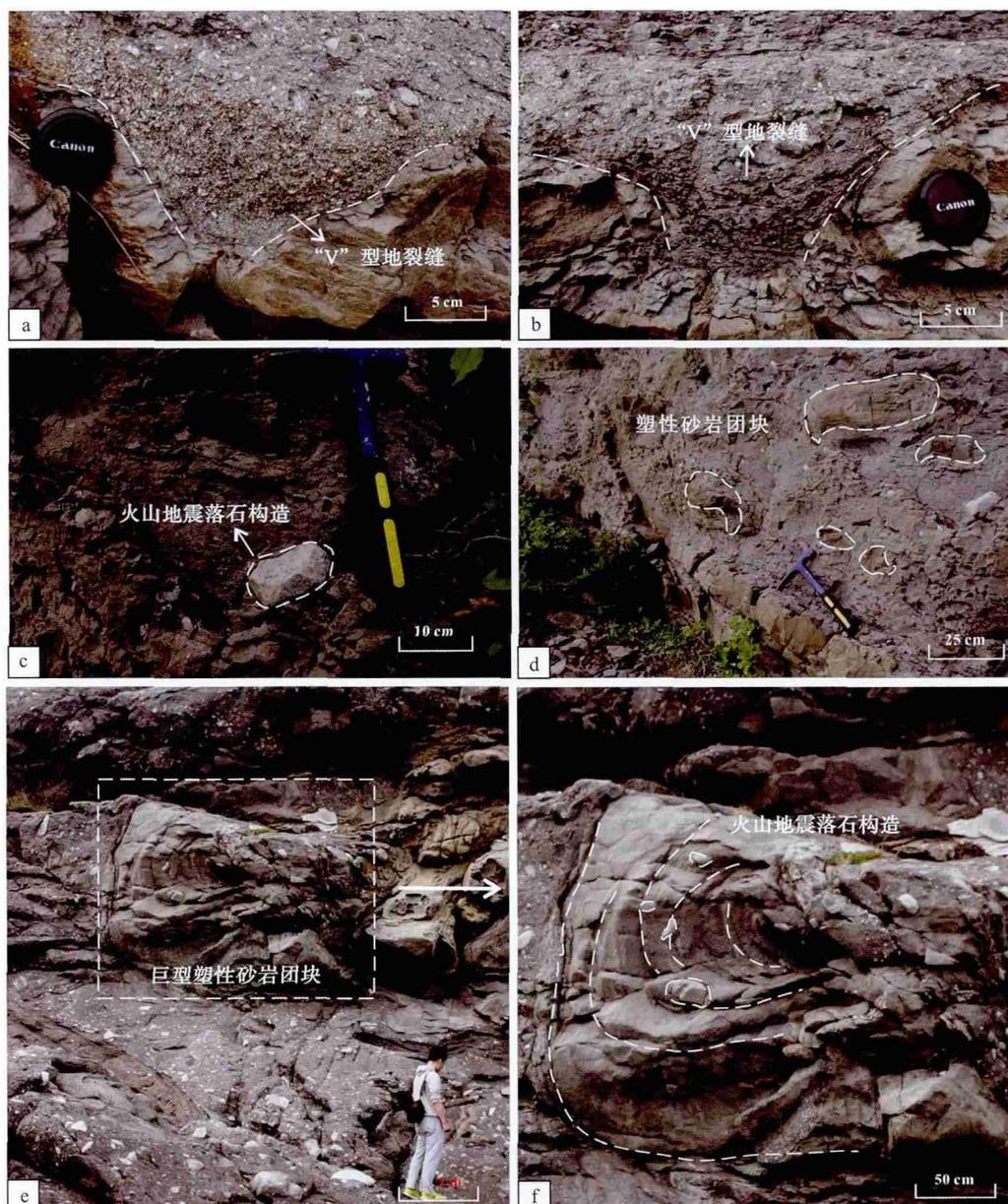


a—泄水构造、枕状构造与枕状层, 沙层内部液化, 颗粒间水在系统重平衡过程中向上逸逃, 常常伴随沉积碎屑随水流搬运, 规模较小时形成枕状构造与枕状层; b, c—砂岩纹层卷曲层理和砂岩层内部水塑性褶皱

图 7 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群泄水构造与水塑性褶皱野外照片

Fig. 7 Field photos showing water escape structures and hydroplastic deformation

of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province



a, b—“V”型地裂缝, 发生火山地震时下伏沙层(半固结状态)所形成的脆性变形, 后被上覆沉积物充填; c, f—火山地震落石构造, 火山喷发时, 喷出的火山角砾飞入周缘未(半)固结的沉积层中所形成的变形构造, 属于近—中源火山地震区域的典型沉积构造; d, e—塑性砂岩团块, 主要是火山碎屑流流动过程中卷入了原先未(半)固结的沉积物形成的塑性变形构造

图8 山东省灵山县洋礁洞剖面下白垩统青山群地裂缝、火山地震落石构造与塑性砂岩团块野外照片

Fig. 8 Field photos showing ground fissures, volcanic drop stones and plastic sandstone breccias of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

由于火山爆发作用炸裂而成的岩砾飞到邻近的岩层中所形成的(图8-c, 8-f), 邻近岩层则基于固结的状态, 会形成脆性变形(固结)或软沉积物塑性变形(半固结、未固结)。如图8, 火山爆发时, 岩块先飞入邻近的未固结砂岩中形成火山地震落石构造(图8-f), 后火山碎屑流将半固结的砂岩地层卷入形成了巨型的塑性

砂岩团块(图8-e), 这显然为2期变形构造, 且二者机制截然不同。

2.1.8 “V”型地裂缝

“V”型地裂缝是由于地震作用在地表沉积物(半固结)中所形成的脆性变形, 后期被正常沉积或火山碎屑堆积充填, 呈现“V”字型, 主要出现在近—中源的火山碎屑堆积的下伏岩层之中。地裂

缝(图 8-a, 8-b) 边缘平直, 呈现倒锥状, 上宽约 20cm, 向下逐渐收敛至 3~5 cm, 粒度较上覆的火山碎屑堆积物细, 推测为“筛积”形成。

2.2 软沉积物变形构造纵向地层分布特征及其与火山碎屑流堆积层分布的耦合关系

如图 9, 青灰色地层为火山碎屑流堆积物, 红棕色地层为基性浅成岩, 其余为扇三角洲相的黄绿色砂岩与暗色泥岩组合, 呈现一套水体向上变浅的沉积序列, 10 余层的火山碎屑流堆积物呈夹层存在于正常沉积岩之间, 指示这套浅水沉积在形成过程中发生了多次火山活动。对火山碎屑流堆积物发育层位与软沉积物变形构造发育层位进行统计, 发现整个剖面的软沉积物变形构造多存在于火山碎屑流堆积物下伏岩层之中, 纵向上, 共 10 套岩层之中发现软沉积物变形构造, 并有共计 15 次火山活动, 其中火山碎屑流堆积层 10 套(图 10)。各套火山碎屑流堆积物下伏砂岩之中或火山碎屑流层堆积物中发育的软沉积物变形构造类型互有差别(表 2), 且相同类型的软沉积物变形构造, 如负载构造与挤入构造, 在大小、形状等特征方面亦有所差异。



图 9 山东省灵山岛洋礁洞剖面
下白垩统青山群第 3 段宏观照片

Fig. 9 Outcrop of the Member 3 of Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

3 火山碎屑流堆积物与相关软沉积物变形构造

根据对每一套火山碎屑流堆积物中或下伏沉积岩层中的软沉积物变形构造的观察与统计, 可知各

表 2 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群软沉积物变形构造与火山碎屑流堆积物发育关系
Table 2 Relationship between pyroclastic flow deposits and SSDS of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

| 火山碎屑流堆积物 | 厚度 /m | 下伏岩层 | 软沉积物变形构造 |
|--------------------|-------|----------------------|---|
| 流纹岩下 5 m 处火山碎屑流堆积物 | 8.0 | 不见底, 上覆冲积扇砂砾岩 | 巨型塑性砂岩团块、火山地震落石构造、负载构造 |
| 第 1 套 | 0.2 | 正常沉积岩 | 下伏砂岩层中“火焰状”挤入构造 |
| 第 2 套 | 1.0 | 2 套中基性“溢流相”火山岩, 下伏砂岩 | 火山碎屑岩及火山岩层段下伏岩层中可见负载构造和挤入构造 |
| 第 3 套 | 0.6 | 正常沉积岩 | 未见(软)沉积物变形 |
| 第 4 套 | 0.4 | 正常沉积岩 | 下伏砂岩中发育负载构造、挤入构造、枕状构造、“V”型地裂缝, 火山碎屑流堆积物与砂岩之间见“波浪状”塑性变形接触面 |
| 第 5 套 | 0.5 | 正常沉积岩 | 下伏砂岩中发育“火焰状”挤入构造 |
| 第 6 套 | 0.8 | 正常沉积岩 | 负载构造、挤入构造、砂岩水塑形褶皱 |
| 第 7 套 | 7.0 | 第 6 套火山碎屑岩 | 火山碎屑流堆积物中含有火山地震落石构造、塑性砂岩团块 |
| 第 8 套 | 2.0 | 正常沉积岩 | 下伏砂岩中“V”型地裂缝被火山碎屑流物质充填 |
| 安山岩下 2 m 处火山碎屑流堆积物 | 0.3 | 正常沉积岩 | 上覆砂岩中见泄水构造、枕状构造与枕状层, 砂岩上覆 2 m 处即为爆发相安山质火山碎屑岩 |

注: 正序对应岩层由下到上的顺序。

层位软沉积物变形构造存在差异, 原因主要是由于区域上不同的火山地震强度导致受力大小不同, 进而致使形成不同类型的变形构造以及同种类型变形构造具有不同的尺度与特征。地震强度随着与火山之间距离的增加呈现衰减状态, 火山地震(火山爆发)的震源基本位于火山口之下 0~10 km 处(Zobin, 2003), 由此可知, 与火山口的距离是影响火山地震软沉积物变形构造类型、尺度的很重要的因素。

火山碎屑堆积物对于距火山口的距离具有很好的指示作用, 针对火山碎屑堆积物的研究, 国内外均具有较好的研究基础(谢家莹, 1994; 孙善平

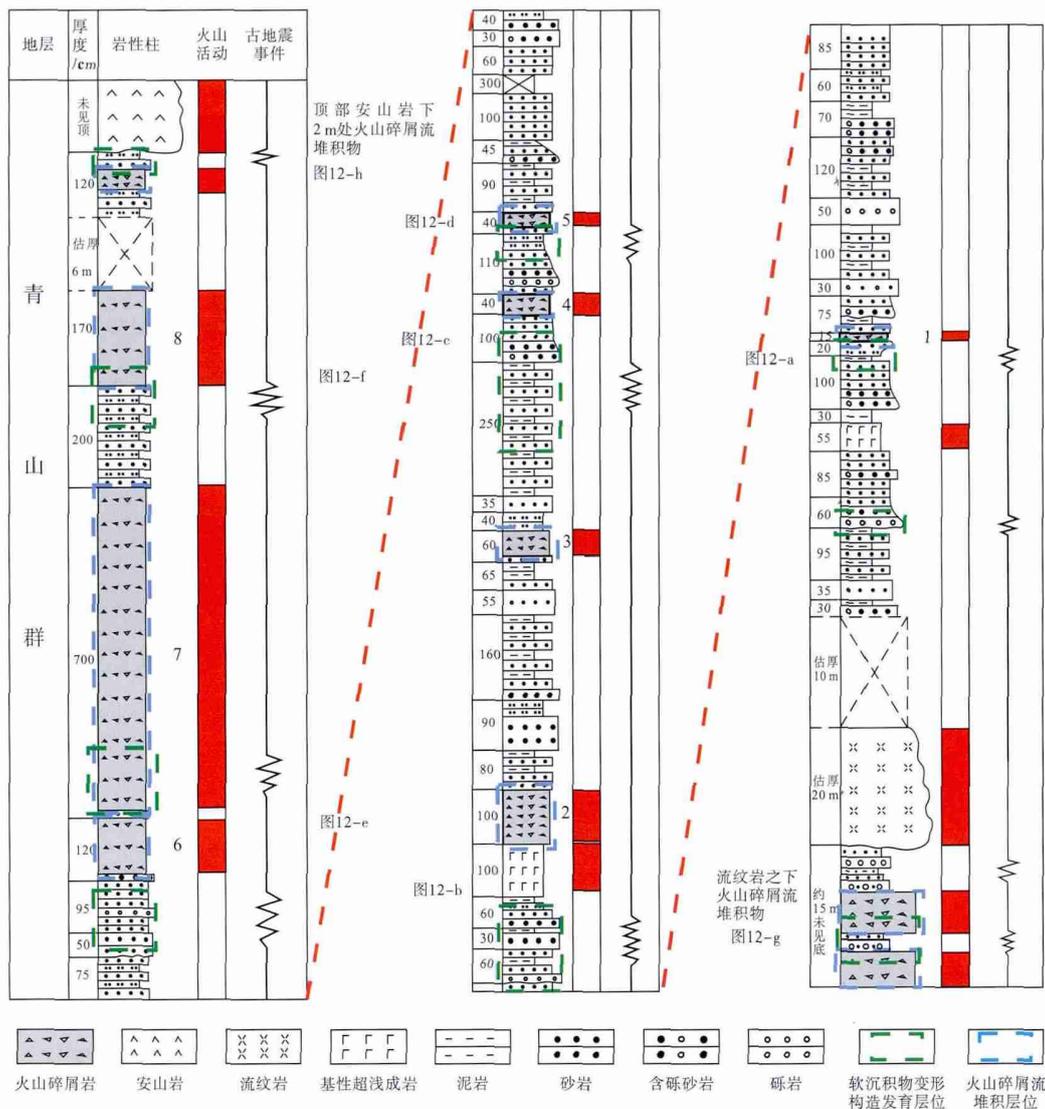


图 10 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群火山碎屑流堆积物与软沉积物变形构造发育层位关系

Fig. 10 Relationship between pyroclastic flow deposits and SSDS developed layers

of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiadong section in Lingshan Island of Shandong Province

等, 2001; 白志达等, 2006; 赵波, 2010)。根据与火山口的距离远近, 火山碎屑堆积物可以划分崩落堆积、火山碎屑流堆积和空降堆积 3 种类型。研究区青山群中多为火山碎屑流堆积物, 可以根据野外特征划分为近源和中源 2 种类型。近源火山碎屑流堆积物, 具有类熔岩构造、斑杂构造, 也可见大小不一的火山弹、火山角砾等; 中源火山碎屑流堆积物主要具有厚层堆积构造 (厚度 10~20 cm)、块状构造以及岩屑富集带等 (赵波, 2010), 其中所包含的火山砾石具有排列特征, 一般无粒序层理且分选很差, 指示了火山碎屑流的高密度流体特性。火山碎屑流的搬运能力随着与火山口距离的增

加逐渐减弱, 砾石最大粒径 (长轴) 对火山碎屑流的搬运能力及其距火山口的距离有初步指示作用。

各套火山碎屑流堆积物的最大砾石粒径的差别 (表 3), 进一步说明了各套火山碎屑流堆积物与火山口的距离远近不一。结合野外地质特征 (图 11), 初步判定流纹岩下 5 m 处的火山碎屑流堆积物为近源火山碎屑堆积, 第 7、8 套火山碎屑流堆积物为近一中源火山碎屑堆积, 其余均为火山碎屑流中源堆积类型。

流纹岩下 5 m 处的火山碎屑流堆积物与其邻近冲积扇沉积岩, 由于与火山口距离近, 火山爆发时



a—流纹岩下 5 m 处火山碎屑流堆积物; b, c—第 1 套和第 2 套火山碎屑流堆积物;
d, e, f, g, h—第 4~8 套火山碎屑流堆积物; i—安山岩下 2 m 处火山碎屑流堆积物
图 11 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群火山碎屑流堆积物野外照片

Fig. 11 Field photos showing pyroclastic flow deposits of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

表 3 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群火山碎屑流堆积物最大砾石粒径统计

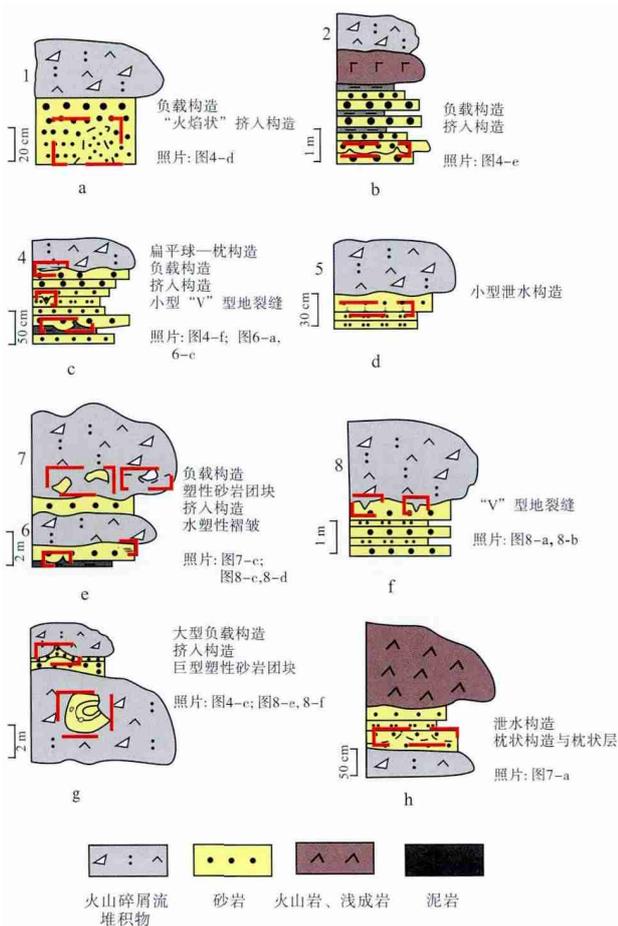
Table 3 Statistics of the maxmum grain size of breccias in pyroclastic flow deposits of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

| 火山碎屑流 | 厚度/m | 砾石最大粒径/cm |
|--------------------|------|-----------|
| 流纹岩下 5 m 处火山碎屑流堆积物 | 8.0 | 60.0 |
| 第 1 套 | 0.2 | 1.0 |
| 第 2 套 | 1.0 | 2.5 |
| 第 3 套 | 0.6 | 1.5 |
| 第 4 套 | 0.4 | 1.5 |
| 第 5 套 | 0.5 | 1.6 |
| 第 6 套 | 0.8 | 2.0 |
| 第 7 套 | 7.0 | 40.0 |
| 第 8 套 | 2.0 | 20.0 |
| 安山岩下 2 m 处火山碎屑流堆积物 | 0.3 | 1.0 |

注: 正序对应岩层由下到上的顺序。

能量巨大, 可见火山地震落石构造、巨型塑性砂岩团块包卷构造以及大型的负载构造和挤入构造; 第 1~6 套以及第 9 套火山碎屑流堆积物, 除第 3 套火山碎屑流堆积物下伏沉积岩层软沉积物变形构造不明显外, 其余邻近沉积岩层中均发育多种类型的软沉积物变形构造, 主要类型包括: 负载构造、挤入构造、球—枕构造、水塑性褶皱、液化泄水构造等; 第 7、8 套火山碎屑流堆积物中或邻近岩层中主要发育了“V”型地裂缝、塑性砂岩团块包卷构造、火山地震落石构造等(图 12; 表 1)。

结合表 1、表 2、图 10 和图 12 易知, 近源、中源(包括其中的过渡)火山碎屑堆积层及邻层的火山地震沉积物变形构造类型具有显著的差异, 变形构造类型包括了脆性变形、塑性变形与液化软沉积物变形, 并且由近至远分布不同。近源: 脆性变形居多, 塑性变形与液化软沉积物变形均规模较



a—第 1 套火山碎屑流堆积物, 发育“火焰状”挤入构造; b—第 2 套火山碎屑流堆积物, 发育负载构造和挤入构造; c—第 4 套火山碎屑流堆积物, 发育球—枕构造、负载构造、挤入构造和“V”型地裂缝; d—第 5 套火山碎屑流堆积物, 发育泄水构造; e—第 6 套和第 7 套火山碎屑流堆积物, 发育塑性砂岩团块、负载构造和挤入构造; f—第 8 套火山碎屑流堆积物, 发育“V”型地裂缝; g—流纹岩下 5 m 处火山碎屑流堆积物, 发育巨型塑性砂岩团块、大型负载构造和挤入构造; h—顶部安山岩下 2 m 处火山碎屑流堆积物上覆岩, 发育泄水构造、枕状构造与枕状层

图 12 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群火山碎屑流堆积物与软沉积物变形构造发育类型

Fig. 12 Types of SSDS with pyroclastic flow deposits of the Lower Cretaceous Qingshan Group from Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

大, 可见火山地震落石构造与巨大的塑性砂岩团块包卷构造; 中源: 脆性变形急剧减少, 并且规模变小, 塑性变形与液化软沉积物变形趋于稳定, 占主导地位, 其规模受沉积岩层岩性与岩相组合特征影响, 特别地, 沙层由于火山碎屑流流动特性与高密度所致的差异压实作用, 导致下伏沙层多塑性形变, 形成波状褶皱; 远源: 火山地震能量传播急剧

衰弱, 仅形成弱的液化泄水构造或负载—挤入构造。笔者建立的英安质岩浆爆发相火山地震软沉积物变形构造分布模式如表 4 和图 13 所示。

表 4 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群火山碎屑堆积物与相近岩层软沉积物变形构造类型的关系

Table 4 Relationship between pyroclastic flow deposits' classification and the SSDS types of the Lower Cretaceous Qingshan Group in Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province

| 火山沉积物类型 | 近源堆积 | 中源堆积 | 远源堆积 |
|-------------------|------------------------------------|---|-------------------------|
| 与火山口的距离 | 近 | 中 | 远 |
| 下伏岩层发育的软沉积物变形构造类型 | 火山地震落石构造、大型负载构造、“V”型地裂缝、塑性砂岩团块包卷构造 | 负载构造、挤入构造、球—枕构造、枕状构造、水塑性褶皱、泄水构造、小型“V”型地裂缝 | 负载构造(弱)、挤入构造(弱)、泄水构造(弱) |

需要指出的是, 随着距离的增加, 火山地震软沉积物变形构造的类型、形态、规模等特征应是渐变的, 而近源、中源、远源的距离判别是针对大量火山机构的地质统计所得的经验数据, 定量研究需要进一步计算火山爆发强度与火山爆发物质总量, 并且结合岩石地球化学分析对不同区域、不同性质的岩浆爆发作用予以分别讨论。

4 灵山岛青山群(软)沉积物变形构造的火山地震触发机制

与莱阳群软沉积物变形构造相比, 青山群火山地震引起的软沉积物变形构造在类型、形态特征、规模大小、分布密度等方面均有明显的不同: (1) 莱阳群软沉积物变形构造存在滑塌机制所引起的大量褶皱变形层理, 青山群中存在火山地震所产生的“V”型地裂缝, 此二者为 2 个群特有的沉积变形构造; (2) 莱阳群软沉积物变形构造的规模大小不一, 负载构造从毫米级至数十厘米级均有, 且“火焰状”挤入构造的火焰方向较为统一; 青山群小型负载构造少见, 多为厘米级负载构造, 且挤入构造形态不一; (3) 莱阳群软沉积物变形构造数量多, 连片出现, 横向可追踪性非常好; 青山群软沉积物变形构造数量较少, 多为孤立或几个一起出

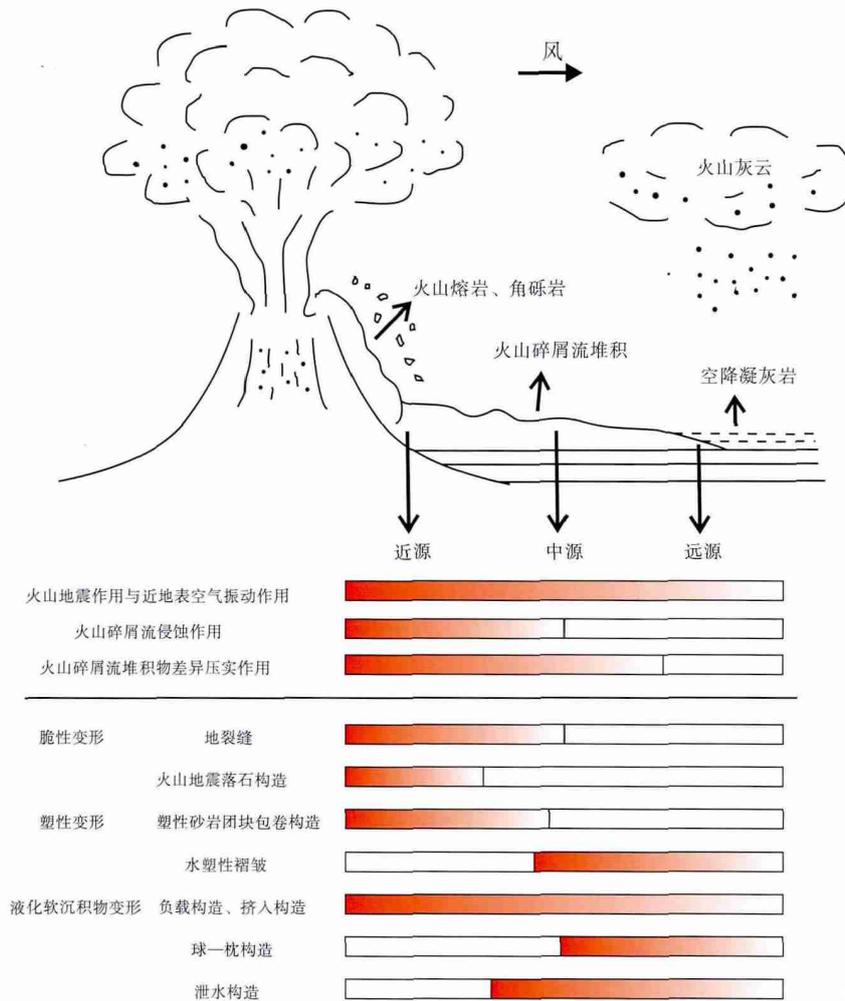


图 13 山东省灵山岛洋礁洞剖面下白垩统青山群火山地震软沉积物变形构造分布 (距火山口)

Fig. 13 Distribution of SSDS of the Lower Cretaceous Qingshan Group related to volcanic earthquake in Yangjiaodong section in Lingshan Island of Shandong Province (ranging according to the distance from volcanic vent)

现, 极少见连片出现。究其原因, 认为: (1) 不同岩相古地理导致的岩性组合差异和 (2) 构造地震与火山地震的不同地震特征, 二者共同导致了软沉积变形物构造具有较大差异。

火山地震以岩浆活动地震与火山爆发地震 2 种方式存在, 前者为岩浆在地下活动、并不喷出地表, 后者表现为火山爆发作用、岩浆喷出地表。研究火山地震所引起的软沉积物变形构造, 应对此 2 类火山地震作用予以区分。研究区青山期主要为中酸性喷出岩的火山活动, 火山活动范围属于胶东火山岩区域, 胶东半岛火山岩的岩石地球化学特征表明, 其成因应为太平洋板块俯冲作用下, 岩浆熔融源区由地幔逐渐向下地壳转变形成的岩浆分异所致

(匡永生等, 2012; 曹光跃等, 2014)。根据 Zobin 等 (2003) 针对墨西哥 Colima、El Chichon 以及日本 Sakurajima 等安山质岩浆爆发相为主的火山活动及与之相关的现代火山地震的研究可知: 安山岩区的爆发相火山地震, 震源深度大多较浅 (0 ~ 20 km), 且火山爆发作用较为强烈, 在灵山岛上的巨厚火山集块岩、火山角砾岩、安山质火山熔岩亦体现了青山期强烈的火山爆发作用。

早白垩世青山期, 灵山岛地区由莱阳期的海相沉积环境逐渐过渡到了陆相, 火山爆发作用伴随水的参与, 岩浆挥发成分增多, 导致爆发作用变强。强大的火山爆发事件引起了火山地震, 使得当时半固结、未固结的沉积物发生变形, 多套的火山碎屑

流堆积物和沉积物变形构造发育层记录下了多次古火山地震事件。

软沉积物变形构造的火山地震触发机制,主要为下伏岩层内部传播的地震波、火山碎屑物重力与惯性作用以及瞬时差异气压效应等3种作用。地震波由火山活动引发的浅源地震作用所引起,以近地表岩层为介质进行传播,与通常情况地震作用所引起的软沉积物变形构造的机制几乎相同;火山碎屑物重力作用主要由于火山碎屑自身重力与火山爆发作用给予的初始运动状态的惯性,对火山碎屑流堆积物的下伏地层造成侵蚀、剥蚀、差异压实等作用,导致了软沉积物变形构造的发育;瞬时差异气压效应主要是由于火山爆发时,近地表空气的压强产生瞬时的变化,一般地,高速运动的气体压强小于周边的压强,致使瞬时的压强不平衡,导致下伏未固结沉积物向上“涌动”,与沉积物本身重力共同作用,产生振动效应,而后火山碎屑流堆积并伴随地震波,共同导致了紧邻岩层软沉积物变形构造的发育。而究竟是以哪一种方式为主导,另外2种为辅助,则需要根据软沉积物变形构造发育岩层的位置以及软沉积物变形构造的具体类型判断。一般地,未紧邻岩层中的软沉积物变形构造主要由地震波触发;火山碎屑流堆积物中的软沉积物变形构造主要由火山碎屑物自身重力及惯性作用触发;紧邻岩层中的软沉积物变形构造,则先受差异气压作用的影响,导致未固结沉积物发生振动,而后遭受另2种方式叠加所触发。地震波触发方式与火山碎屑重力及惯性作用对软沉积物变形构造的影响已经较为清晰,而针对紧邻岩层中的软沉积物变形构造,其瞬间的气压失衡所导致地表未固结沉积物的振动效应,以及结合前2种方式共同作用的触发机制,仍需进一步研究。

5 结论与讨论

1) 灵山岛地区下白垩统发育大量软沉积物变形构造,但早白垩世早、晚时期软沉积物变形构造的触发机制有所不同,与莱阳期构造地震触发的滑塌作用相比,青山期主要为火山地震作用。通过对比两者的软沉积物变形构造类型、特征、规模等易知,滑塌作用与构造地震形成的软沉积物变形构造更为多样,且分布密度更大,而火山地震引起的软沉积物变形构造具有其独特的特点。

2) 灵山岛地区青山期火山地震所引起的(软)沉积物变形构造在火山地震影响的不同范围具有不同的类型与特征:近源发育较大型负载构造和挤入构造、火山地震落石构造、塑性砂岩团块包卷构造;中源主要发育负载构造、挤入构造、球—枕构造、枕状构造、泄水构造等,并且可见由于火山碎屑流高密度特性导致的差异压实作用所形成的负载构造;远源主要是弱的负载构造、挤入构造与泄水构造,以及远源的火山碎屑流堆积物液化形成的挤入构造。

3) 针对塑性砂岩团块包卷构造的研究,火山碎屑流高密度侵蚀作用是一个重要的触发机制。笔者认为高密度碎屑流(具有侵蚀作用)均有可能含有此类软沉积物变形构造。而对于火山地震而言,这种类型的沉积物变形是近源、近—中源过渡区域的典型变形构造,而对于其他高密度碎屑流存在区域的软沉积物变形构造的研究,侵蚀作用所致的塑性变形应予以充分的重视。

4) 火山碎屑流堆积物紧邻岩层中的软沉积物变形构造,其触发机制应由3种方式共同作用:地震波、火山碎屑物重力及惯性作用、瞬时差异气压效应。3种作用在火山地震软沉积物变形构造中的权重分配,一般取决于软沉积物变形构造发育层位与火山碎屑堆积层位的垂向相对位置关系,且仍需进一步研究。

致谢 此文献给冯增昭先生,感谢冯先生对我校地质学系研究工作一直以来的关注、帮助与支持,以及对我国沉积学做出的重大贡献,并对中国软沉积物变形构造研究者们一并致谢。祝贺第14届全国古地理学及沉积学学术会议圆满召开,祝愿中国沉积学蓬勃发展!

参考文献(References)

- 白志达,徐德斌,张秉良,张焘,卜景. 2006. 龙岗火山群第四纪爆破式火山作用类型与期次研究. 岩石学报, 22(6): 1473-1480. [Bai Z D, Xu D B, Zhang B L, Zhang T, Bu J. 2006. Study on type and phase of Quaternary explosive volcanism in Longgang volcanic cluster. Acta Petrologica Sinica, 22(6): 1473-1480]
- 曹光跃,薛怀民,王金光. 2014. 郯庐断裂山东段(胶东)中生代中酸性火山岩的锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 33(6): 1019-1038. [Cao G Y, Xue H M, Wang J G. 2014. Zircon U-Pb age and geochemistry of Mesozoic intermediate and acidic volcanic rocks from the Shandong segment (Jiaodong area) of

- the Tan-Lu fault. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 33(6): 1019-1038]
- 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物变形期次解析. *地质论评*, 59(6): 1060-1067. [Dong X P, Lü H B, Zhang X, Zhang H C, Wang J, Zhang S J. 2013. Stage analysis on the soft-sediment deformation in the Early Cretaceous Flysch, Lingshan Island, Shandong Province. *Geological Review*, 59(6): 1060-1067]
- 杜远生. 2011. 中国地震事件沉积研究的若干问题探讨. *古地理学报*, 13(6): 581-590. [Du Y S. 2011. Discussion about studies of earthquake event deposit in China. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 13(6): 581-590]
- 杜远生, 彭冰露, 韩欣. 2005. 广西北海涠洲岛晚更新世火山活动引起的地震同沉积变形构造. *沉积学报*, 23(2): 203-209. [Du Y S, Peng B X, Han X. 2005. Syn-depositional deformation structures by earthquake related to volcanic activity of the Late Pleistocene in Weizhou Island, Beihai City, Guangxi. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(2): 203-209]
- 冯增昭. 2013. *中国沉积学(第二版)*. 北京: 石油工业出版社, 507-579. [Feng Z Z. 2013. *Sedimentology of China(Second Edition)*. Beijing: Petroleum Industry Press, 507-579]
- 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. [He B Z, Qiao X F, Tian H S, Zhang Y X. 2012. Paleoequake events of Early Cretaceous Laiyang Stage and dinosaur migration in Zhucheng, Shandong Province, Eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 86(8): 1320-1330]
- 何碧竹, 乔秀夫, 许志琴, 焦存礼, 蔡志慧, 张英利, 苏德辰. 2010. 塔里木盆地满加尔坳陷及周缘晚奥陶世古地震记录及其地质意义. *地质学报*, 84(12): 1805-1816. [He B Z, Qiao X F, Xu Z Q, Jiao C L, Cai Z H, Zhang Y L, Su D C. 2010. Late Ordovician paleoseismic records of the Manjiaer Depression and adjacent areas in Tarim Basin, Xinjiang, and its geologic significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(12): 1805-1816]
- 匡永生, 庞崇进, 罗震宇, 洪路兵, 钟玉婷, 邱华宁, 徐义刚. 2012. 胶东青山群基性火山岩的 Ar-Ar 年代学和地球化学特征: 对华北克拉通破坏过程的启示. *岩石学报*, 28(4): 1073-1091. [Kuang Y S, Pang C J, Luo Z Y, Hong L B, Zhong Y T, Qiu H N, Xu Y G. 2012. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology and geochemistry of mafic rocks from Qingshan Group, Jiaodong area: Implications for the destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1073-1091]
- 栾光忠, 李安龙, 王建, 李甘, 谢汝吉. 2010. 青岛主要海岛成因分类及其地质环境分析. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 40(8): 111-116. [Luang G Z, Li A L, Wang J, Li G, Xie R J. 2010. The geological origin division of the main sea island in Qingdao area and environment analysis. *Periodical of Ocean University of China*, 40(8): 111-116]
- 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. [Lü H B, Wang J, Zhang H C. 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]
- 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: 答钟建华教授. *地质论评*, 59(1): 11-14. [Lü H B, Zhang H C, Wang J, Zhang S J, Dong X P, Zhang X. 2013. The Early Cretaceous flysch found in the Lingshan Island: Not deltaic deposits on land: A reply to the argument from Professor ZHONG Jianhua. *Geological Review*, 59(1): 11-14]
- 乔秀夫, 郭宪璞. 2011. 新疆西南天山山下侏罗统软沉积物变形研究. *地质论评*, 57(6): 761-769. [Qiao X F, Guo X P. 2011. On the Lower Jurassic soft sediment deformation of southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, China. *Geological Review*, 57(6): 761-769]
- 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. [Qiao X F, Li H B. 2008. Pillow, ball-and-pillow structures: Paleo-seismic records within strata. *Geological Review*, 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): 593-610. [Qiao X F, Li H B. 2009. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 11(6): 593-610]
- 邵珠福, 钟建华, 李勇, 毛鑫, 刘圣鑫, 倪良田, 田媛, 刘云田, 崔新颖, 王晓楠, 李伟华, 林刚山. 2014. 青岛灵山岛纹层控制的砂级颗粒支撑叠瓦构造的发现及其意义. *中国科学: 地球科学*, 44(8): 1761-1776. [Shao Z F, Zhong J H, Li Y, Mao C, Liu S X, Ni L T, Tian Y, Liu Y T, Cui X Y, Wang X N, Li W H, Lin G S. 2014. Characteristics and sedimentary processes of lamina-controlled sand-particle imbricate structure in deposits on Lingshan Island, Qingdao, China. *Scientia Sinica Terrae*, 44(8): 1761-1776]
- 宋天锐, 刘燕学. 2009. 古地震记录与岩相古地理. *沉积学报*, 27(5): 872-879. [Song T R, Liu Y X. 2009. Ancient earthquake records and litho-paleogeography. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 872-879]
- 孙善平, 刘永顺, 钟蓉, 白志达, 李家振, 魏海泉, 朱勤文. 2001. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 313-317. [Sun S P, Liu Y S, Zhong R, Bai Z D, Li J Z, Wei H Q, Zhu Q W. 2001. Classification of pyroclastic rocks and trend of volcanic sedimentology: A review. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 20(3): 313-317]
- 王安东. 2013. 山东东部晚中生代地层软沉积物变形构造研究. 中国石油大学(华东) 博士论文. [Wang A D. 2013. Research on Soft-sediment Deformation Structures in Late Mesozoic strata of eastern Shandong Province. Doctoral Dissertation of China University of Petroleum (East China)]
- 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): 717-728. [Wang A D, Zhou Y Q, Yan H, Wang R, Zhang Z K, Wang Z Y. 2013. Characteristics of soft sediments structures of the Early Cretaceous in Lingshan Island of Shandong Province. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 15(5): 717-728]
- 王安东, 周瑶琪, 张振凯, 于姗姗, 王子阳. 2014. 山东灵山岛莱阳群水下非构造裂缝特征及意义. *地球学报*, 35(3): 321-328.

- [Wang A D ,Zhou Y Q ,Zhang Z K ,Yu S S ,Wang Z Y. 2014. Characteristics and significance of underwater non-tectonic cracks in Lingshan Group of Lingshan Island ,Shandong Province. *Acta Geoscientia Sinica* ,35(3) : 321-328]
- 王国栋 程日辉 王璞珺 高有峰. 2010. 松辽盆地青山口组震积岩的特征、成因及其构造—火山事件. *岩石学报* ,26(1) : 121-129. [Wang G D ,Cheng R H ,Wang P J ,Gao Y F. 2010. Coniacian seismites: Structure ,sequence and volcanogenic origin of Qingshankou Formation in the Cretaceous Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica* ,26(1) : 121-129]
- 谢家莹. 1994. 火山碎屑流与火山碎屑流堆积. *火山地质与矿产* ,15(3) : 53-54. [Xie J Y. 1994. Pyroclastic flow and pyroclastic flow deposits. *Volcanology & Mineral Resources* ,15(3) : 53-54]
- 杨剑萍 聂玲玲 杨君. 2008. 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. *沉积学报* ,26(6) : 967-974. [Yang J P ,Nie L L ,Yang J. 2008. Soft-sediment deformation structures of Neogene related to earthquake and its geological significance in the southwestern margin of Qaidam Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* ,26(6) : 967-974]
- 袁静 陈鑫 田洪水. 2006. 济阳拗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. [Yuan J ,Chen X ,Tian H S. 2006. Formation of loop bedding in Jiyang Sub-basin Paleogene. *Acta Sedimentologica Sinica* ,24(5) : 666-671]
- 赵波. 2010. 长白山天池火山千年大喷发火山碎屑流相模式及灾害区划研究. 中国地震局地质研究所博士论文. [Zhao B. 2010. Characteristics of Pyroclastic-flow Facies in Millennium Eruption and Study on Pyroclastic-flow Hazard Zonation in Tianchi Volcano , Changbai Mountains. Doctoral Dissertation of Institute of Geology , China Earthquake Administration]
- 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. [Zhong J H. 2012. Lingshan Island Mesozoic sedimentary rocks in deep water far source turbidite or continental delta deposits? A discussion with Professor Lü Hongbo. *Geological Review* ,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) : 381-398. [Zhong J H ,Ni L T ,Shao Z F ,Li Y ,Liu X ,Mao C ,Liu S X ,Sun N L ,Chen B ,Wang K ,Luo K ,Wang S J ,Liu C ,Liu B ,Xiong Z Q. 2016. Tempestites and storm deposits in the Lower Cretaceous from Lingshan Island ,Qingdao. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)* ,18(3) : 381-398]
- 周瑶琪 张振凯 梁文栋 李素 岳会雯. 2015a. 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. [Zhou Y Q ,Zhang Z K ,Liang W D ,Li S ,Yue H W. 2015a. Late Mesozoic tectono-magmatic activities and prototype basin restoration in eastern Shandong Province ,China. *Earth Science Frontiers* ,22(1) : 137-156]
- 周瑶琪 张振凯 许红 王安东 魏凯 张云翠 王子阳 李斗 陈阳子 刘扬 于姗姗 高晓军. 2015b. 灵山岛沉积物软变形构造特征. *海洋地质前沿* ,31(4) : 42-54. [Zhou Y Q ,Zhang Z K ,Xu H ,Wang A D ,Wei K ,Zhang Y C ,Wang Z Y ,Li D ,Chen Y Z ,Liu Y ,Yu S S ,Gao X J. 2015b. Soft-sediment deformation structure in the sediments at Lingshan Island. *Marine Geology Frontiers* ,31(4) : 42-54]
- Allen J R L. 1982. Sedimentary structures ,their character and physical basis. *Earth Science Reviews* ,19(4) : 362-363.
- Basilone L ,Lena G ,Gasparo-Morticelli M. 2014. Synsedimentary-tectonic soft-sediment deformation and volcanism in the rifted Tethyan margin from the upper Triassic-middle Jurassic deep-water carbonates in central Sicily. *Sedimentary Geology* ,308(7) : 63-79.
- He B Z ,Qiao X F. 2015. Advances and overview of the study on paleo-earthquake events: A review of seismites. *Acta Geologica Sinica* ,89(5) : 1702-1746.
- Dorono D M ,Dellino P. 2013. Hydraulics of subaqueous ash flows as deduced from their deposits: 2. Water entrainment ,sedimentation and deposition ,with implications on pyroclastic density current deposit emplacement. *Journal of Volcanology & Geothermal Research* ,258(3) : 176-186.
- Jurado-Chichay Z ,Walker G P L. 2000. Stratigraphy and dispersal of the mangaone subgroup pyroclastic deposits ,okataina volcanic centre , New Zealand. *Journal of Volcanology & Geothermal Research* ,104(1) : 319-380.
- Montenat C ,Barrier P ,d'Estevou P O ,Hibsch. 2007. Seismites: An attempt at critical analysis and classification. *Sedimentary Geology* ,196(1-4) : 5-30.
- Owen G ,Moretti M ,Alfaro P. 2011. Recognizing triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions. *Sedimentary Geology* ,235(3-4) : 133-140.
- Robertson A. 1998. Rift-related sedimentation and volcanism of the north-Indian margin inferred from a Permian-Triassic exotic block at lamayuru ,indus suture zone(Ladakh Himalaya) and regional comparisons. *Journal of Asian Earth Sciences* ,16(2) : 159-172.
- Shanmugam. 2016. The seimite problem. *Journal of Palaeogeography* ,5(4) : 318-362.
- Zhou Y Q ,Peng T M ,Zhou T F ,Zhang Z K ,Tian H ,Liang W D ,Yu T ,Sun L F. 2017. Soft-sediment deformation structures related to volcanic earthquakes of the Lower Cretaceous Qingshan Group in Lingshan Island ,Shandong Province ,East China. *Journal of Palaeogeography* ,6(2) : 162-181.
- Zobin V M. 2003. *Introduction to Volcanic Seismology*. Elsevier: 93-113.

(责任编辑 张西娟)