

流体迁移和海底地形与天然气水合物的形成

栾锡武^{1,2}, 李晓芸^{3,4}

(1 国土资源部 海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071; 2 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 4 中国科学院 海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071)

摘要:使用重力取样器、渔网、深潜器等手段,已经在海底及以下浅表层的区域采获天然气水合物样品,但关于浅表层水合物的发育机制、分布规律、与海底地形的关系等问题还缺乏基本认识。根据 2006 年鄂霍次克海天然气水合物调查航次的调查数据,发现萨哈林东北陆坡区,特别是中、下陆坡区发育大量海底凸起。这些凸起一般呈不对称的丘形,宽几百米,高几十米。与海底沙波、沙脊不同,海底凸起为孤立海底地形,在南北方向上并不连续。海底剖面仪结果清楚地显示古陆坡凸起的发育。现今海底陆坡凸起的幅度普遍地要小于古陆坡凸起的幅度,个别地方古今陆坡凸起的形态有所变化,但大部分古、今陆坡凸起是一一对应的,基本形态没有根本变化。在萨哈林陆坡地区存在两个方向的挤压应力场,分别是由德鲁根盆地向萨哈林陆坡方向的挤压应力场和萨哈林陆坡沿萨哈林走滑断裂向南的挤压应力场,海底陆坡凸起是这两大应力场复合作用的结果。浊反射区中的游离气是底辟构造中的超高压多相物质向上迁移形成的,浊反射区上方对应的海底凸起应该是宏观构造挤压和局部底辟发育叠合的结果,浊反射区上方的海底凸起,在形态等方面应该和其他仅由挤压构造原因形成的凸起有所区别,比如顶部发育裂口等。在底辟构造中,由于游离气体的向上迁移,在整个水合物稳定域中从下到上,直至海底都可能形成水合物。

关键词:浅表层水合物;海底地形;陆坡凸起;浊反射;鄂霍次克海

中图分类号:P736.2

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2012)02-0001-10

天然气水合物实质上是一种水包气的笼形物,主要形成于低温高压的环境中,外形似冰^[1]。石油工业最初关注这类物质是因为它有害于天然气的管道运输。目前,天然气水合物倍受关注则是因为其广泛的分布和丰富的甲烷储量^[2-4]。通过钻探^[5]、重力取样^[6]、渔网^[7]以及深潜^[8]等手段,人们已经在世界上多个地点采获了天然气水合物样品。按照天然气水合物样品产出的位置,我们可以把水合物分为两种,一种是埋深较大的水合物,一种是浅表层水合物。前者一般位于水合物稳定带较深的部位,如加拿大马更些三角洲的水合物^[9-10],经马利克钻井证实,水合物富集层位于地面以下 900~1 100 m,为该地区多道地震资料和温度测量资料所确定的水合物稳定域的底部;后者则位于水合物稳定域的上部,主要出产于海底或者海底以下很浅的位置。如加拿大太平洋地学中心的科学家报道了在加拿大温哥华岛外的陆坡区,使用商业渔网直接在海底拖采到上吨重的天然气水合物样品^[7];美国科学家和德国科

学家在俄勒冈外的海域使用深潜器和电视抓斗,直接在海底观测和采获天然气水合物样品^[11];同样的情况也发生在墨西哥湾 GC185 区块的布什山和大西洋刚果河口外的水合物坑^[12-13]。但直到目前,关于浅表层水合物的发育机制、分布规律、浅表层水合物与海底地形的关系、浅表层水合物与海底冷泉的关系,以及浅表层水合物与全球气候变化的关系等问题,也都缺少数据。本文根据 2006 年鄂霍次克海天然气水合物调查航次的调查数据,介绍浅表层天然气水合物区的流体迁移及海底地形特征,并进行相关讨论。

1 地质背景

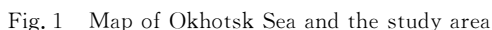
鄂霍次克海位于太平洋的西北角,千岛岛弧的内侧,其海域面积仅次于中国的南海,是西北太平洋大陆边缘中第二大边缘海(图 1)。鄂霍次克海大致呈菱形,其南北两边边长约 2 000 km,走向北东,东西两边边长约 1 700 km,走向南北,除南面的千岛岛弧外,其他三面都被高山环抱。山体高度一般超过 1 000 m,最高 3 621 m。这些高大山系为鄂霍次克海提供了丰富的沉积物来源。长期以来,大量沉积物通过河流、冰川、滑塌等方式从周边的高山输运

基金项目:国家自然科学基金项目(40776032)

作者简介:栾锡武(1966—),男,研究员,博士,博士生导师,主要从事海洋地球物理调查研究工作,E-mail:xluan@cgs.cn

收稿日期:2011-07-29;改回日期:2011-10-31. 文凤英编辑

调查区位于萨哈林岛陆坡的最北端(图 1),是鄂霍次克海北部陆坡和西部陆坡交汇的部位,上接尚塔湾,下接德鲁根盆地,总体上为一陆坡地形,水深为 300~1 200 m,宽度一般在 40 km 左右。按照坡度和地形特征的不同,整个陆坡从上到下可以分成 3 段,分别为上陆坡、中陆坡和下陆坡(图 4,测线位置见图 2)。从测深曲线上容易看出,上陆坡的坡降明显大于中陆坡和下陆坡,可达 4.0%左右,中陆坡和下陆坡的坡降相近,约为 2.0%和 1.7%。陆坡上发育两种形态突出的地形,一是水下凹地,另一种是陆坡凸起。除这两种地形外,整个调查区未见较大的诸如张裂沟、大陆边缘火山等陆坡异常地形,测深曲线基本是平缓、连续变化的,显示整个陆坡较为平缓地从陆架坡折向德鲁根盆地过渡。



为研究浅表层水合物的发育机制、浅表层水合物与海底冷泉的关系,以及浅表层水合物区的海底地形特征,俄罗斯科学院远东分院科学调查船“*Akademik Lavrentiev* 号”,于 2006 年 5 月在萨哈

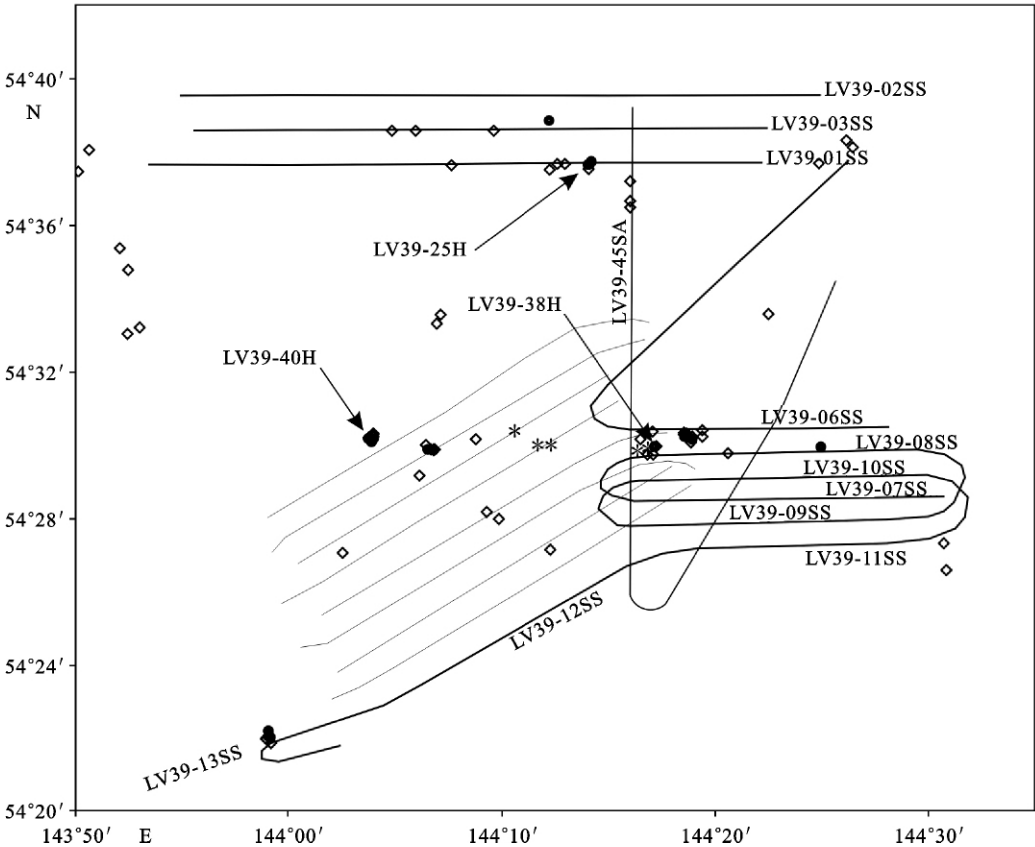


图 2 2006 年鄂霍次克海水合物航次旁扫声纳和海底剖面测线位置
水体回声异常(菱形)及重力取样站位(黑圆点)和以往水合物站位(星花)一并标出

Fig. 2 Side Scan Sonar and sub-bottom profile track lines of 2006 Okhotsk Sea gas hydrate cruise
Diamonds show the site of methane flare, black circles show the sites of gravity cores,
stars show the gas hydrate sample sites of other cruises^[6]

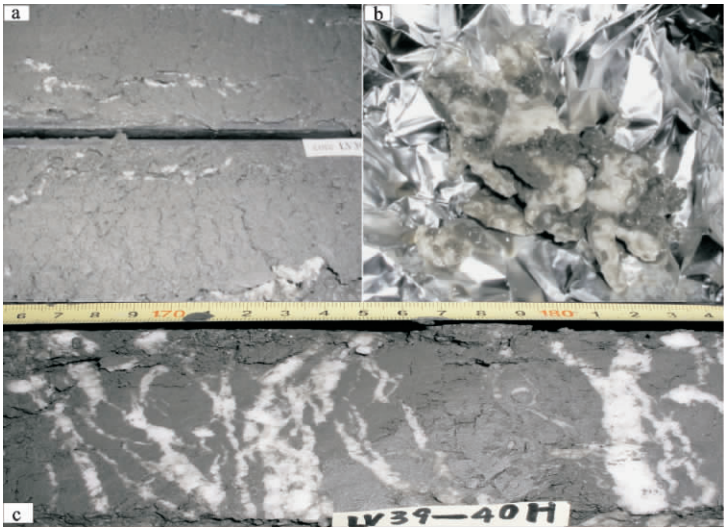


图 3 鄂霍次克海浅表层天然气水合物样品

a. LV39-25H 站位采集的水合物样品; c. LV39-40H 站位采集的水合物样品; b. 放大的水合物样品

Fig. 3 Gas hydrate-bearing sample of shallow sediment
a and c are sample from LV39-25H, while c from LV39-40H

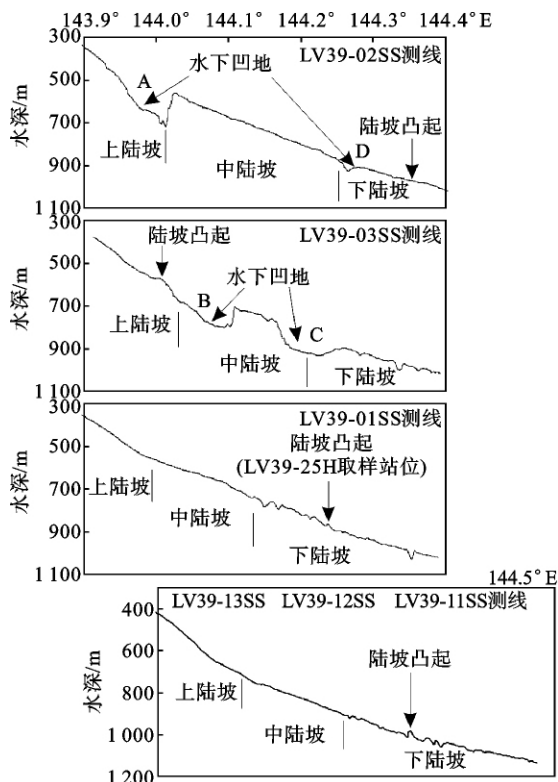


图 4 鄂霍次克海测深数据显示的陆坡地形

Fig. 4 Echo sounder data showing the slope morphology

水下凹地是一种下切于陆坡的负地形, 仅在 LV39-02SS 和 LV39-03SS 两条测线上发育。这两条测线上发育的水下凹地宽度约 5 000 m, 深可达 160 m。从旁扫声纳图像上可以看出, LV39-02SS 测线和 LV39-03SS 测线上发育的水下凹地实际上是一条连通的水下河道。该河道从 LV39-02SS 测线上的 A 位置, 蜿蜒向南经 LV39-03SS 测线上的 B 位置和 C 位置, 最后, 又向北绕回到 LV39-02SS 测线

下部的 D 位置。河道经 D 位置再往下逐渐消失。整个河道区控制的面积约 20 km×5 km。

陆坡凸起是陆坡向上凸起的正地形, 在幅度上要比陆坡凹地小得多, 一般只有几百米宽, 几十米高, 但在整个调查区普遍发育, 且以下陆坡最发育。

图 5 是海底剖面仪给出的 LV39-01SS 测线的测量结果。从图 5 可以看出, 600 m 以上的陆坡基本是光滑的, 从 650 m 开始, 陆坡有微微的凸起地形, 从 700 m 以下, 陆坡上的凸起地形就非常明显。这些陆坡凸起一般为低平的小丘, 宽几百米, 高几十米。因为分布在下倾的陆坡上, 小丘的两翼并不对称, 表现为上坡较短, 下坡较长。较大的凸起主要发育在 700~900 m 之间的陆坡区。更深的陆坡上, 海底凸起幅度要小些, 一般只有上百米宽, 十几米高。

在海底剖面仪测量剖面上, 800 m 以上的海底反射能量很强, 海底以下难以辨别出其他反射层位的存在。但在水深 800 m 以下, 海底的反射能量变弱, 海底以下出现多个反射层位。这些反射层位能量和海底的反射相当, 个别位置甚至比海底反射能量强, 反射连续性好, 层位清楚, 地层关系明确。图 6 是 LV39-06SS、LV39-08SS、LV39-10SS、LV39-07SS 和 LV39-09SS 测线的海底剖面仪测量结果。从图上可以清楚看出, 海底以下被现代沉积埋藏的古陆坡上, 陆坡凸起同样发育。这个古陆坡位于现代海底以下 30 m 左右。其基本形态和现代海底相似。古陆坡上发育的陆坡凸起要比现代陆坡凸起明显。古陆坡上的凸起和现代陆坡凸起基本存在一一对应的关系。但在一般情况下, 现代陆坡凸起要比古陆坡凸起幅度小, 个别地方, 因为现代沉积缺失,

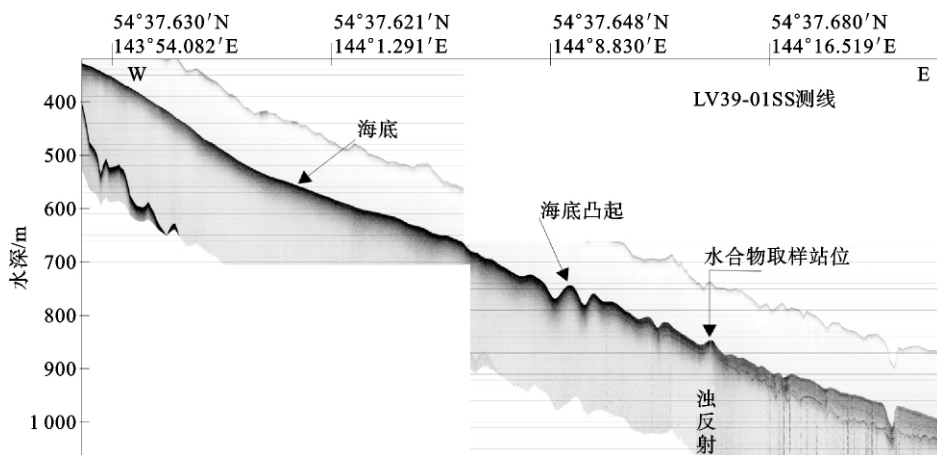


图 5 鄂霍次克海 LV39-01SS 测线的海底剖面仪测量结果

Fig. 5 Sub-Bottom profile recorder of line LV39-01SS

陆坡上的古凸起和现代凸起是重合的。

需要说明的是图 6 中的剖面都是 W—E 走向的, 且相互平行、由北而南分布。剖面间距约 1 000 m(具体位置见图 2)。为说明陆坡上的海底凸起是孤立丘形凸起还是南北向条带状脊形凸起, 我们将 5 条剖面在东西方向上按经度对齐排列。通过对图 6 的分析, 认为陆坡上发育的凸起地形应该是孤立圆丘形的, 而不是南北向连续的脊状地形。因为在图 6 任何剖面上的一个陆坡凸起, 在相邻剖面的对应位置(相同的经度)上都难以找到相似的凸起地形。图 6 中, 剖面间距为 1 000 m, 这说明陆坡上海底凸起的范围小于 1 000 m。对古陆坡上古凸起的

分析同样可以得出古凸起也是孤立的地形, 并非南北向连续分布的长条形脊状地形。

测线 LV39-45 是一条联络测线(图 2)。该测线先从北向南联络 LV39-01SS、LV39-06SS、LV39-08SS、LV39-10SS、LV39-07SS、LV39-09SS 测线, 然后向东北方向折回, 再次过 LV39-09SS、LV39-07SS、LV39-10SS、LV39-08SS、LV39-06SS 测线。图 7 是该测线的测深结果, 从图 7 可以明显看出海底凸起地形的存在。这样, 调查区的海底在东西方向上和南北方向上同时存在明显的海底起伏。这充分说明, 海底凸起地形是孤立的丘形, 而不是连续的脊形。

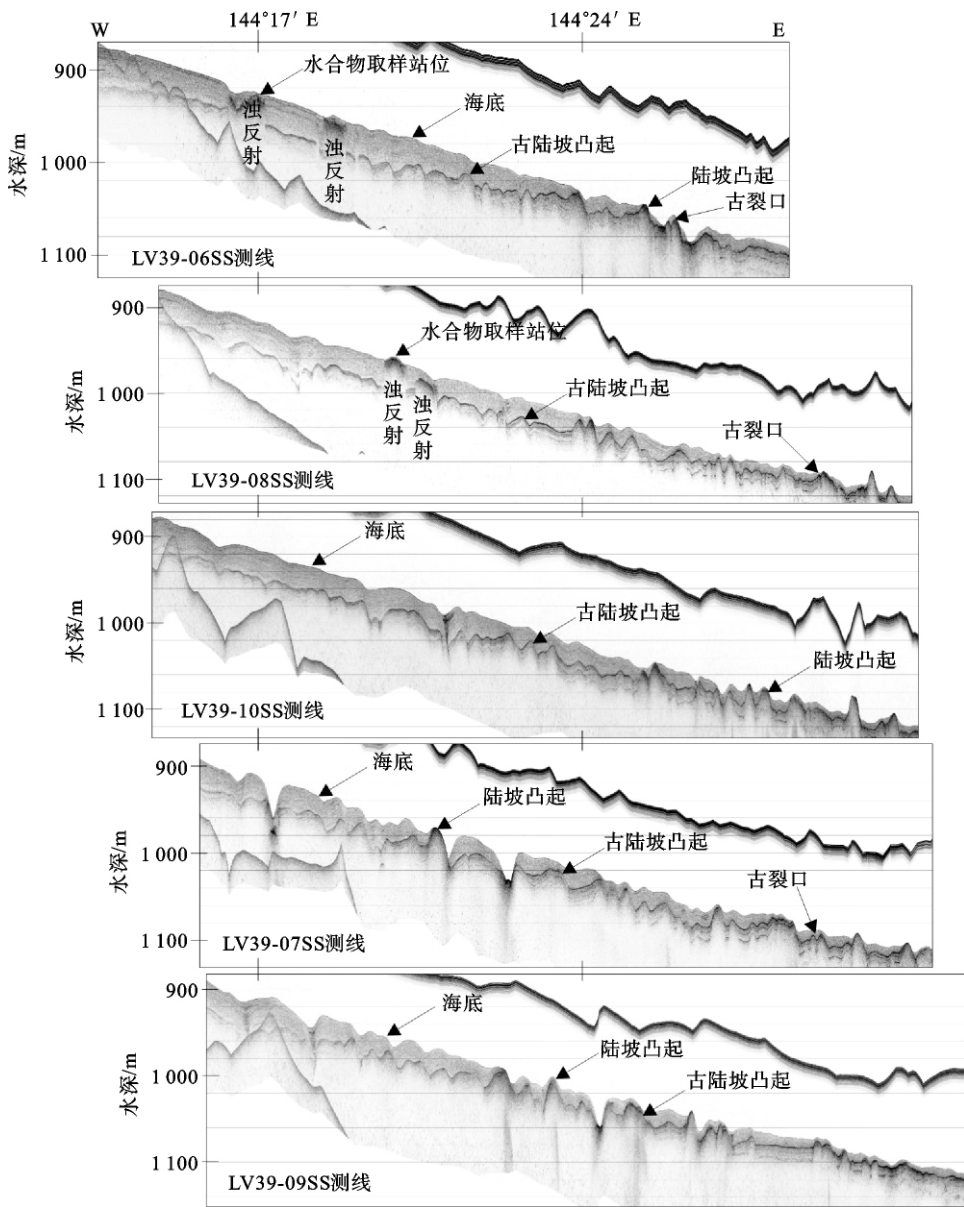


图 6 鄂霍次克海 LV39-06、07、08、09、10SS 测线的海底剖面仪测量结果

Fig. 6 Sub-Bottom profile recorder of line LV39-06、07、08、09、10SS

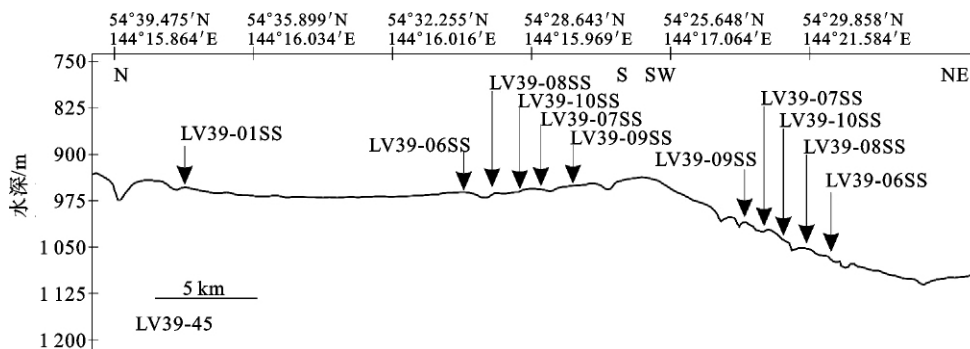


图7 鄂霍次克海 LV39-45 测线的海底测深结果

Fig. 7 Echo sounder data of line LV39-45

两种类型的海底陆坡凸起和浅表层天然气水合物相关。一种是在顶部发育裂口的陆坡凸起；一种是在下方出现浊反射的陆坡凸起。图8是LV39-01SS测线海底剖面测量结果的局部放大。其上，最下端的一个凸起，在尺寸上和其他凸起基本一致，不同的是该凸起的顶部发育一个约12 m宽、4 m深的裂口。由于海底剖面仪的工作频率为8 kHz，且是在近海底测量的，本文使用的仪器足以分辨这种尺度的海底地形。因此，测量结果给出的裂口应该是真实的。LV39-25H采样站位位于这个陆坡裂口上。该站位柱状样品长270 cm，150 cm以下开始出现水合物(图3)。我们仔细检查了其他的海底陆坡凸起，并没有找到类似的裂口。但在多个古陆坡凸起上发育类似的裂口地形，只是这些古裂口的尺寸要比LV39-25H采样站位的裂口尺寸大很多(图6)。

浊反射(acoustic turbidity)^[24-25]是指声学反射剖面上出现的异常反射现象。一般地，反射剖面上

浊反射区上部由于大量雪花、麻点的出现，使正常反射波组中断，反射变得凌乱、模糊，下部则出现反射空白，空白区见不到任何反射。从图8可以看出，在两个凸起之间的陆坡区，如第2个凸起和第3个凸起之间，海底反射以及海底以下的多个反射波组非常清楚。但在发育裂口的凸起(第3个凸起)下方10 m的范围内出现反射模糊区，模糊区以下为反射空白区。浊反射区上方和下方的正常反射波组中断。此外，LV39-06和LV39-08测线上各有两处出现明显浊反射的位置(图6)。图9是LV39-06SS测线上的浊反射局部异常，从图9可以看出，浊反射区反射空白带非常明显，在反射空白带的位置海底以下的古陆坡反射中断。根据报道，Shoji等2005年曾在此位置利用重力取样器采获到天然气水合物样品^[6]。本文的调查航次在该浊反射异常位置也进行了采样，未见水合物，但沉积样品中含大量气体以及生物贝壳。

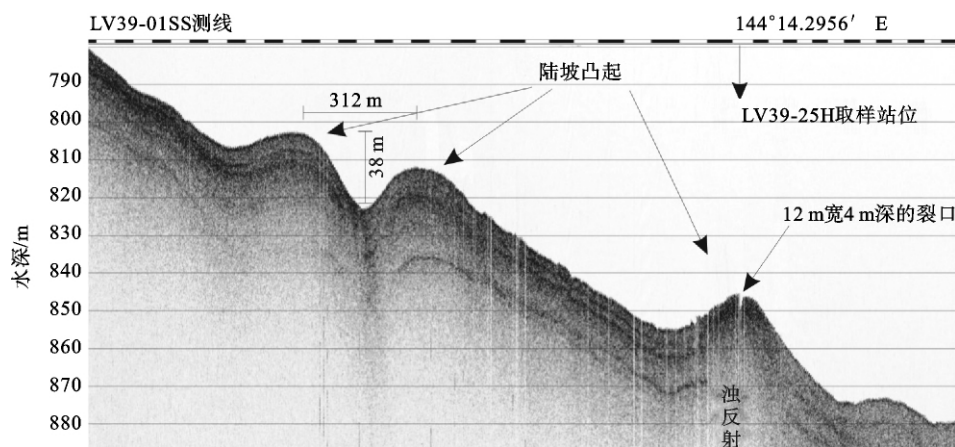


图8 鄂霍次克海 LV39-01SS 测线上顶部发育裂口的陆坡凸起

Fig. 8 A crater structure on top of a slope dome on line LV39-01SS

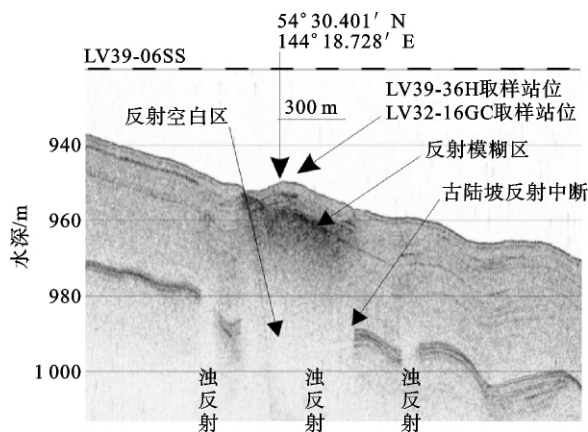


图9 鄂霍次克海 LV39-06SS 测线上的
浊反射异常和水合物取样站位

Fig. 9 Acoustic turbidity on sub-bottom
profile recorder of line LV39-06SS

4 讨论

海底地形与地貌调查发现,海底沙波、沉积物波以及与构造相关的各种线形构造等都是较为常见的海底地形。通常情况下,由底流、内波等因素控制的海底沙波、沉积物波^[26-27]以及由板块俯冲在增生楔部位形成的挤压构造等海底地形^[28-30]都是条带状分布的,并可在海底线性延展几千米甚至更长的距离。前文已经指出,本文讨论的海底陆坡凸起是孤立的,而非线形构造,因此,这些孤立的陆坡凸起应该比规律性分布的海底沙波、沉积物波以及增生楔部位发育的线形构造等有更复杂的成因机理。

海底陆坡凸起的形成在时间上具有多期性和延续性。海底剖面仪结果清楚地显示古陆坡凸起的发育,这说明在古陆坡时期,海底陆坡就广泛发育,且这种海底地形一直延续到现今。现今海底陆坡凸起的幅度普遍地要小于古陆坡凸起的幅度,个别地方古今陆坡凸起的形态有所变化,但大部分古今陆坡凸起是一一对应的,基本形态没有根本变化。说明从古(在时间上指古陆坡出露海底的时代)到今,陆坡发育的基本机制没有很大变化。

海底底流塑造的海底地形一般具有韵律性,且具有波状、圆滑的顶面形态^[31-32]。从图6给出的结果来看,本研究区陆坡上发育的海底凸起,无论是古凸起还是现今凸起都不可能是底流塑造成因的,或者说不可能主要是底流塑造成因的。因为,图6给出的海底凸起既没有韵律性,也没有波状的顶面形态,凸起顶部裂口的发育也和底流的塑造无关。

两个直交或者近于直交的构造应力场共同作用可能在海底形成棋盘格式的地貌形态^[33]。因为任何一个单一方向的构造应力场作用都可能在海底形成线形的海底地貌形态。两个方向都是挤压的构造应力场则可在棋盘格里形成本文所描述的孤立的海底凸起地形。根据 Bird^[34]给出的鄂霍次克海周边板块的相对运动的结果,我们可以发现,在萨哈林陆坡区存在两组近于正交的挤压应力场。一组来自由于太平洋板块 NW 向的俯冲和阿莫尔板块 SE 向的蠕散而引起的德鲁根盆地向萨哈林陆坡的挤压,另一组来自由于北美板块由北向南的蠕散引起的萨哈林陆坡沿萨哈林走滑断裂向南的挤压^[34]。这两组应力场的复合可以解释研究区孤立海底凸起地形的成因。

当存在快速沉积时,沉积地层中容易圈闭一定的流体和气体。随着沉积层的加厚,地层埋深加大,温度和压力也会同时升高。随着沉积地层埋深增大,地层中还会产生新的气体,从而造成地层压力的进一步增大。当地层的温度、压力增大到一定程度时,地层中超高压的多相物质开始形成^[35-36]。Moore 等的研究指出^[35-36],存在构造挤压时,这些超高压多相物质在一定的条件下会向上顶起上覆的地层,或者直接穿刺地层形成底辟,从而在海底形成凸起状的地形。

我们将声学剖面上出现的浊反射解释为海底以下地层中游离气的存在。由于地层中气体的存在,使得声波出现散射,大大削弱了有效声波的能量,从而使得反射地震剖面出现散乱、模糊的现象。有效声波被游离气带削弱以后,继续向下的穿透能力降低,从而在模糊带的下方出现反射空白带^[25]。

浊反射区中的游离气是底辟构造中的超高压多相物质向上迁移形成的。浊反射区上方对应的海底凸起应该是宏观构造挤压和局部底辟发育叠合的结果。这样浊反射区上方的海底凸起,在形态等方面应该和其他仅由挤压构造原因形成的凸起有所区别,比如顶部发育裂口等。

大量的游离气体向上迁移到水合物的稳定域以后,在空隙、水等条件合适的情况下可以形成水合物。底辟构造中的气体从下往上可以一直迁移到凸起的最顶部,最后,部分气体从凸起裂口逸出进入水体形成冷泉。这样在底辟构造中,由于游离气体的向上迁移,在整个水合物稳定域中从下到上,直至海底都可能形成水合物,从而使我们有使用重力采样器这样的设备也能采获天然气水合物样品。

5 结论

(1) 萨哈林东北陆坡区,特别是中、下陆坡区发育大量海底凸起。这些凸起一般呈不对称的丘形,宽几百米,高几十米。与海底沙波、沙脊不同,海底凸起为孤立海底地形,在南北方向上并不连续。

(2) 海底凸起和浅表层天然气水合物的发育密切相关,海底剖面仪测量结果清楚地显示古陆坡凸起的发育。现今海底陆坡凸起的幅度普遍地要小于古陆坡凸起的幅度,个别地方古今陆坡凸起的形态有所变化,但大部分古今陆坡凸起是一一对应的,基本形态没有根本变化。

(3) 在萨哈林陆坡地区存在两个方向的挤压应力场,分别是由德鲁根盆地向萨哈林陆坡方向的挤压应力场和萨哈林陆坡沿萨哈林走滑断裂向南的挤压应力场。海底陆坡凸起是这两大应力场复合作用的结果。

(4) 浊反射区中的游离气是底辟构造中的超高压多相物质向上迁移形成的,浊反射区上方对应的海底凸起应该是宏观构造挤压和局部底辟发育叠合的结果,浊反射区上方的海底凸起,在形态等方面应该和其他仅由挤压构造原因形成的凸起有所区别,比如顶部发育裂口等。在底辟构造中,由于游离气体的向上迁移,在整个水合物稳定域中从下到上,直至海底都可能形成水合物,从而使我们有使用重力采样器这样的设备也能采获天然气水合物样品。

参考文献 (References)

- [1] Sloan E D. Clathrate Hydrates of Natural Gases[M]. New York: Marcel Dekker, 1990: 641.
- [2] Kvenvolden K A. Gas hydrate-geological perspective and global change [J]. Rev. Geophys., 1993, 31: 173-187.
- [3] MacDonald G T. The future of methane as an energy resource [J]. Annu. Rev. Energy, 1990, 15: 53-83.
- [4] Milkov A V, Claypool G E, Lee Y J, et al. In situ methane concentrations at Hydrate Ridge Offshore Oregon: new constraints on the global gas hydrate inventory from an active margin [J]. Geology, 2003, 31: 833-836.
- [5] Riedel M, Long P E, Collett T S. Estimates of in situ gas hydrate concentration from resistivity monitoring of gas hydrate bearing sediments during temperature equilibration [J]. Marine Geology, 2006, 227: 215-225.
- [6] Shoji H, Soloviev V, Matveeva T. Hydrate-bearing structures in the Sea of Okhotsk [J]. Eos, 2005, 86: 13-24.
- [7] Hyndman R D, Dallimore R S. Natural gas hydrate studies in Canada [J]. Canadian Society of Exploration Geophysicists, 2001, 26: 11-20.
- [8] Torres M E, Bohrmann G, Brown K, et al. Geochemical observations on Hydrate Ridge, Cascadia Margin during R/V-ATLANTIS-Cruise AT3 35b, July 1999 [M]. Oregon State University.
- [9] Dallimore S R, Collett T S. Scientific results from the Mallik 2002 gas hydrate production research well program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada [J]. Geological Survey of Canada Bulletin, 2005, 585: 1-140.
- [10] 栾锡武, 赵克斌, 孙东胜, 等. 天然气水合物的开采——以马利克钻井为例 [J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1295-1304. [LUAN Xiwu, ZHAO Kebin, SUN Dongsheng, et al. Gas hydrates production-in case of Mallik test well [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(4): 1295-1304.]
- [11] Suess E, Torres M E, Bohrmann. Sea floor methane hydrates at Hydrate Ridge, Cascadia margin [C]//Natural Gas Hydrates: Occurrence, Distribution and Detection (eds. Paull C K, Dillon W P). Washington DC: American Geophysical Union, 2001: 99-113.
- [12] Francisca F, Yun T S, Ruppel C, et al. Geophysical and geotechnical properties of near-seafloor sediments in the northern Gulf of Mexico gas hydrate province [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 237(3-4): 924-939.
- [13] Charlou J L, Donval J P, Fouquet Y, et al. Physical and chemical characterization of gas hydrates and associated methane plumes in the Congo Angola Basin [J]. Chemical Geology, 2004, 205(3-4): 405-425.
- [14] Kudelkin V V, Savitskiy V O, Karpey T I. Structure and evolution of the sediment cover of the near Sakhalin areas of the South-Okhotsk Basin [J]. Geol. Pac. Ocean, 1986, 4: 3-13.
- [15] Ternois Y, Kawamura K, Keigwin L. A biomarker approach for assessing marine and terrigenous inputs to the sediments of Sea of Okhotsk for the last 27 000 years [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65, (5): 791-802.
- [16] Gorbarenko S A, Southon J R, Keigwin L D. Late Pleistocene-Holocene oceanographic variability in the Okhotsk Sea: geochemical, lithological and paleontological evidence [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 209: 281-301.
- [17] Seki O, Yoshikawa C, Nakatsuka T. Fluxes, source and transport of organic matter in the western Sea of Okhotsk: Stable carbon isotopic ratios of n-alkanes and total organic carbon [J]. Deep-Sea Research I, 2006, 53: 253-270.
- [18] Bogdanov N A, Chekhovich V D. On Collision between the West Kamchatka and Sea of Okhotsk Plate [J]. Geotectonics, 2002, 36: 72-85.
- [19] Rozhdestvenskiy S S. Evolution of the Sakhalin folds system [J]. Tectonophysics, 1986, 127: 331-339.
- [20] Ludmann T, Wong H K. Characteristics of gas hydrate occurrences associated with mud diapirism and gas escape struc-

- tures in the northwestern Sea of Okhotsk [J]. *Marine Geology*, 2003, 201: 269-286.
- [21] Shakirov R, Obzhairov A, Suess E. Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area [J]. *Geo-Mar Lett*, 2004, 24: 140-149.
- [22] 栾锡武, 赵克斌, 孙东胜, 等. 鄂霍次克海天然气水合物的成藏条件分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 23(6): 55-68. [LUAN Xiwu, ZHAO Kebin, SUN Dongsheng, et al. Geological factors for the development of gas hydrates in Okhotsk Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 23(6): 55-68.]
- [23] Jin Y K, Obzhairov A, Shoji H, et al. CHAOS III Project Cruise Report; RV Akademik M. A. Lavrentiev Cruise 39, May 24-June 18, 2006 [R]. Incheon: KORPRI, 2007, 132. ISSN978-89-990160.
- [24] Garcia Gil S, Vilas F, Garcia Garcia A. Shallow gas features in incised valley fills(Ria de Vigo, NW Spain): A case study [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22: 2303-2315.
- [25] Fannin N G T. The use of regional geological surveys in the North Sea and adjacent areas in recognition of offshore hazards [C]//In: Ards D A, ed. *Offshore Site Investigation*. London: Graham & Trotman, 1980: 5-21.
- [26] 王海荣, 王英民, 丘燕, 等. 南海北部大陆边缘深水环境的沉积物波[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(9): 1235-1243. [WANG Hairong, WANG Yingmin, QIU Yan, et al. The deepwater sediment waves in the northern margin of northern South China Sea [J]. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(9): 1235-1243.]
- [27] 钟广法, 李前裕, 郝沪军, 等. 深水沉积物波及其在南海研究之现状[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 907-913. [ZHONG Guangfa, LI Qianyu, HAO Hujun, et al. Current status of deepwater sediment wave studies and the South China Sea perspectives [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(9): 907-913.]
- [28] 刘家喧. 台湾海域新生代的大地构造[C]//见黄奇瑜主编. *台湾大地构造*. 台北: 中国地质学会, 2002: 1-48. [LIU Jiaxuan. Tectonics of Cenozoic in Taiwan area [C]//In: Huang Q Y, Taiwan Tectonic. *Geological Science of China*, Taiwan, 2002: 1-48.]
- [29] 李家彪, 金翔龙, 阮爱国, 等. 马尼拉海沟增生楔中段的挤入构造[J]. *科学通报*, 2004, 49(10): 1000-1008. [LI Jiabiao, JIN Xianglong, RUAN Aaiguo, et al. Diapiric structure of accretionary middle piece in Manila Trench [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(10): 1000-1008.]
- [30] 李家彪, 金翔龙, 高金耀. 南海东部海盆晚期扩张的构造地貌研究[J]. *中国科学 D 辑*, 2002, 32(3): 239-248. [LI Jiabiao, JIN Xianglong, GAO Jinyao. The study of tectonic geomorphology of the late spreading in the eastern subbasin of South China Sea [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(3): 239-248.]
- [31] 彭学超, 吴庐山, 崔兆国, 等. 南海东沙群岛以北海底沙波稳定性分析[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(3): 21-27. [PENG Xuechao, WU Lushan, CUI Zhaoguo, et al. A stability analysis of seabed sand waves in waters north of Dongsha Islands of South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, 25(3): 21-27.]
- [32] 吴建政, 胡日军, 朱龙海, 等. 南海北部海底沙波研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2006, 36(6): 1019-1023. [WU Jianzheng, HU Rijun, ZHU Longhai, et al. Study on the seafloor sand-waves in the Northern South China Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2006, 36(6): 1019-1023.]
- [33] 郭晓东, 邢俊兵. 海南省东方县戈枕金矿带构造控矿特征探讨[J]. *黄金地质*, 1997, 3(2): 42-46. [GUO Xiaodong, XING Junbing. Discussion on feature of structure control of Gezhen gold belt, Dongfang, Hainan Province [J]. *Gold Geology*, 1997, 3(2): 42-46.]
- [34] Bird P. An updated digital model of plate boundaries [J]. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2003, 4(3): 1027, doi:10.1029/2001GC000252.
- [35] Moore J C, Brown K M, Horath F, et al. Plumbing accretionary prisms [C]//In: Tarney J, Pickering K T, Knipe R J, et al, eds. *The Behavior and Influence of Fluids in Subduction Zones*. London: The Royal Society, 1991: 49-62.
- [36] Moore J C, Vrolijk P. Fluids in accretionary prisms [J]. *Reviews of Geophysics*, 1992, 30: 113-135.

SEA FLOOR TOPOGRAPHY OF SHALLOW GAS HYDRATE AREA——DATA FROM OKHOTSK SEA

LUAN Xiwu^{1,2}, LI Xiaoyun^{3,4}

(1 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology,
Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

3 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4 Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology,
Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Shallow gas hydrates have already been sampled by gravity corer, fishing net, and submersible machines on the sea floor and in the sediment near the sea floor. However the formation mechanism of shallow gas hydrate, its distribution and relationship with sea floor topography remain unclear. Based on the side scan sonar and sub-bottom profile data from the 2006 gas hydrate cruise in the Okhotsk Sea, we found that the occurrence of shallow gas hydrates are closely related to some domelike structures. Dome-like structures are common on the slope, especially along the Middle and Lower Sakhalin Slope. They are about several hundred meters wide and several ten meters high. Different from sea floor sand waves and sand ridges, the domelike structures are isolated structures with a slightly longer lower wing and a shorter upper wing. Sub-bottom profile recorder showed that buried dome structures are also well developed on the slope beneath a 30 cm modern sediment layer. A joint compress stress field from the Deryugin basin to the Sakhalin Slope and from the north Sakhalin Slope to the South Sakhalin Slope along the strike slip fault on the Sakhalin Slope was the main cause of the formation of the dome structures, and the diapir structures among the dome structures. The acoustic turbidity beneath the diapir structures clearly show the migration of free gases from deep to the gas hydrate stability zone and to the sea water body from the mini crater on the top of the dome structures. Gas hydrates formed due to the availability of free gas within the diapir structures from the bottom of gas hydrate stability zone up to the sea floor.

Key words: shallow gas hydrate; sea floor topography; dome structure; diapir structure; acoustic turbidity