

北京大学学报(自然科学版)  
Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis  
doi: 10.13209/j.0479-8023.2015.076

# 灵山岛早白垩世构造应力解析及区域地质意义

李杰<sup>1</sup> 金爱文<sup>2,†</sup> 侯贵廷<sup>1,†</sup> 付文昭<sup>2</sup> 杨志强<sup>2</sup>

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590; † 通信作者, E-mail: jawaa@163.com (金爱文), gthou@pku.edu.cn (侯贵廷)

**摘要** 通过对灵山岛野外地质考察及总结前人资料, 并利用节理、岩墙和褶皱等应力感应构造的测量分析, 得出研究区早白垩世可能存在四期构造作用: 莱阳期 NW 向伸展形成近海盆地, 莱阳期末期 NW 向挤压反转作用, 青山期 NW 向伸展裂谷作用和早白垩世末期 NW 向挤压反转。灵山岛早白垩世两期伸展作用可能是分别对华北地区增厚地壳或岩石圈重力垮塌和岩石圈拆沉的响应, 而两期挤压反转作用可能是研究区由伊泽奈崎板块 NW 向俯冲消减向太平洋板块 NW 向俯冲过渡的结果。

**关键词** 灵山岛; 早白垩世; 最大主压应力; 构造演化; 动力学机制

**中图分类号** P553

## Study on Early Cretaceous Stress Fields and Geological Significance of Lingshan Island

LI Jie<sup>1</sup>, JIN Aiwen<sup>2,†</sup>, HOU Guiting<sup>1,†</sup>, FU Wenzhao<sup>2</sup>, YANG Zhiqiang<sup>2</sup>

1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590; † Corresponding author, E-mail: jawaa@163.com (JIN Aiwen), gthou@pku.edu.cn (HOU Guiting)

**Abstract** Four periods of structural stress fields can be recognized during Early Cretaceous in Lingshan Island and adjacent areas based on field geological investigation and summary of the previous data, which is derived from the occurrence data of the stress response structures, i.e., X-type shear jointing, dykes and folds. They are the tectonic stress period of extension in the direction of NW formed the offshore basins during the Laiyang stage, followed extrusion in the direction of NW in the late Laiyang stage, during the Qingshan stage further extension in the direction of NW turned the offshore basins into rift basins, and followed basin inversion in the direction of NW in the late Early Cretaceous. It is concluded that the two extensional phases in Early Cretaceous were dynamically associated with either gravity collapse or lithospheric delamination of the thickened crust or lithosphere in North China and the NW-SE extrusion records the effect by the transmission of the NW-directed subduction of Izaanqi plate to the NW-directed subduction of paleo Pacific plate towards the bottom of the Asian continent.

**Key words** Lingshan Island; Early Cretaceous; maximum principal stress; tectonic evolution; dynamic mechanism

沉积盆地的演化是区域应力场作用的结果。由于地球动力背景的差异, 盆地在不同的发育阶段必然经历不同的区域应力场。因此, 研究沉积盆地区域应力场的性质及其转变, 对于认识盆地形成与演

化过程中受力状态及其成因有着重要的意义。

近年来, 随着吕洪波等<sup>[1]</sup>首次报道在灵山岛地区观测到中生代滑塌沉积层, 并且认为该套地层属于远源浊积岩, 灵山岛逐渐成为地质学研究热点地

中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2014A-0213)资助  
收稿日期: 2014-09-23; 修回日期: 2015-02-05; 网络出版时间: 2015-09-23 09:43:45

区<sup>[2-6]</sup>。吕洪波等<sup>[1-2]</sup>观测并描述了灵山岛中生代滑塌沉积内的相关同沉积构造特征及其地质意义。钟建华<sup>[3]</sup>针对吕洪波等观测描述的同沉积构造现象,在沉积相方面进行了进一步的探讨。张海春等<sup>[4]</sup>对这套地层进行了地层对比,并提出建立灵山岛组地层的建议。王安东等<sup>[5]</sup>观测并描述了灵山岛早白垩世软沉积变形构造特征,并对滑塌体的形成阶段进行了相关探讨。周瑶琪等<sup>[6]</sup>通过对灵山岛地区及山东东部近海地区地层沉积特征、区域重磁电资料等的研究,提出“山东东部晚中生代近海裂陷槽盆地”,认为灵山岛地区是“山东东部晚中生代近海裂陷槽盆地”的一部分。

由于目前观测到的地质证据有限且内容多集中于沉积学研究,在应力解析和构造演化等方面还有待进一步考察。本文通过灵山岛野外考察测量和构造解析,研究该地区的共轭节理、褶皱和岩墙的几何形态及其配置关系,对灵山岛构造应力场进行分析,并结合相关地质资料对该地区的早白垩世构造演化过程进行初步探讨。

灵山岛地区及其所在的“山东东部晚中生代近海裂陷槽盆地”的整体演化及其相关地质过程,可能与灵山岛周围的区域构造演化及东亚地区板块构造运动相关。对该地区应力场的分析,既有助于了解灵山岛地区及其所在盆地的演变过程及动力学成因,也有助于揭示中国东部晚中生代以来地球动力学的演变规律及其构造响应。

## 1 区域地质特征

灵山岛位于山东省胶州湾海域(120°10'00"E, 35°45'48"N),西临灵山湾,与大陆最近距离为 10.5 km,海岛总面积为 7.66 km<sup>2</sup>,海拔 513.6 m,是北方第一高岛。该岛位于灵山岛凹陷内,西北侧因胶南隆起与胶莱盆地相隔,东南侧为千里岩隆起,并位于苏鲁造山带这条重要的造山带中<sup>[1]</sup>。周瑶琪等<sup>[6]</sup>认为灵山岛地区是“山东东部晚中生代近海裂陷槽盆地”的一部分(图 1)。

海岛长轴呈 NNE 走向,构造线展布(山脊、线状支沟、海岸线以及陡坎等)也呈 NNE 向<sup>[7]</sup>。栾光忠等<sup>[8]</sup>认为,由于构造挤压,造成岩层倾斜,进而形成岩层 NW 向倾斜的单面山型海岛。地层走向为 NNE 方向,且被一系列 NWW 向张性断裂及 NNW 与 NEE 向共轭断裂构造切割。此外,岛上出露的早白垩世地层中,发育一系列垂直于岩层层面

的共轭剪节理。

山东省地质图显示,灵山岛地层自下而上主要为下白垩统莱阳群法家莹组(K<sub>1</sub>f)沉积岩、青山群八亩地组(K<sub>1</sub>b)火山碎屑岩<sup>[9]</sup>。张海春等<sup>[4]</sup>认为,灵山岛地区这套原来被认定为莱阳群的地层实际上为一套海相沉积,并将其命名为灵山岛组(K<sub>1</sub>l)。吕洪波等<sup>[1-2]</sup>认为这套地层为深海相、残余洋盆性质的沉积。钟建华<sup>[3]</sup>认为灵山岛地层是陆内三角洲环境的沉积。

野外观测中,自下而上见莱阳群厚层类复理石沉积(夹有含砾砂岩层),其上不整合覆盖青山群流纹岩构成的山体,流纹岩之上为一套含砾砂岩层。在修船厂、老虎嘴以及背来石三处,灵山岛底部出露地层为巨厚层类复理石沉积(图 2(a)),砂页岩互层明显,但不能因此认定其为海相沉积,因为深湖相也可能形成厚层类复理石沉积。该类复理石沉积层内发育滑塌褶皱及其他软沉积变形。吕洪波等<sup>[1]</sup>在对灵山岛的初探中,在下伏砂、页岩地层中发现大量同沉积变形构造,认为这些同沉积变形构造是滑塌沉积的结果(图 2(b))。

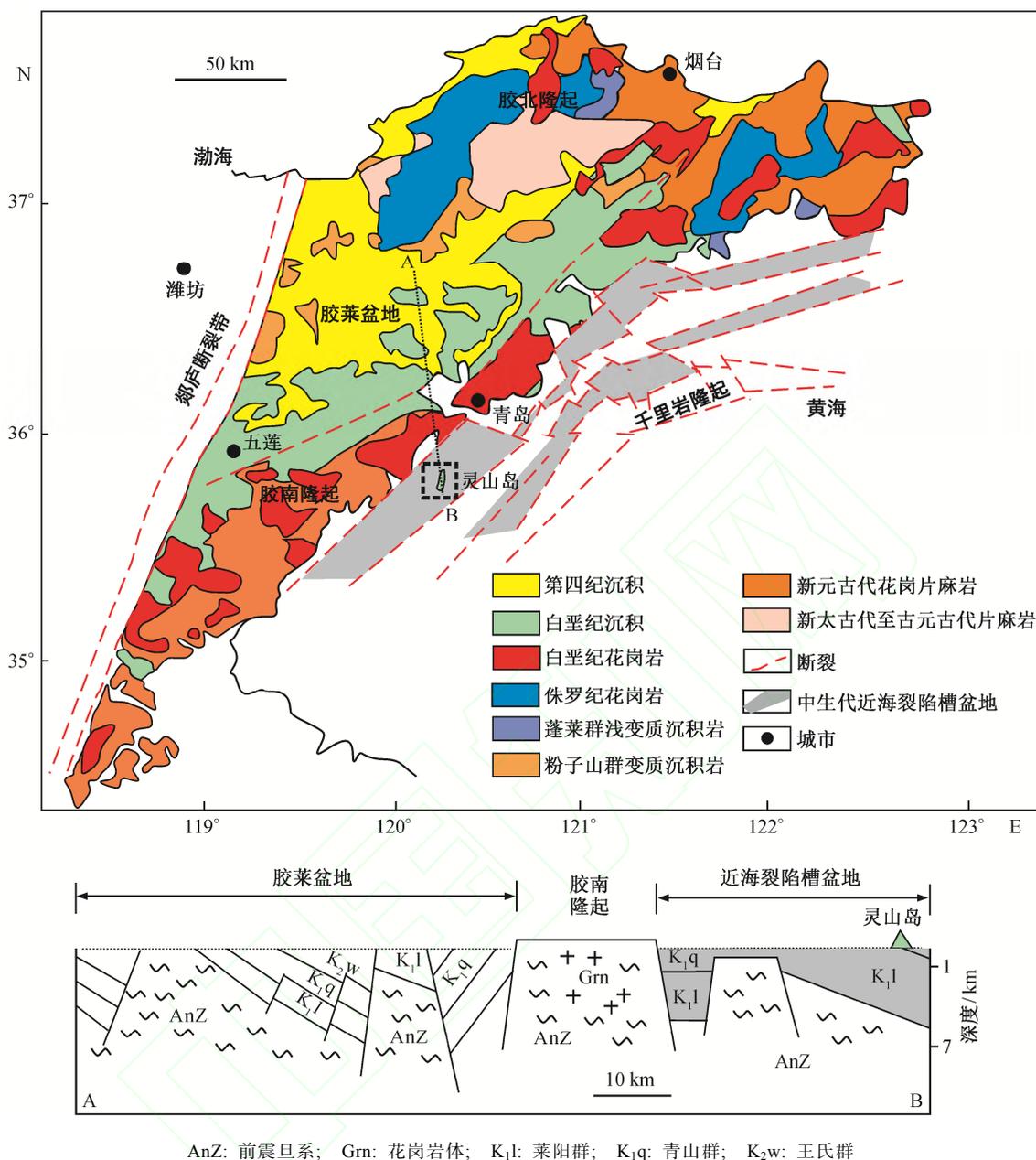
我们在灵山岛老虎嘴景点下方 10 m 处的类复理石沉积层中发现软沉积变形的含砾砂岩层(图 2(c)和(d)),厚度达到 6~10 m,砾石分选磨圆较差。这套类复理石沉积中含砾砂岩层的存在表明不可能为深海环境成因,可能为冲积扇相。

这套类复理石之上为青山群八亩地组(K<sub>1</sub>b)流纹岩,二者之间不整合接触(图 2(e))。流纹岩之上为一套含砾砂岩层,修船厂至老虎嘴沿途可见该含砾砂岩层的滑塌体,滑塌体内含流纹岩碎屑颗粒(图 2(f))。

## 2 晚中生代构造应力场解析

古构造应力场的恢复,关键是确定古构造应力场的方向。通过野外观测构造变形特征(包括共轭节理、褶皱、断层、岩墙等应力感应构造)来反推岩石变形时的应力状态,是对研究区构造应力解析的最基本方式<sup>[10-11]</sup>。灵山岛地区出露的早白垩世地层中发育上述应力感应构造,通过构造测量可以获得应力感应数据(表 1)。

野外观测中,对修船厂附近晚中生代地层发育的褶皱和 X 型共轭剪节理,以及背来石附近的节理和岩墙等构造的产状进行了详细测量(图 3)。利用节理玫瑰花图和走向等密图等方法对节理的实测数



AnZ: 前震旦系; Grn: 花岗岩体; K<sub>1</sub>l: 莱阳群; K<sub>1</sub>q: 青山群; K<sub>2</sub>w: 王氏群

图 1 灵山岛及其附近地质简图(据文献[6]修改)

Fig. 1 Simple geologic map of Lingshan Island and its adjacent area (modified after Ref. [6])

据进行统计分析, 利用褶皱  $\beta$  图解对褶皱枢纽和轴面信息进行统计分析, 并梳理各应力感应构造间的配置关系及发育期次。我们认为, 莱阳群类复理石中 X 型共轭剪节理的发育是该期 NW-SE 向挤压的结果。对滑塌褶皱的应力感应数据测量虽然指示滑塌挤压应力方向与 NW-SE 向一致, 但并非区域应力场直接作用的结果。此外, 背来石处 NE50° 方向延伸的岩墙及其邻区近 NE-SW 向延伸的岩墙统计

结果<sup>[6,12-13]</sup>指示青山期 NW-SE 向的伸展背景。通过以上研究, 我们恢复了该区晚中生代地层中变形构造所反映的构造应力场(图 4)。

## 2.1 节理应力解析

受区域构造应力场的影响, 研究区修船厂附近出露的下白垩统莱阳群类复理石地层中发育一套区域性共轭剪节理(图 3(a))。与董晓朋等<sup>[14]</sup>在滑塌褶皱砂层中发现的由重力作用形成的滑塌后微地堑和



(a) 老虎嘴景点砂页岩互层; (b) 修船厂滑塌褶皱; (c)和(d) 老虎嘴景点复理石中含砾砂岩层; (e) 老虎嘴景点附近流纹岩、砂页岩层不整合界限; (f) 含砾砂岩滑塌体

图 2 灵山岛出露地层地质现象

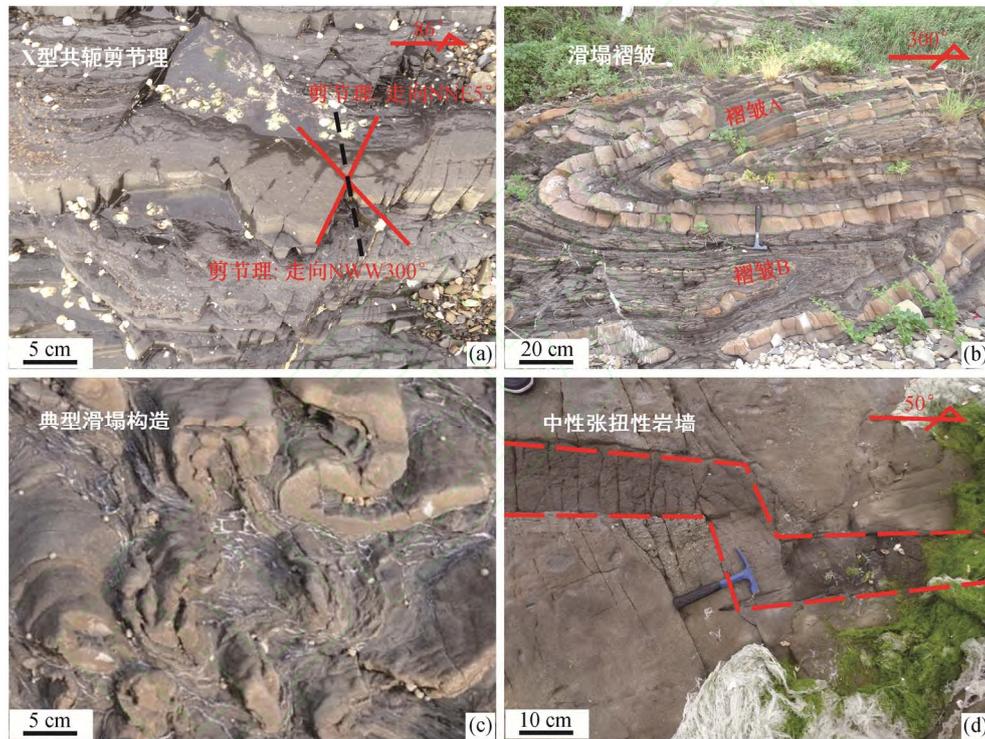
Fig. 2 Lingshan Island exposed geological phenomenon

微地垒组合不同的是, 这套区域性共轭剪节理垂直于莱阳群类复理石岩层发育, 且在滑塌层下发育明显, 为典型的早期平面 X 型共轭剪节理。根据吕洪波<sup>[15]</sup>对鲁西古生代碳酸盐中垂直缝合线的研究, 垂直缝合线可以借助于早期平面 X 剪节理发育, 并通常发育于成岩过程中, 因此可以判断: 早期平面 X 剪节理在沉积岩成岩过程中即可发育。此外, 滑塌褶皱是在这套类复理石岩层发生倾斜, 形成 SE 高、NW 低的地形条件下滑脱发育的。因此, 我们推测这套早期 X 型共轭剪节理是在莱阳期类复理石岩层开始成岩到岩层发生倾斜并导致滑塌褶皱发

育之间的时间段遭受挤压并形成。根据库仑破裂准则, 共轭节理所夹锐角的平分线与最大主压应力方向一致。我们利用野外观测数据, 得到这套共轭剪节理的等密图(图 4)。根据等密图分析, 这组共轭剪节理的优势走向为 NNE5°和 NWW300°。这两个优势方位的夹角平分线指示最大主压应力方向为 NW-SE 向, 即研究区莱阳期遭受 NW337°向的挤压, 与分析推断的所受最大主压应力方向一致, 说明莱阳期灵山岛地区曾遭受 NW-SE 向短暂挤压应力场的影响。结合整个华北地区该时期区域应力场背景, 我们认为可能是莱阳期末的短暂构造反转作用。

表 1 灵山岛地区构造要素统计  
Table 1 Statistical information of Lingshan Island structural deformation elements

构造样式	样号	地理坐标	层位	测量个数	平均产状	年龄/Ma	岩性
X 型共轭 剪节理	第 1 组	35°45'33"N, 120°09'24"E	K <sub>1</sub> l	166	275°∠64°		
	第 2 组				30°∠81°		
滑塌褶皱	褶皱 A	35°45'33"N, 120°09'24"E	K <sub>1</sub> l	20	两翼: 123°∠18°, 150°∠24°		
	褶皱 B				两翼: 107°∠23°, 150°∠24°		
岩墙	Y1	35°47'03"N, 120°10'31"E	K <sub>1</sub> l	4	走向: 50°	90~140 <sup>[12]</sup>	闪长玢岩
	Y2	35°23'47"N, 119°33'33"E <sup>[6]</sup>	变质岩		走向: 45° <sup>[6]</sup>	90~140 <sup>[12]</sup>	辉绿岩
	Y3	36°33'39"N, 120°57'11"E	K <sub>1</sub> l		走向: 48° <sup>[6]</sup>	90~140 <sup>[12]</sup>	辉绿岩
	Y4	35°48'24"N, 121°09'10"E <sup>[6]</sup>	花岗岩		走向: 40° <sup>[6]</sup>	90~140 <sup>[12]</sup>	辉绿岩



(a) 修船厂类复理石沉积地层内早期 X 型共轭剪节理; (b)和(c) 修船厂滑塌褶皱; (d) 背来石处中性张扭性岩墙

图 3 灵山岛野外构造现象

Fig. 3 Lingshan Island exposed structural phenomenon

## 2.2 同沉积滑塌褶皱分析

研究区多处可见大型褶皱, 在灵山岛西侧修船厂附近尤为明显。褶皱规模差异较大, 数十厘米至数米不等。褶皱内岩层主要由砂岩层与较软弱的页岩层互层组成, 其中砂岩多为钙质胶结, 页岩多为碳质。对于其成因, 一般认为由滑塌形成, 但对于其沉积相仍存在较大争议<sup>[3,16]</sup>。

研究区内滑塌褶皱虽然规模差别较大, 但岩性组成及产状基本上一致。在修船厂附近观测到滑塌褶皱(图 3(b)和(c)), 对该褶皱进行应力分析并做褶皱  $\beta$  图解(图 4), 求得褶皱枢纽为 NE-SW 方向, 轴面倾向为 SE 向, 与吕洪波等<sup>[1]</sup>观测一致, 指示 SE-NW 向的滑塌应力状态。

对褶皱的解析表明, 该套褶皱主要向 NW 向滑

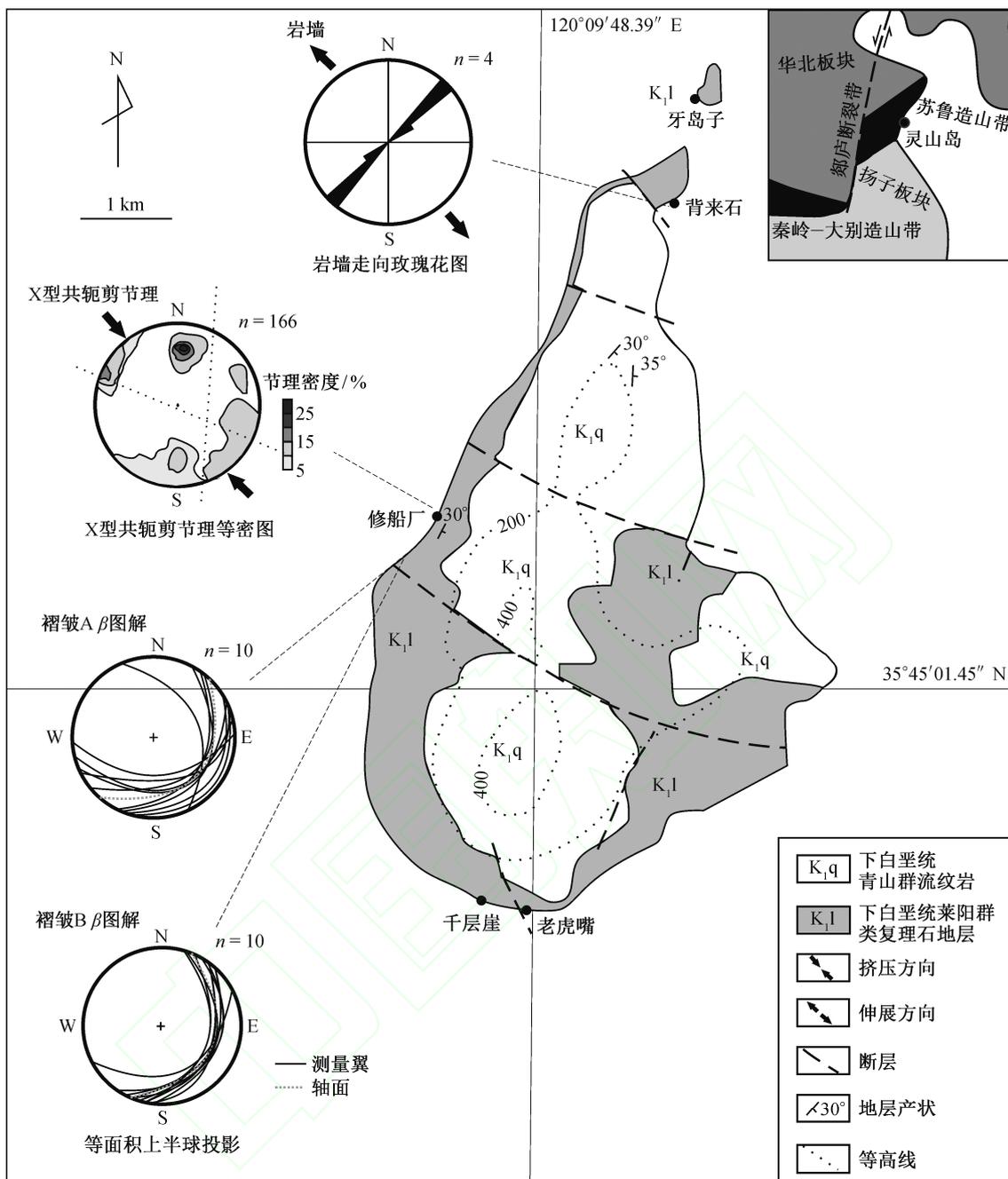


图 4 灵山岛变形构造应力解析图(部分数据来自文献[8])

Fig. 4 Lingshan Island structural deformation stress analysis diagram (part of the data from Ref. [8])

塌,与区域最大主压应力方向基本上一致。然而作为同沉积变形构造,滑塌褶皱是半成岩软弱层间滑脱的结果,其直接影响因素是倾斜的地形,而非构造作用。如前所述,莱阳期类复理石地层发生倾斜的时间,应与上述 X 型共轭剪节理发育的时间同期或略晚。正是由于 X 型共轭剪节理指示的 NW-SE 向挤压,使得这套类复理石岩层发生向 NW 的倾斜,其后在重力作用或地震事件的影响下,较软

的页岩层在较硬的砂岩层之间发生层间滑脱,形成滑塌褶皱。因此,滑塌褶皱的测量结果虽然不能直接指示该期主应力方向,但可以说明滑塌褶皱与岩层倾斜前 NW-SE 向的挤压有密切关系,是莱阳期遭受 NW-SE 向短暂挤压后发生地层倾斜和层间滑塌的结果。

在莱阳期末 NW-SE 向的挤压应力场下,莱阳群地层中发育一套 X 型共轭剪节理。在该应力场

的持续挤压下,岩层发生倾斜,产生南东高、北西低的地形条件,导致滑塌褶皱的发育。

### 2.3 岩墙应力解析

岩墙作为区域性的构造节理系统,其几何形态是由岩墙侵位前的先存节理形态和侵位的围岩应力状态决定的,反映岩墙侵位时古构造应力场作用下的脆性破裂<sup>[17]</sup>。岩墙群的形成过程,实际上是在一定的应力系统作用下形成的小节理或薄弱面,后期继承扩展成为大节理群,随后岩浆侵位到这些先存的大节理群内形成岩墙群,其产状、展布以及与周围地质体的穿插切割关系,对于研究该地区的应力状态及区域演化具有重要意义。张剪性岩墙的发育,是剪切力偶作用的结果,根据其形成过程可以分析其应力方向。

我们在背来石景点发现一条张剪性闪长玢岩岩墙(图 3(d)),走向近 NE50°,长约数百米,近直立产状,侵位于晚白垩世莱阳群中,是中性岩浆侵入先存的构造裂缝中形成的闪长玢岩岩墙,在边界附近可见冷凝边与烘烤边。根据其产状和岩墙形成过程分析(图 5)可知,在区域性 NW-SE 向引张应力场下,围岩派生张应力状态,随着早期 NE 向先存的羽状剪节理内围压的降低以及空间的扩大,中性岩浆上升侵位并扩张,最终形成 NE 向岩墙。根据周瑶琪等<sup>[6]</sup>对山东东部近海地区岩墙(包括灵山岛地区的岩脉)的统计,单个岩墙走向大都为 NE 向。岩墙的形成年龄集中在 90 Ma<sup>[6,12-13]</sup>之前,且多侵入到早白垩世花岗岩(130~100 Ma)<sup>[18-22]</sup>及其附近的围岩中。根据这些岩墙与早白垩世侵入岩及其附近围岩之间的穿插切割关系,我们认为这些岩墙的形成晚于莱阳期(135~126 Ma)而早于青山群与王世群不整合接触反映的挤压反转阶段(106~91 Ma),形成于青山期(120~107 Ma)<sup>[23]</sup>。山东东部青山期整体遭受 NW-SE 向伸展<sup>[6,23-25]</sup>,与研究区岩墙推演的应力场

方向一致。因此,我们认为灵山岛岩墙发育于青山期 NW-SE 向伸展体制时期,岩墙的形成同时或略晚于羽状节理形成时间,灵山岛地区青山期应力状态以 NW-SE 向的伸展为主。

## 3 区域构造应力场演化

通过野外测量结果及前人研究成果<sup>[6,23-25]</sup>综合分析,我们认为研究区晚中生代早白垩世构造应力场主要分为两次伸展和两次挤压,两次伸展在胶莱盆地及灵山岛所在的山东东部晚中生代近海裂陷盆地中形成两套沉积序列,分别为莱阳群(135~126 Ma)和青山群(120~107 Ma),代表该近海裂陷盆地的两期断陷阶段。

依据灵山岛地区获得的应力感应数据,结合灵山岛邻区胶莱盆地的构造演化,可以较为清晰地划分研究区早白垩世的构造演化阶段(图 6)。

1) 莱阳期。可能由于苏鲁造山带增厚地壳或岩石圈的重力垮塌<sup>[23]</sup>,垂直于苏鲁造山带展布方向产生 NW-SE 向区域性伸展。在该伸展作用下,发育形成胶莱盆地和山东东部近海裂陷盆地,从而形成 NW-SE 向展布的狭长裂陷槽。胶莱盆地内莱阳群地层 NE-SW 向展布的特点可以作为该期伸展的佐证。

2) 莱阳期末期。由于胶莱盆地和山东东部裂陷盆地仍处在伊泽奈崎板块近 NW 向的俯冲体制下<sup>[26]</sup>,因此在莱阳群地层中发育垂直于岩层发育的 X 型共轭剪节理,并形成大规模的滑塌褶皱。对灵山岛莱阳群类复理石沉积中的早期 X 型共轭剪节理进行应力场恢复,其结果指示的最大主压应力方向为 NW-SE 向,与伊泽奈崎板块俯冲方向一致,反映莱阳期末这些近海裂陷槽发生近 NW-SE 向的挤压反转。

3) 青山期。可能作为对岩石圈地幔拆沉作

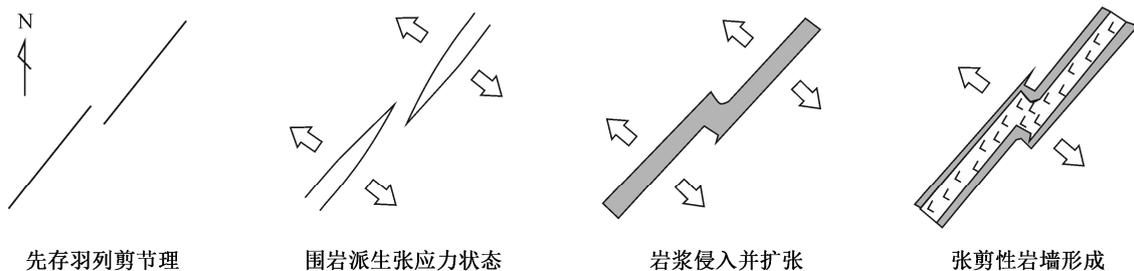


图 5 张剪性岩墙成因机制(据文献[17]修改)

Fig. 5 Tensile shear dyke formation mechanism (modified after Ref. [17])

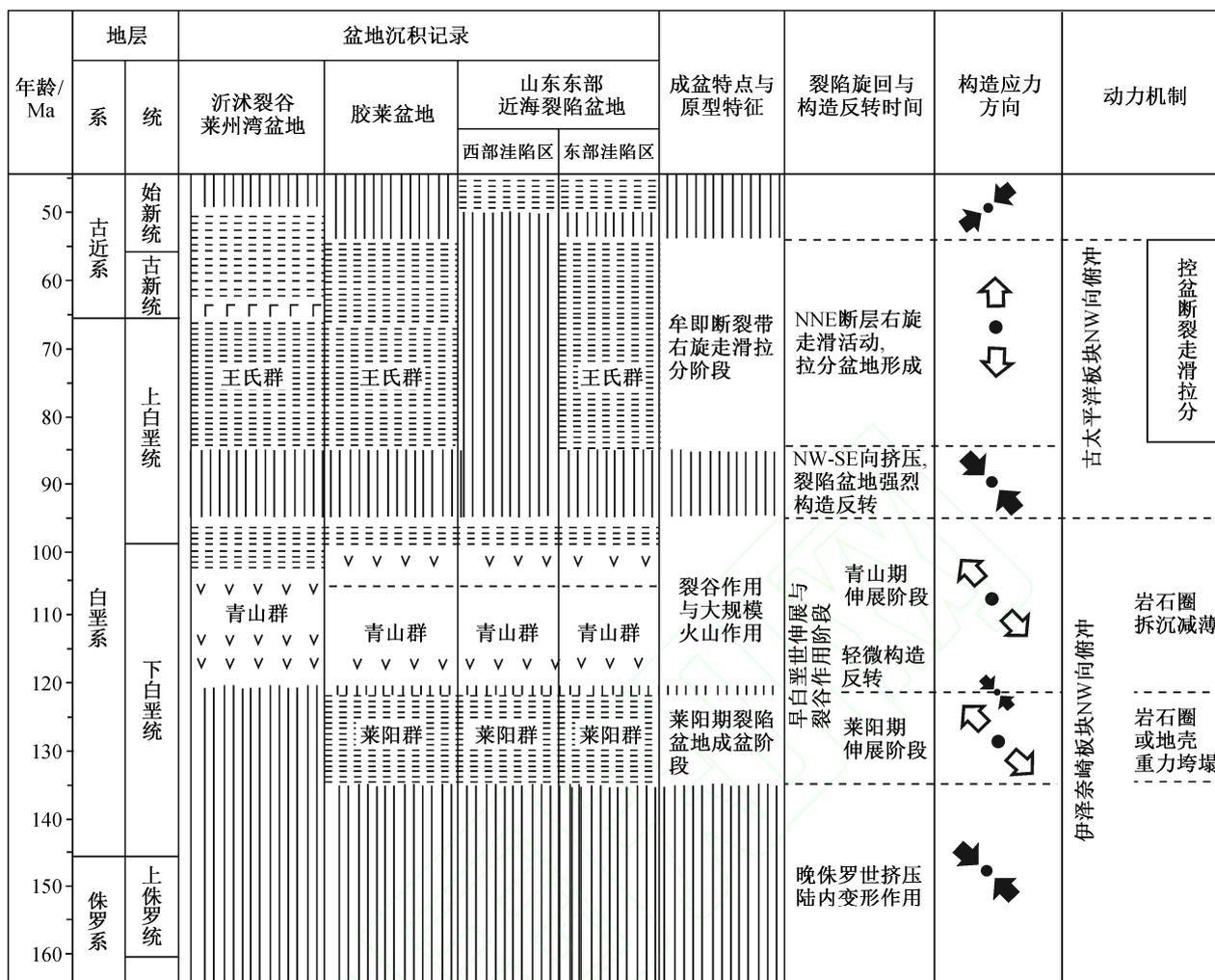


图 6 山东东部近海裂陷盆地及其邻区沉积-构造-岩浆演化序列(据文献[6]修改)

Fig. 6 A synthesis of tectono-sedimentary magmatic evolution of the offshore rift basin and the contiguous area (after Ref. [6])

用或岩石圈地幔消失导致的岩石圈减薄作用的响应<sup>[22]</sup>, 山东东部地区受近 NW-SE 向至 NWW-SEE 向的伸展作用, 胶莱盆地与山东东部近海盆地进一步演化成为裂谷盆地。山东东部地区大量该期 NE-SW 向延伸的单体岩墙, 正是在 NW-SE 向伸展体制下形成的。

4) 早白垩世末期。由于伊泽奈崎板块已经运动到东亚东北部边缘并转为正向俯冲, 太平洋板块出现在中国东部大陆边缘, 表现为 NW 向俯冲<sup>[25]</sup>, 整个山东东部强烈隆升, 胶莱盆地及研究区遭受剥蚀。

#### 4 结论

1) 通过野外地质考察和综合前人资料, 可将

灵山岛早白垩世构造应力场分为四期: 莱阳期 NW-SE 向伸展, 莱阳期末期 NW-SE 向挤压, 青山期 NW-SE 向伸展, 早白垩世末 NW-SE 向挤压。

2) 这四期构造应力场的产生对应的动力学背景分别为: 莱阳期伸展是受苏鲁造山带增厚地壳或岩石圈的重力垮塌的影响, 莱阳期末期挤压与伊泽奈崎板块近 NW 向的俯冲有关, 青山期伸展是拆沉作用或岩石圈减薄的响应, 早白垩世末挤压是太平洋板块 NW 向俯冲挤压的结果。

3) 灵山岛早白垩世构造应力场挤压伸缩体制的转变, 是研究区由伊泽奈崎板块 NW 向俯冲消减向太平洋板块 NW 向俯冲过渡和华北克拉通拆沉减薄共同作用的结果。

## 参考文献

- [1] 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. 地质学报, 2011, 85(6): 938-946
- [2] 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积岩块. 地质论评, 2012, 58(1): 80-81
- [3] 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?: 与吕洪波教授商榷. 地质论评, 2013, 58(6): 1180-1182
- [4] 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. 地层学杂志, 2013, 37(2): 216-222
- [5] 王安东, 周瑶琪, 闫华, 等. 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, 2013, 15(5): 717-728
- [6] 周瑶琪, 张振凯, 梁文栋, 等. 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, 2015, 22(1): 137-156
- [7] 刘忠敏, 李成治, 李本川, 等. 应用 TM 卫星像片对灵山岛地质构造及边坡稳定性的调查. 海洋科学, 1990(6): 35-38
- [8] 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. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(8): 111-116
- [9] 山东省第四地质矿产勘查院. 山东省区域地质. 济南: 山东省地图出版社, 2003
- [10] 万天丰. 古构造应力场. 北京: 地质出版社, 1988
- [11] 操成杰. 川西北地区构造应力场分析与应用[D]. 北京: 中国地质科学院, 2005
- [12] Liu S, Hu R Z, Zhao J H, et al. K-Ar geochronology of mesozoic mafic dikes in Shandong Province, Eastern China: implications for crustal extension. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(6): 1207-1213
- [13] Liu S, Hu R Z, Gao S, et al. Geochemical and isotopic constrains on the age and origin of mafic dikes from Shandong Province, Eastern North China Craton. *International Geology Review*, 2012, 54(12): 1389-1400
- [14] 董晓朋, 吕洪波, 张星, 等. 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, 2013, 59(6): 1060-1067
- [15] 吕洪波. 鲁西古生代碳酸盐岩中的垂直缝合线及其在华北板块构造演化中的意义. 地质评论, 2009, 55(4): 473-483
- [16] 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. 地质论评, 2013, 59(1): 11-14
- [17] 侯贵廷. 华北基性岩墙群. 北京: 科学出版社, 2012: 117-124
- [18] 常裕林, 郑小礼, 王晖. 胶东西北部玲珑、郭家岭超单元花岗岩成因探讨. 地质找矿论丛, 2006, 21(B10): 90-94
- [19] Goss S C, Wilde S A, Wu F, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton. *Lithos*, 2010, 120(3): 309-326
- [20] Yang Q Y, Santosh M, Shen J F, et al. Juvenile vs. recycled crust in NE China: zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and an integrated model for Mesozoic gold mineralization in the Jiaodong Peninsula. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1445-1468
- [21] 宋明春. 山东省大地构造格局和地质构造演化[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008: 117-126
- [22] Wang L, Qiu Y, McNaughton N J, et al. Constraints on crustal evolution and gold metallogeny in the Northeastern Jiaodong Peninsula, China, from SHRIMP U-Pb zircon studies of granitoids. *Ore Geology Reviews*, 1988, 13: 275-291
- [23] 张岳桥, 李金良, 张田, 等. 胶莱盆地及其邻区白垩纪-古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义. 地质学报, 2008, 82(9): 1229-1257
- [24] Zhang Y Q, Dong S W, Shi W. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, Eastern China. *Tectonophysics*, 2003, 363: 243-258
- [25] 张田, 张岳桥. 胶北隆起晚中生代构造-岩浆演化历史. 地质学报, 2008, 82(9): 1210-1228
- [26] 朱光, 王道轩, 刘国生, 等. 郯庐断裂的演化及其对西太平洋板块运动的响应. 地质科学, 2004, 39(1): 36-49