

耿 威, 孙治雷, 吴能友, 等. 巴伦支海西南部天然气水合物形成与分解影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(9): 109-120.

巴伦支海西南部天然气水合物形成与分解影响因素

耿 威^{1,2}, 孙治雷^{1,2*}, 吴能友^{1,2}, 曹 红^{1,2}, 张喜林^{1,2}, 王利波^{1,2}, 张现荣^{1,2}, 徐翠玲^{1,2}, 翟 滨^{1,2}

(1 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071)

摘 要: 北极海域赋存丰富的油气和天然气水合物资源, 也是全球环境变化的一个重要窗口, 北极巴伦支海西南部陆架已发现大量天然气水合物赋存的识别标志, 笔者综述了巴伦支海西南部海域陆架区水合物形成的条件和已发现的天然气水合物分布情况和泄漏特征, 总结影响巴伦支海西南陆架区天然气水合物形成和分解的各项因素, 评价北极巴伦支海西南部天然气水合物资源前景。掌握北极巴伦支海及其周边区域的水合物资源情况是提升中国在北极事务话语权的必要内容之一, 北极海域水合物动态变化对于全球气候变化具有十分重要的指导意义; 这类极地低温海域水合物流体聚集和运移特征十分特殊, 对丰富水合物成藏研究有重要的理论意义。

关键词: 天然气水合物; 巴伦支海; 流体泄漏; 冰川作用

中图分类号: P744; P618.13

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2020.103

0 引言

据统计, 北极水合物大约蕴藏 1 000~5 000 亿 t 的碳储, 这一含量超过全球水合物总储量的 10%^[1-2]。而水合物分解产生的主要气体甲烷是一种强烈的温室气体^[3], 甲烷泄漏是加剧全球气候变暖的原因之一, 因此近十几年来各国许多学者关注北极陆架海域出现甲烷泄漏现象^[3-10]。北极海域大多区域地形、构造单元、地温梯度以及温压条件都适宜天

然气水合物发育, 挪威斯瓦尔巴群岛和挪威岛、加拿大北部海域、巴伦支海、喀拉海、拉普帖夫海、波弗特海、西伯利亚陆架等地区都发现了天然气水合物^[9, 11-16]。位于北极大陆边缘的浅水深层天然气水合物和流体运移系统对海洋温度变暖十分敏感^[17], 是潜在的甲烷气体排放来源。尤其是在全球变暖的大环境下, 加强对北极大陆边缘天然气水合物调查研究十分必要。因此, 掌握北极海域天然气水合物泄漏特征、分布规律和形成过程对于预估气候变化、评价北极水合物资源前景都有重要作用^[18], 这类极地低温海域水合物流体聚集和运移特征十分特殊, 也对丰富水合物研究有重要的理论意义。不但如此, 调查研究北极地区巴伦支海的地质、资源与环境状况, 是打造“冰上丝绸之路”的坚强保障和重要举措之一^[19]。

巴伦支海西南部是巴伦支海已知天然气水合物最发育的地区(图 1)^[20], Vadakkepuliymbatta 等^[21]根据模型估算巴伦支海西南部水合物体积约为 470~3 320 GSm³。已发现的巴伦支海西南部天然气水合物埋藏深度相对较浅、对北极海域变暖

收稿日期: 2020-07-09

资助项目: 中国地质调查局项目(DD20190819); 国家自然科学基金“冲绳海槽海底冷泉-热液系统相互作用及资源效应”(91858208); 国家重点研发计划课题“水合物泄露流体原位监测技术与装置”(2017YFC0307704); 国家重点研发计划课题“水合物试采环境监测技术应用示范”(2017YFC0307605)

作者简介: 耿 威(1983—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事海洋地质构造与水合物环境效应研究. E-mail: gengwei0128@aliyun.com

* 通讯作者: 孙治雷(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事深海矿产资源勘探与海洋地球化学研究. E-mail: zhileisun@yeah.net

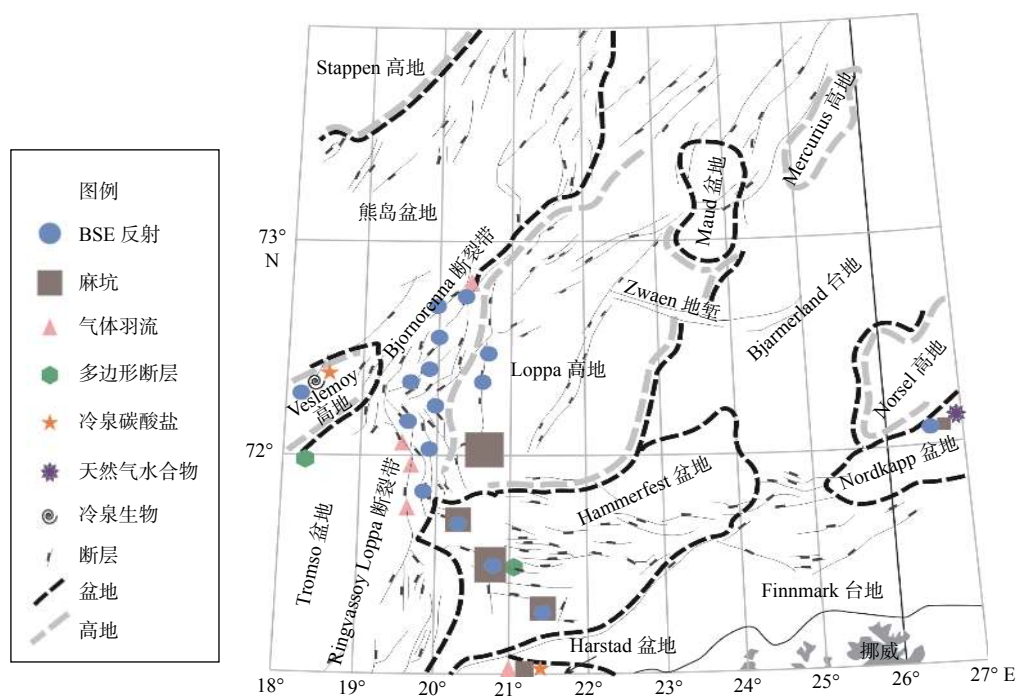


图1 巴伦支海西南部水合物发现(底图自文献[20])^[21-41]

Fig.1 Location and tectonic framework of southwestern Barents Sea and indications of hydrate occurrence (base map modified from reference[20])^[21-41]

响应极其明显,其下地层中发育大量油气藏,而浅表层水合物泄漏对钻井安全存在巨大的潜在风险,但大量水合物聚集区更是能源勘探开发的直接目标^[22]。已报道的巴伦支海天然气水合物^[23]主要出现在西南部陆架的各个盆地、构造高地以及西北部的斯瓦尔巴群岛附近。巴伦支海西南部陆架水合物是与深部烃类气体泄漏相关^[42],气源主要来源于晚新生代盆地的油气系统^[13]。识别活动性烃类气体渗漏或古冷泉渗漏一方面可以提供深部油气系统的线索,另一方面可以直接开启水合物矿藏的勘探。尽管对该地区的烃类流体运移的研究尚未达到全面细致的程度,但经常观察到该地区的流体流动受区域性构造和新生代的暴露剥蚀作用控制^[43],因此十分有必要对巴伦支海西南部各区域的水合物系统进行综合分析,以加强对巴伦支海西南部陆架区水合物聚集分解的规律性认识。笔者回顾梳理了先前的调查研究成果,综合各种地质作用对巴伦支海天然气水合物系统的控制作用,着重分析通道运移和天然水合物聚集关系。

巴伦支海位于挪威与俄罗斯以北(70°—79°N, 14°—58°E),是北冰洋重要的陆缘海之一,陆架宽

达1300多千米,从北至斯瓦尔巴特和法兰士约瑟夫群岛,东至新地岛,西至挪威-格陵兰海,是最宽阔的大陆架之一。巴伦支海基底是由巴尔蒂安、劳伦提安和西伯利亚板块以及较小的大陆板块拼合起来的。前新生代巴伦支海东部由西伯利亚-巴尔蒂安板块俯冲碰撞后沉降形成,而巴伦支海西南部由北大西洋扩张形成^[44]。巴伦支海西部以NE—SW走向近平行的3个凹陷和隆起组合。加里东期变质基底之上形成晚二叠世地堑;中石炭世—晚二叠世沉积了碳酸盐岩和蒸发岩;三叠纪—早侏罗世形成陆架碎屑岩层序,中侏罗世—早白垩世形成一系列线性构造,快速沉积了巨厚沉积层;晚白垩世巴伦支海西缘经历了构造挤压抬升,巴伦支海西部仅局部发育厚层的上白垩统泥岩、页岩^[45];巴伦支海北部和西部边缘是新生代约55~54 Ma从北大西洋分裂形成的^[46],古近纪时,整个巴伦支海西部沉降,随后构造活动使西缘抬升,新近纪整个巴伦支海受到强烈剥蚀,其西部和北部形成大型扇体。早古新世深海沉积、渐新世—中新世浅海沉积和上新世—更新世的冰川相沉积组成了新生代的沉积序列^[47]。上新世—更新世地层受冰川作用控制,西部侵蚀程度高于东部^[48]。

1 巴伦支海西南部陆架水合物形成的条件

巴伦支海西南部陆架区水深一般 < 350 m, 局部最深的凹陷水深不超过 500 m; 由于温暖的大西洋流与北极冷水混合, 巴伦支海西南部底层水温 1~6 °C, 季节性变化可达 2 °C^[49]; 由于盐底辟的出现, 局部地热梯度变化在 25~65 °C/km^[50]。根据巴伦支海西南部水深、海底温度和热流的资料推断, 巴伦支海西南部陆架不具备纯甲烷水合物形成的条件^[13, 21-22]。现今巴伦支海西南部陆架区水合物稳定带受底层水温、地热梯度、盐底辟构造等因素影响^[13, 21], 水合物稳定带变化极大, 其中主要的影响因素是底层水温和地热梯度。

西南部 Hammerfest 盆地冰川沉积物总有机碳 (TOC) 含量 < 2%^[51], 这个量不足以产生大量生物甲烷, 就此推测深层的热解气成为水合物聚集的气体来源^[31]。BSR 位置比生物成因气源的 BSR 位置更深, 加之这些 BSR 位置位于油气田上部, 推测来自下部储层的热解气是水合物主要气源^[27], 目前巴伦支海西南部陆架已发现的也都是 II 型水合物。根据地震资料, 巴伦支海西南部水合物气源来自于二叠系、下三叠统 (Kobbe 组)、上侏罗统 (Hekkingen 组) 和下白垩统 (Snadd 组)^[22, 24, 42], 主要以热解气和重烃为主^[13, 21]。巴伦支海西南部 Hammerfest 盆地下部 Snøhvit 气田、Tromsøflaket 西部的 Goliat 油气田和 Loppa 高地西部的 Havis 气田为水合物成藏提供了充足的气源。

巴伦支海西南部陆架区经历了构造抬升, 在伸展构造环境中形成大量高角度正断层, 后期的构造活动使得断层活化开放, 构成了流体运移系统。冰川的加载卸载作用, 使巴伦支海西南部陆架地层形成超压, 提供了流体运移的动力。因此, 巴伦支海西南部陆架区具备水合物形成的温压条件、气源供给条件、通道运移系统和超压动力来源, 十分适宜水合物聚集成藏。

2 巴伦支海西南部天然气水合物赋存的识别标志

通过在巴伦支海西南部陆架海域多道地震、浅地层剖面、多波束、深海可视化等调查研究, 发现了

多种天然气水合物赋存的识别标志以及各种冷泉渗漏标志^[21-41]。

2.1 气体羽流

气体羽流是甲烷等烃类气体在海底直接以气体形式释放, 是海底冷泉的标志之一^[52-54], 而冷泉是海底天然气水合物分解后产生的流体, 主要成分是甲烷等烃类气体。20 世纪 90 年代开始调查发现熊岛东部海域的大量甲烷羽流^[29], 羽流区 280 m 以深水体甲烷浓度在 29~56.7 nM, 向上逐渐变小至 3.6 nM。巴伦支海西南部 Loppa 高地 2 700 km² 区域发现了 16 个的气体羽流, 羽流沿 Ringvassøy Loppa 断裂带出现, 而大部分麻坑区无羽流发现, 仅一个麻坑区羽流位于同一断裂带的分支断层上^[27](图 2)。羽流密集区位于 Loppa 高地西翼, 与其新生界和石炭系地层断裂程度高直接相关, 上新统-更新统地层中存在大量断裂, 适合流体在冰川沉积中迁移至海底, 形成气体羽流。

Harstad 盆地 Håkjerringdjupet 凹陷发现约 190

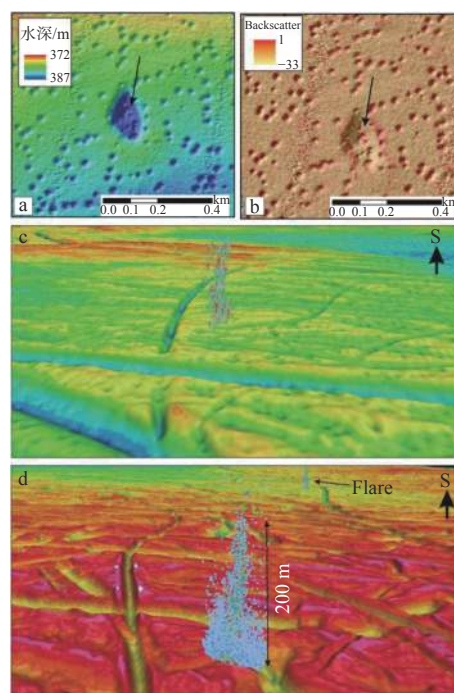


图 2 巴伦支海西南部 Loppa 高地测深和背反射图像
(据文献 [27] 修改)

Fig.2 Bathymetry and backscatter datasets of Loppa High in Southwest Barents Sea (modified from reference [27])

个气体羽流^[33], 主要集中在 Håkjerringdjupet 凹陷北部, 呈 NE—SW 向分布, 大部分羽流起源于海底

冷泉碳酸盐岩结壳区域。

2.2 麻坑

麻坑是甲烷等流体喷发或溢出海底形成的凹陷,与海底冷泉活动密切相关,可认为是冷泉的喷口^[55]。巴伦支海西南部很多区域发现了麻坑,其规模、密度和分布特征各有不同,总体上从麻坑区域中心向外,麻坑的规模和密度呈变小趋势。

Nordkapp 盆地在 Hammerfest 盆地东侧,在此盆地曾获得了水合物实物样品,水深为 250~330 m 区域也发现了大量麻坑^[22],根据三维地震资料解释的海底图像显示,麻坑直径<300 m,多见几个麻坑呈簇分布,麻坑在较深水区域分布更密集,与冰川犁痕共存,分布于盐丘周围。地震剖面显示了这些麻坑直接连接深层断层,断层可达侏罗系或更深的地层。

Hammerfest 盆地发现多处麻坑^[25, 32, 36],直径大多<50 m, Ingøydjupet 凹陷最深处(水深约 500 m)麻坑直径 100 m,深度 10 m,向凹陷外缘方向麻坑的深度、规模和密度不断减小,凹陷外缘麻坑直径为 35~45 m,深度 1~2 m,麻坑密度从中心的 210 个/km²,减少到 135 个/km²。此区域之外没有麻坑发育,一些巨大的凹陷可能是由于冰山撞击海底而形成的。Hammerfest 盆地西部邻近 Ringvassøy Loppa 断裂带区域发现了 3 种规模的麻坑^[32],46 个直径 50~100 m 的大型麻坑,69 个直径 100~300 m 的超大型麻坑,还有 2 个直径达 1 700 m 和 1 900 m 的巨型麻坑。高密度的大型麻坑和超大型麻坑在水深较大(水深 315~350 m)的区域发育,巨型麻坑受到冰山犁痕的影响较大,位于水深较浅(水深 276~284 m)的区域。研究发现现今海底和上部区域不整合面(URU)上麻坑高密度区域和巨型麻坑位置一致,指示了古流体泄漏更为活跃的特性,这个麻坑区南部局部泄漏强烈,北部泄漏较弱但麻坑分布更为广泛。Hammerfest 盆地发现的很多麻坑下地层识别出 BSR 及增强反射。一些较大的麻坑其下地层显示出柱状的渗漏区^[30]。

Loppa 高地 340~425 m 水深区域也发现了麻坑^[27](图 2),大部分麻坑直径<35 m,深约 2 m,密度可达约 150 个/km²,此区域 1 km 外的麻坑规模和密度均变小。部分随机分布、部分与冰川犁痕直接相关,有些凹陷中也出现麻坑。Loppa 高地麻坑几

乎未被沉积物覆盖,说明近期仍存在流体活动。地震剖面上显示麻坑切穿了最上层的海相沉积物,说明其形成于沉积之后。

Harstad 盆地 Håkjerringdjupet 凹陷最深的区域发现大量麻坑^[34](图 3),麻坑直径 10~50 m,深度 1~6 m,麻坑规模随水深增加(水深 315~375 m),通过 ROV 观察到有一些<2 m 的小麻坑呈簇环绕在大麻坑周围,ROV 展示出高分辨率麻坑形态,麻坑具有不规则边界,且底部有大型岩块或碳酸盐结壳。

2.3 BSR 以及游离气反射识别

早在 20 世纪 90 年代在西南巴伦支海就发现了 BSR(似海底反射层)^[40-41]。熊岛(Bjørnøya)盆地通过多道地震调查发现了上古新统和下渐新统泥岩、粉砂岩中的增强反射、BSR 及其下的声学混浊带,识别出了水合物和游离气^[41],在 Bjørnøyrenna 断裂带主要断层之上或附近形成聚集区,推断 BSR 深度在 160~220 mbsf,受 Bjørnøyrenna 断裂带控制,区域半地堑盆地向 E 和 NE 方向倾斜,BSR 深度向 NE 方向变深。

Nordkapp 盆地地震剖面中可以识别出不同深度的增强反射,浅层增强反射通过断层与深层增强反射相连^[22]。Loppa 高地位于熊岛盆地西南,URU 附近识别出斑块状 BSR^[27],集中的流体沿地层边界(如 URU)流动,并通过活动断层渗漏。巴伦支海西南陆架区由于水深较浅,位于甲烷水合物稳定域(结构 I)之外,只能形成 II 型的天然气水合物^[22]。由于非甲烷烃类气体存在的额外条件,导致水合物在满足稳定条件的地方 BSR 都呈斑块状,但由于缺乏清晰的 BSR,使得水合物的识别变得比较困难^[56-57]。

Loppa 高地西南区域发现了倾斜 BSR 和增强反射^[42](图 4),倾斜 BSR 不平行于海底,可能在 Ringvassøya 断裂带和 Loppa 高地存在一个影响水合物稳定带的因素。可能的原因之一是热流的变化,高热流使水合物稳定带深度变浅、厚度变小,类似泥火山附近的 BSR,从火山口向外倾斜^[58];另一个可能的原因是烃类气体中重烃成分的增加,直接影响水合物稳定带厚度,在封闭区域逐渐增加重烃比重,会出现倾斜 BSR。

Hammerfest 盆地地震剖面中可识别出 BSR、声学空白、增强反射、杂乱反射和速度下拉等代表水合物和游离气的特征^[32]，“地震管道”形态特征

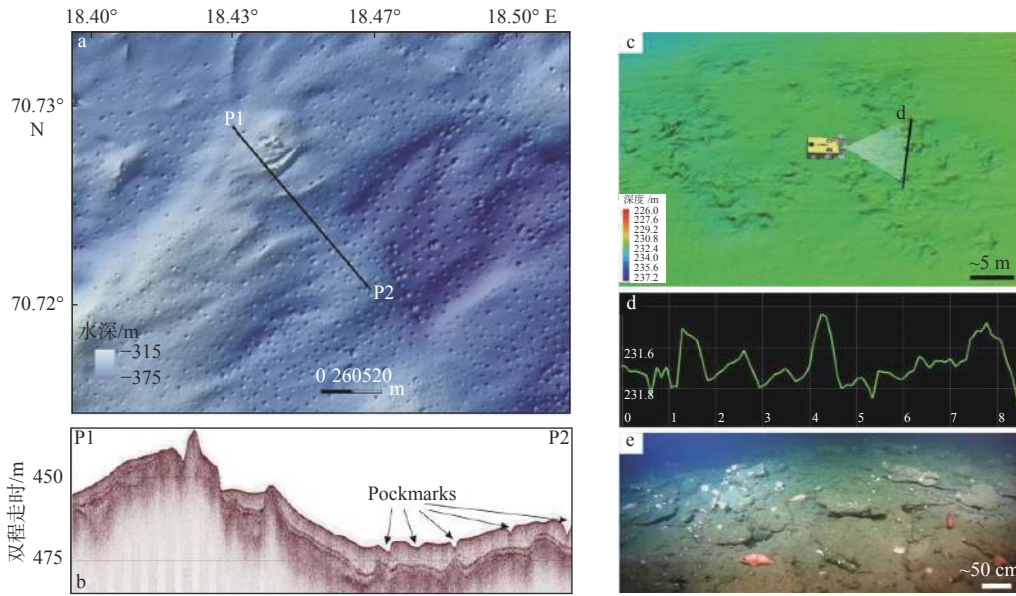


图 3 (a) Harstad 盆地 Håkjerringdjupet 凹陷中高密度麻坑; (b) 浅地层剖面上显示的麻坑; (c) 高分辨率多波束探测的麻坑形态和冷泉碳酸盐岩; (d) c 图中所示位置的测深 (m); (e) ROV 观察到的麻坑中的冷泉碳酸盐岩 (据文献 [34])

Fig.3 (a) High density pockmarks in the deeper part of the Håkjerringdjupet in Harstad Basin; (b) SBP seismic data across the pockmarks in Håkjerringdjupet; (c) High-resolution MBE bathymetry from ROV and seafloor pictures of carbonate crust fields within pockmarks showing the contrast between erosional and depositional areas; (d) Bathymetric curve of the profile shown in c. Vertical and horizontal scales of the depth profiles are in meters; (e) Image of carbonate crusts in a pockmark from ROV (after reference [34])

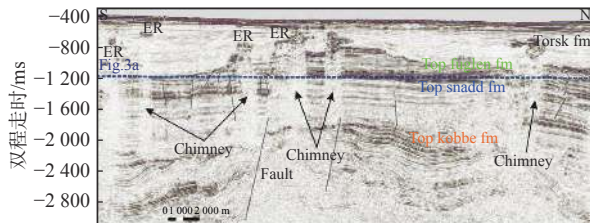


图 4 Loppa 高地西南区域地震剖面上显示的倾斜 BSR、增强反射以及气烟囱 (据文献 [42])

Fig.4 Tilted BSRs, enhanced seismic reflections and seismic chimneys of 3D seismic lines west off Loppa High (after reference [42])

明显。Hammerfest 盆地 Goliat 油气田区域发现的增强反射为水合物聚集, 向下与垂直断层相连^[25]。Veslemøy 高地地震剖面中发现多处水平高振幅异常和声学空白带^[28]。Polheim 台地位于 Loppa 高地以西, URU 之下可以识别出不连续、较短且倾斜 BSR 以及 BSR 下杂乱的、不连续的反射, 有学者推测这个区域不连续的 BSR 可能是天然气水合物浓度存在明显的变化^[24], BSR 之下低振幅、杂乱信号、指示流体向上迁移至 BSR, 判断 BSR 之下存在流体集中不规则疏导系统, 即使在 3D 地震调查区域这样几百平方公里的小尺度中也存在影响水合物

稳定带的变化因素。

由于巴伦支海西南部地层岩性变化较大, 造成了热流变化强烈, 地热梯度变化十分明显, 这些变化因素加之调查程度不足, 因此对水合物稳定带深度和厚度的掌握仍有很多不确定性^[42]。总体上巴伦支海西南部 BSR 呈斑块状、比较分散, BSR 下都关联到垂直气体运移系统和断层。

2.4 气烟囱

Loppa 高地西南区域地震剖面上发现了气烟囱^[42](图 4), 气烟囱下明显出现垂直柱状的模糊空白带, 被解释为沉积物中游离气的出现。这些气烟囱起源于三叠系 Kobbe 组, 可能为烃源岩, 但由于气烟囱内部反射模糊, 难以判断其起源深度。

2.5 冷泉碳酸盐岩

冷泉碳酸盐岩是海底水合物渗漏活动的证据之一, 利用 ROV 观察到 Harstad 盆地中 Håkjerringdjupet 凹陷周围冷泉碳酸盐岩结壳普遍发育(图 3)^[34], 大部分碳酸盐结壳下有凹槽环绕, 其中 2 站冷泉碳酸盐岩结壳伴有冷泉气体羽流泄漏现象。该区海底

相对平坦时,冷泉碳酸盐岩在沉积物甲烷厌氧氧化作用(AOM)下形成^[59-60],随后在强烈的底流和泄漏流体的冲刷作用下,未固结的沉积物被侵蚀,浅层的冷泉碳酸盐岩暴露,暴露的冷泉碳酸盐岩又成为流体侵蚀的新目标,其周围的松散沉积物进一步被侵蚀,从而冷泉碳酸盐岩周围凹槽逐渐扩大。

位于巴伦支海西南边缘的 Lofoten-Vesterålen 大陆边缘的滑坡体中也发现了冷泉碳酸盐岩以及典型的烟囱体^[31](图 5),可视化调查发现滑坡体上常见通道、烟囱通道、碳酸盐结壳和菌席,这些都是明显的甲烷泄漏的标志。

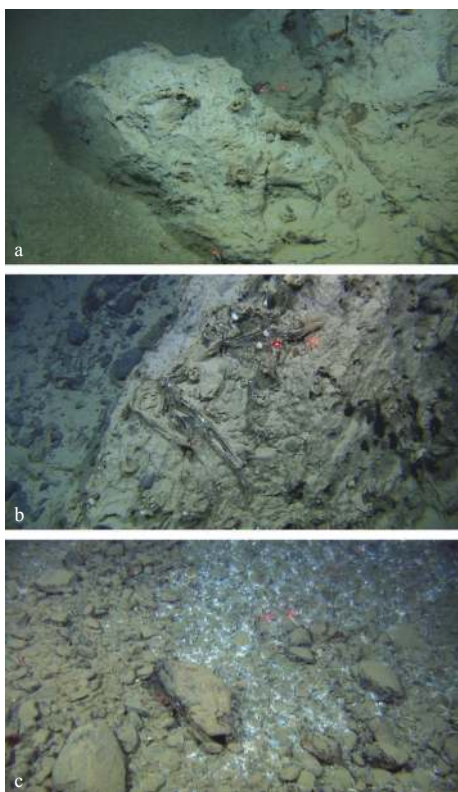


图 5 Lofoten-Vesterålen 大陆边缘冷泉碳酸盐岩和菌席 (据文献 [31])

Fig.5 Cemented cold seep carbonate chimney tunnels and bacterial mat on the seabed on Lofoten-Vesterålen continental margin (after reference [31])

2.6 海底滑坡

巴伦支海西南部 Lofoten-Vesterålen 大陆边缘出现了由于水合物分解产生的大型滑坡^[31]。可视化调查发现滑坡体中存在破碎的或倒塌的烟囱通道,推测这是在滑坡之前形成的,表明甲烷流体的

释放可能是滑坡发生前边缘破坏的一个主要因素。滑坡体中常见开口直径 1 m、内径 10~20 cm 的大型通道,还有直径几厘米的小型通道(图 5),推测这些通道的形成可能与水合物聚集有关,大型通道可能是滑坡时地层中积聚的气体而突然排出形成的,小型通道可能是由于滑坡导致天然气水合物失稳和分解造成的。

2.7 生物标志

冷泉区具有典型的冷泉生物群落,如管状蠕虫、贻贝以及菌席等。在缺氧的海洋沉积物中甲烷氧化是由一群消耗甲烷的古菌和硫酸盐还原菌调节的^[61]。巴伦支海东南部 Lofoten-Vesterålen 大陆边缘发现的菌席和碳酸盐结壳相伴出现,判断与从海底逸出的气体/流体有关^[31]。Veslemøy 高地东翼发现了 *Nonionella auris* 有孔虫,这是一种以甲烷氧化菌为食的底栖有孔虫,直接指示了活动冷泉的存在^[28]。

3 地质作用对水合物聚集和烃类流体泄漏的控制作用

3.1 冰川作用

在巴伦支海西南部海底普遍发育大规模冰川犁痕、冰川线理和冰川槽谷以及由冰川崩解形成的凹陷^[21-41],地震剖面上也识别出了冰川沉积物和 URU, URU 是冰川剥蚀面, URU 之下是海相沉积, URU 之上为上新-更新世冰川沉积,这都是巴伦支海经历了冰川作用的直接证据。

上新—更新世巴伦支海受北半球约 2.7 Ma 冰川作用影响^[62],整个巴伦支海都被深至海底的冰川覆盖,冰期的冰川以现今的巴伦支海西南部为中心,厚度可达 1.5 km^[38, 63]。冰川消退时则伴随着高速冰流和冰盖底部沉积物变形^[64-66]。约 2.7 Ma 之后,上新世和更新世的冰川一再推进,高速冰流的侵蚀导致了超过 1 km 的沉积物侵蚀。大量沉积物沉积在西部大陆边缘,如熊岛海槽深海扇。而巴伦支海的冰川完全消退大约在 15 ka BP^[67]。现在巴伦支海水深不到 500 m,最深的几个凹陷都是冰川消退时期古冰流侵蚀形成的^[63, 68]。多波束调查发现巴伦支海西南部海底有大量线性弯曲的“V”型和“U”型槽沟,深度 4~11 m、长度 1~16 km、宽度 40~200 m

(图 2)^[32], 局部还可见直径 100 m 以上的非麻坑成因凹陷^[27]。冰川消退期晚期(19~15 cal ka BP), 由于风和流搬运冰盖, 冰山在深水中崩解, 直接撞击海底形成凹陷, 而崩解的冰川块体对海床沉积物侵蚀而形成冰山犁痕^[66]。另外还可见一些冰流形成的巨型冰川线理, 冰川犁痕切穿冰川线理。另外, URU 大部分区域也都存在巨型冰川线理和冰川犁痕^[32], 表明现代海底和 URU 都经历了冰川侵蚀作用, 大量沉积物被剥蚀。根据地震调查发现巴伦支海西南部可能经历了至少 2 次集中的流体逃逸事件^[39], 比较老的一次流体逃逸事件在末次间冰期(约 0.7 Ma), 流体泄漏普遍发生, 在 URU 上发育形成大量麻坑等直接代表流体泄漏的海底地貌; 最近的一次流体泄漏事件发生在全新世, 末次盛冰期之后的冰川消退时期(17~16 cal ka BP), 在现代海底出现大量麻坑和气体泄漏表征。

在冰期由于储层超压的发展, 冰的加载和卸载作用可能导致水和烃类的进一步渗漏^[66], 从活化的区域断层中溢出。天然气水合物的热力学稳定性也可能受到大规模陆架侵蚀及多次冰期地层和静水压力变化的影响^[69]。间冰期冰川消退, 触及海底的冰川消失、海底温度升高、压力降低, 这可能影响 20 年以内水合物的稳定性^[70]。温度的变化传播到水合物稳定带的底部需要更长的时间。随后, 由于冰川侵蚀引起上覆地层压力降低, 使储层气体膨胀, 可能会导致油气泄漏, 并由于地层超压的形成导致烃类流体逃逸事件。

巴伦支海西南部陆架区海底冰川剥蚀作用遍布, 上覆细粒薄层沉积物适宜麻坑发育, 冰川犁痕深, 犁痕沟槽位置的静岩压力相对更小, 气体泄漏更容易发生, 从而形成麻坑。大部分有水合物发现的区域发育麻坑, 但大部分麻坑没有气体羽流显示, 而且发现的为数不多的气体羽流都出现在开放断层附近^[26], Ostanin 等^[32]估算末次最大冰期热解气成因的水合物厚度约为 600 m, 而现在模拟水合物稳定带的厚度仅约为 200 m, 推测可能是冰川消退引起压力降低而形成气体释放造成的。这是因为现代海底这些麻坑形成于最后一次冰川消退末期^[27], 在温度压力变化后, 水合物分解, 流体发生泄漏, 现今水合物再次逐渐到达平衡, 因而未发现活跃的气体羽流。

3.2 构造抬升和剥蚀作用

巴伦支海新生代的幕式隆起导致了古新世(60~55 Ma)、晚始新世(36~35 Ma)和晚中新世(7~5 Ma)的 3 次暴露剥蚀, 与大西洋构造期一致^[68]。巴伦支海大部分地区由于中新世隆升和侵蚀而缺失古近系^[68-71]。

巴伦支海西南部陆架 Ringvassøy-Loppa 断裂带和 Bjonørenna 断裂带形成于中侏罗世—早白垩世大规模伸展断裂作用, 晚白垩世再次活化^[72]。由于冰川消退后地壳均衡补偿作用, 巴伦支海西南部晚新生代出现抬升, 根据模型推算大概有 900~1 400 m 抬升^[63]。由于负载的移除和后期抬升, 这些断层再次活化开放, 为流体运移提供了良好的通道。

大多调查研究表明巴伦支海西南部烃类流体泄漏直接与新生代剥蚀作用相关, 已发现的水合物聚集区主要位于上部不整合面附近, 它是巴伦支海西南部与深部气体运移相关的主要层序边界, URU 是一个角度不整合面, 下伏新生代前冰川期海相沉积层, 上覆冰川沉积物^[65, 73]。URU 形成期间的这次剥蚀作用移除了巴伦支海陆架上约 1 km 厚的沉积物^[65], 直接导致下伏储层压力变化, 烃类气体发生膨胀形成超压, 流体向上运移, 形成气烟囱, 或沿断层等构造界线运移, 至适宜温度压力区域形成水合物稳定带。

3.3 区域断层对泄漏流体运移的影响

巴伦支海西南部区域断层对水合物形成的影响包括 2 种, 一种是流体通道, 另一种是水合物封堵。

巴伦支海西南部陆架处于伸展环境, 大部分主要的断裂都为正断层^[74], 成为烃类气体运移的通道。主要断裂带和一些深大断裂可达侏罗系、三叠系、二叠系烃源岩地层, 直接连通烃源岩与水合物聚集区, 如 Loppa 高地西翼近邻 Ringvassøy Loppa 断裂带, 由于 Loppa 高地慢速抬升和冰川沉积中的断裂作用, 形成了现在的开放断层直达海底, 活跃的流体沿地层边界运移至开放断层, 形成气体羽流等水合物泄漏标志^[27]。

Hanmmfest 盆地三维地震剖面显示 SN 和 EW 走向的活化断层横切下始新统一古新统、白垩

系和侏罗系地层,其中一些断层成为储层边界。下始新统一古新统地层上覆于晚白垩世不整合面之上,受大量正断层影响,与其下多边形断层和活化构造断层相连,形成相互连接的断层网络^[33],十分适宜烃类流体运移。

巴伦支海西南部地震剖面上显示出很多信号衰弱的柱状“地震管道”^[32]，“管道”内显示出超过1 km的气体或流体的垂直迁移,在“地震管道”内部,强烈的压裂占据主导地位,从而提高了渗透率,降低了密封的完整性,适宜流体运移。然而,当释放烃类气体的速度很慢时,一些“地震管道”可能被水合物胶结堵塞^[71]。地震管也可能在海底泥火山喷发事件终止,形成麻坑,这取决于它们的强度和超压状况^[75],受构造和地层共同控制。

巴伦支海西南部地震剖面上显示出很多气烟囱,气烟囱与“地震管道”不同,气烟囱大范围的地震信号衰弱区域(空白、杂乱反射、速度下拉)与浅层气体聚集或垂直气体运移引起的低速区有关。巴伦支海西南部气烟囱大多与下伏的断层直接相关(图4),是流体上涌后在上覆硬质地层的压力集中释放,在水合物形成上主要承担了流体通道的作用。Loppa高地西南区域气烟囱平面上呈卵圆形,与断层分布一致^[42],且出现在Loppa高地的西翼和南翼位置,受构造边界控制明显。此处邻近Ringvassøy Loppa断裂带,地层中高角度正断层十分发育。大量流体在断层中或沿断层迁移,这些区域断层作为深部烃源岩流体运移的通道,而不是起到封堵作用。

巴伦支海西南部断层对烃类气体的运移作用还表现在浅部气体异常通过断层与深部气体异常相连(图6)。可能是冰期和间冰期温度压力的变化引起了水合物稳定带的明显加深,断层是深层和浅

层水合物聚集区直接的通道,存在长期的动态变化。也可能是持续的构造活动使深部流体重新运移分布,在浅部形成水合物聚集区域^[55]。

熊岛盆地发现的水合物和游离气位于较大断层附近^[41],推测气体泄漏发生的原因除了剥蚀的减压作用,还有一个就是断层作用使储层错动,发生储层倾斜,断层在储层倾斜的条件下,兼具封堵作用和运移作用。

另外,巴伦支海西南部陆架区对烃类流体运移有建设性作用的还包括多边形断层对流体向上和水平运移的通道作用以及URU和蛋白石-A/蛋白石-CT转变界面对流体水平运移促进作用。巴伦支海西南部一些纵向的深大断裂与横向的多边形断层或这些特殊界面相连,促进了烃类气体在水平界面上的运移和聚集。Tromsø盆地上白垩统一古新统地层^[45]和Hammerfest盆地上白垩统地层^[39]中都识别出了多边形断层,且这些疑似的多边形断层发育于蛋白石A/蛋白石CT转换界线之下的蛋白石CT沉积物中。多边形断层附近显示了高振幅异常,说明多边形断层和成岩界面都是很好的气体聚集区和运移通道。多边形断层与区域断层相互影响,使流体沿多边形断层线垂向聚集,形成更广泛的水合物扩散区。Veslemøy高地发现了蛋白石-A/蛋白石-CT转变界线接近URU^[28],发生在剥蚀之前,代表了剥蚀前上白垩统一古新统地层曾达到过蛋白石-A/蛋白石-CT转变的埋藏深度。这个转换界面可能是输送烃类气体至海底表层的一个主要机制,引导流体向构造高地运移。

3.4 底辟作用

已有调查发现巴伦支海西南部Nordkapp盆地和Tromsø盆地发育盐底辟^[22, 31, 50],盐底辟附近地热梯度明显变大^[50],且变化范围较大。地震调查发现Tromsø盆地盐底辟邻近区域没有BSR显示,但不排除游离气存在的可能。Tromsø盆地盐底辟构造之上,地层孔隙水盐供给充分,孔隙水盐度大幅度增加。而盐是天然气水合物形成的抑制剂^[76],孔隙水盐度增加,水合物形成则需要更高的压力,稳定带厚度减小。Nordkapp盆地和Tromsø盆地发育的盐底辟提高了浅层沉积物温度和孔隙水盐度,导致水合物稳定带变薄^[50, 77]。

Nordkapp盆地地震剖面中识别出泥底辟中心

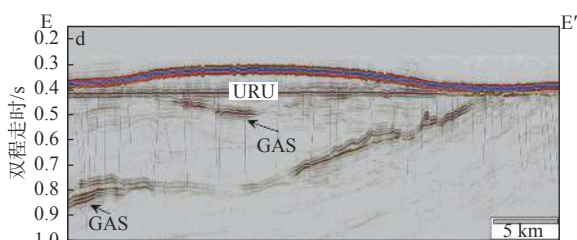


图6 Nordkapp盆地浅部气体异常位置通过断层与深部地层相连(据文献[22])

Fig.6 Seismic lines showing multiple gas anomalies in Nordkapp Basin. Note the faults associated with the anomalies (after reference [22]).

以外的区域有气体异常, 盐底辟两翼由于底辟作用形成挤压应力环境, 断层发育且呈放射状, 为深部流体向上运移提供了良好通道。Nordkapp 盆地有些区域盐底辟作用早于 URU(图 7), 且没有气体异常, 这是由于这些区域在隆升和侵蚀过程中绝大部分失稳的烃类气体已经通过开放断层逃逸。

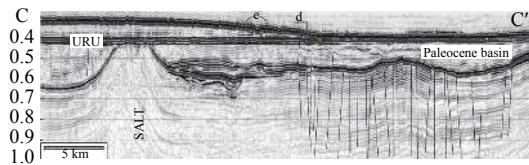


图 7 Nordkapp 盆地盐底辟构造及断层发育
(据文献 [22])

Fig.7 Seismic two-way travel time sections showing the salt tectonic and their coexistence with faults in Nordkapp basin (after reference [22])

盐底辟等盐构造使巴伦支海的地温梯度出现明显变化, 从而影响水合物稳定带深度和厚度, 巴伦支海平均地热梯度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^{[78]}$, 因为盐的导热性更好, 造成 Nordkapp 盆地在极短距离内的地热梯度变化范围为 $22.8\sim 69\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^{[50]}$, 造成了水合物稳定带厚度在垂向上有 $300\sim 500\text{ m}$ 的变化。盐底辟作用地区地层水的盐度增加, 会出现局部区域水合物形成的压力增加。因此盐底辟作用为烃类气体提供良好通道的同时, 又在地热梯度和地层水盐度上影响水合物稳定带的深度和厚度。

4 结论

(1) 巴伦支海西南部陆架区具备水合物形成的温压条件、气源供给条件、通道运移系统和超压动力来源, 十分适宜水合物聚集成藏。

(2) 调查发现了巴伦支海西南部陆架区大量麻坑、气体羽流、BSR 和游离气等地震标志、气烟囱和气体通道、冷泉碳酸盐岩、海底滑坡以及冷泉生物等与水合物泄漏直接相关的现象, 已发现水合物标志的区域主要集中于巴伦支海西南部 Ringvassøy Loppa 断裂带和 Bjonorena 断裂带附近, 这些断裂主要穿过侏罗纪和三叠纪地层, 将深层热解气向上运移输送至天然气水合物稳定带, 判断西南巴伦支海下部存在气油气系统为上部水合物聚集提供了充足气源, 断裂带成为烃类气体主要运移通道, 但在储层倾斜的条件下, 断层兼具封堵作用和运移作用。

(3) 新近纪巴伦支海经历了强烈的构造抬升和侵蚀作用, 带走了陆架上大量沉积物的同时导致了老断层的活化和新断层的形成, 为深部气源提供了向上运移通道。

(4) 巴伦支海西南部冰期静态冰盖压力和低温非常有利于天然气水合物形成。冰川的前进和消融控制了陆架到大陆斜坡沉积物的侵蚀、搬运和沉积, 也控制了地层中水合物的形成与分解。冰期冰川作用使地层压力增加, 底层水温度降低, 促进了巴伦支海西南部陆架地层中水合物形成和聚集, 水合物稳定带深度变浅、厚度增加; 间冰期冰川消退, 地层压力降低且海底温度增加, 地层中的水合物出现失稳, 储层气体膨胀, 地层形成超压, 烃类气体沿活化断层发生泄漏。

(5) 间冰期巴伦支海西南部水合物大量分解、烃类气体泄漏强度较大, 现在泄漏速率逐渐减缓, 再次已进入平衡期, 但是有下伏油气系统的持续气源供给, 推测巴伦支海西南部水合物储量仍十分可观。现今巴伦支海西南部水合物稳定带受底层水温、地热梯度、盐底辟构造等因素共同影响, 天然气水合物稳定带厚度和深度变化较大。

参考文献:

- [1] Kretschmer K, Biastoch A, Rüpke, La rs, et al. Modeling the fate of methane hydrates under global warming[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2015, 29(5): 610-625.
- [2] Morenno H, Giustiniani M, Tinivella U, et al. The challenges of quantifying the carbon stored in Arctic marine gas hydrate[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 71: 76-82.
- [3] Reeburgh W S. Oceanic methane biogeochemistry[J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107: 486-513.
- [4] Panieri G, Graves C A, James R H, et al. Paleo-methane emissions recorded in foraminifera near the landward limit of the gas hydrate stability zone offshore western Svalbard[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2016, 17: 521-537.
- [5] Tinivella U, Giustiniani M. Gas hydrate stability zone in shallow Arctic Ocean in presence of sub-sea permafrost[J]. *Rendiconti Lincei*, 2016, 27: 163-171.
- [6] Julia C, Nickel J C, Primio R D, Mangelsdorf K, et al. Characterization of microbial activity in pockmark fields of the SW-Barents Sea[J]. *Marine Geology*, 2012, 332/334: 152-162.
- [7] Dmitrenko I A, Kirillov S A, Tremblay L B, et al. Recent changes in shelf hydrography in the Siberian Arctic: potential for subsea permafrost instability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: C10027.

- [8] Parmentier F J W, Christensen T R. Arctic: speed of methane release[J]. *Nature*, 2013, 500: 529.
- [9] Shakhova N, Semiletov I, Salyuk A, et al. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic shelf[J]. *Science*, 2010, 327: 1246-1250.
- [10] Roy S, Senger K, Hovland M, et al. Geological controls on shallow gas distribution and seafloor seepage in an Arctic fjord of Spitsbergen, Norway[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 237-254.
- [11] Vogt P R, Gardner J, Crane K, et al. The Norwegian – Barents – Svalbard continental margin: introducing a natural laboratory of mass wasting, hydrates, and ascent of sediment, pore water, and methane[J]. *Geo-Marine Letters*, 1999, 19: 2-21.
- [12] Boswell R, Rose K, Collett T S, et al. Geologic controls on gas hydrate occurrence in the Mount Elbert prospect, Alaska North Slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 589-607.
- [13] Klizke P, Helbing M L, Schicks J M, et al. Gas hydrate stability zone of the Barents Sea and the Kara Sea region[J]. *Energy Procedia*, 2016, 97: 302-309.
- [14] Bol'shiyanov D Y, Grigor'ev M N, Schneider W, et al. Origin of ice complex rocks on the Laptev Sea coast in the Late Neopleistocene[C]//Problems of Engineering Cryopedology, Proceedings of the 7th International Symposium. Chita, Russia, 2007 (Inst. Merzlotoved., Yakutsk): 14-17.
- [15] Frederick J M, Buffett B A. Effects of submarine groundwater discharge on the present-day extent of relict submarine permafrost and gas hydrate stability on the Beaufort Sea continental shelf[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(3): 417-432.
- [16] Safronova A F, Shitsa E Y, Grigor'ev M N, et al. Formation of gas hydrate deposits in the Siberian Arctic shelf[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, 51(1): 83-87.
- [17] 魏合龙, 孙治雷, 王利波, 等. 天然气水合物系统的环境效应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(1): 1-13.
- [18] 王平康, 祝有海, 赵越, 等. 极地天然气水合物勘探发现状及对中国的启示[J]. *极地研究*, 2014, 26(4): 502-513.
- [19] 王志民, 陈远航. 中俄打造“冰上丝绸之路”的机遇与挑战[J]. *东北亚论坛*, 2018, 126(2): 17-33.
- [20] Nickel J C, Primio D R, Kallmeyer J, et al. Tracing the origin of thermogenic hydrocarbon signals in pockmarks from the southwestern Barents Sea[J]. *Organic Geochemistry*, 2013, 63: 73-84.
- [21] Vadakkepuliambatta S, Chand S, Bünz S. The history and future trends of ocean warming-induced gas hydrate dissociation in the SW Barents Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 835-844.
- [22] Chand S, Mienert J, Andreassen K, et al. Gas hydrate stability zone modeling in areas of salt tectonics and pockmarks of the Barents Sea suggest an active hydrocarbon venting system[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25: 625-636.
- [23] Minshull T A, Moreno H M, Betlem P, et al. Hydrate occurrence in Europe: A review of available evidence[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 735-764.
- [24] Vadakkepuliambatta S, Hornbach M J, Bünz S, et al. Controls on gas hydrate system evolution in a region of active fluid flow in the SW Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 861-872.
- [25] Chand S, Rise L, Ottesen D, et al. Pockmark like depressions near the Goliat hydrocarbon field, Barents Sea: morphology and genesis[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1035-1042.
- [26] Chand S, Rise L, Knies J, et al. Stratigraphic development of the south Vøring margin (Mid-Norway) since Early Cenozoic time and its influence on subsurface fluid flow[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(7): 1350-1363.
- [27] Chand S, Thorsnes T, Brunstad H, et al. Multiple episodes of fluid flow in the SW Barents Sea (Loppa High) evidenced by gas flares, pockmarks and gas hydrate accumulation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 331/332: 305-314.
- [28] Chand S, Knies J, Baranwal S, et al. Structural and stratigraphic controls on subsurface fluid flow at the Veslemøy High, SW Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57: 494-508.
- [29] Lammers S, Suess E, Hovland M. A large methane plume east of Bear Island (Barents Sea): implications for the marine methane cycle[J]. *Geologische Rundschau*, 1995, 84: 59-66.
- [30] Tasianas A, Bünz S, Bellwald B, et al. High-resolution 3D seismic study of pockmarks and shallow fluid flow systems at the Snøhvit hydrocarbon field in the SW Barents Sea[J]. *Marine Geology*, 2018, 403: 247-261.
- [31] Bøe B, Bellec V K, Rise L, et al. Catastrophic fluid escape venting-tunnels and related features associated with large submarine slides on the continental rise off Vesterlen-Troms, North Norway[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 38(1): 95-103.
- [32] Ostanin I, Anka Z, Primio D R, et al. Hydrocarbon plumbing systems above the Snøhvit gas field: Structural control and implications for thermogenic methane leakage in the Hammerfest Basin, SW Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 127-146.
- [33] Ostanin I, Anka Z, Primio R D, et al. Identification of a large Upper Cretaceous polygonal fault network in the Hammerfest basin: Implications on the reactivation of regional faulting and gas leakage dynamics, SW Barents Sea[J]. *Marine Geology*, 2012, 332/334: 109-125.
- [34] Crémière A, Chand S, Diana S, et al. Structural controls on seepage of thermogenic and microbial methane since the last

- glacial maximum in the Harstad Basin, southwest Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 98: 569-581.
- [35] Duran R E, Primio D R, Anka Z, et al. 3D-basin modelling of the Hammerfest Basin (southwestern Barents Sea): A quantitative assessment of petroleum generation, migration and leakage[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 45: 281-303.
- [36] Perez-Garcia C, Safronova P A, Mienert J, et al. Extensional rise and fall of a salt diapir in the Srvestsnaget Basin, SW Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 46: 129-143.
- [37] Pau M, Hammer Ø, Chand S. Constraints on the dynamics of pockmarks in the SW Barents Sea: Evidence from gravity coring and high-resolution, shallow seismic profiles[J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 330-345.
- [38] Bellwald B, Planke S, Ivanova N L, et al. High-resolution landform assemblage along a buried glacio-erosive surface in the SW Barents Sea revealed by P-Cable 3D seismic data[J]. *Geomorphology*, 2019, 332: 33-50.
- [39] Lein A Y, Nemirovskaya I A, Ivanov M V. Isotope composition of organic and carbonate carbon of surface horizons of bottom sediments in the area of the Shtokmanovskoe deposit and "pockmarks field" in the Barents Sea[J]. *Doklady Earth Sciences*, 2012, 446: 1067-1070.
- [40] Løvø V, Elverhøi A, Antonsen P, et al. Submarine permafrost and gas hydrates in the northern Barents Sea[J]. *Norsk Polar-institutt*, 1990, 56: 171.
- [41] Laberg J S, Andreassen K. Gas hydrate and free gas indications within the Cenozoic succession of the Bjornoya Basin, western Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, 13(8): 921-940.
- [42] Rajan A, Bünz S, Mienert J, et al. Gas hydrate systems in petroleum provinces of the SW-Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 46: 92-106.
- [43] Ligtienberg H, Connolly D. Chimney detection and interpretation, revealing sealing quality of faults, geohazards, charge of and leakage from reservoirs[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2003, 78/79: 385-387.
- [44] Gac S, Klitzke P, Minakov A, et al. Lithospheric strength and elastic thickness of the Barents Sea and Kara Sea region[J]. *Tectonophysics*, 2016, 691: 120-132.
- [45] Faleide J I, Bjørlykke K, Gabrielsen R H. Geology of the Norwegian Continental Shelf [M]// Bjørlykke K. (Ed.), *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics*. Berlin: Springer, 2010: 467-499.
- [46] Gernigon L, Brønner M, Roberts D, et al. Crustal and basin evolution of the southwestern Barents Sea: From Caledonian orogeny to continental breakup[J]. *Tectonics*, 2014, 33: 347-373.
- [47] Ryseth A, Auguston J H, Charnock M, et al. Cenozoic stratigraphy and evolution of the Srvestsnaget Basin, southwestern Barents Sea[J]. *Norway Journal of Geology*, 2003, 83: 107-130.
- [48] Dimakis P, Braathen B I, Faleide J I, et al. Cenozoic erosion and the preglacial uplift of the Svalbard-Barents Sea region[J]. *Tectonophysics*, 1998, 300: 311-327.
- [49] Ferré B, Mienert J, Feseker T. Ocean temperature variability for the past 60 years on the Norwegian-Svalbard margin influences gas hydrate stability on human time scales[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: C10017.
- [50] Bugge T, Elvebakk G, Fanavoll S, et al. Shallow stratigraphic drilling applied in hydrocarbon exploration of the Nordkapp Basin, Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19: 13-37.
- [51] Boitsov S, Petrova V, Jensen H K B, et al. Petroleum-related hydrocarbons in deep and subsurface ediments from South-Western Barents Sea[J]. *Marine Environmental Research*, 2011, 71(5): 357-368.
- [52] 顾兆峰, 刘怀山, 张志珣. 浅层气逸出到海水中的气泡声学探测方法[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(2): 129-135.
- [53] 梅 赛, 赵铁虎, 杨 源, 等. 甲烷羽状流水体声学探测及气体运移通量测算[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(3): 53-59.
- [54] 赵铁虎, 张训华, 冯 京. 海底油气渗漏浅表层声学探测技术[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(6): 149-156.
- [55] 陈江欣, 关永贤, 宋海斌, 等. 麻坑、泥火山在南海北部与西部陆缘的分布特征和地质意义[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 919-938.
- [56] 李双林, 董贺平, 肖 菲. 海底烃类渗漏的地球物理识别[J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(11): 14-21.
- [57] 龚建明, 廖 晶, 尹维翰, 等. 北印度洋马克兰增生楔天然气水合物的成藏模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(2): 148-155.
- [58] Chow J, Lee J S, Sun R, et al. Characteristics of the bottom simulating reflectors near mud diapirs: offshore southwestern Taiwan[J]. *Geo-Marine Letters*, 2000, 20: 3-9.
- [59] 吴能友, 孙治雷, 卢建国, 等. 冲绳海槽海底冷泉-热液系统相互作用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(5): 23-35.
- [60] 李 鑫, 曹 红, 耿 威, 等. 碳酸盐晶格硫研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(3): 119-131.
- [61] Orphan V J, Hinrichs K U, Ussler III W, et al. Comparative analysis of methane-oxidizing archaea and sulphate-reducing bacteria in anoxic marine sediments[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67: 1922-1934.
- [62] Knies J, Matthiessen J, Vogt C, et al. The Plio-Pleistocene glaciation of the Barents Sea-Svalbard region: a new model based on revised chronostratigraphy[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(9/10): 812-829.
- [63] Svendsen J I, Alexanderson H, Astakhov V I, et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(11/13): 1229-1271.
- [64] Ottesen D, Dowdeswell J A, Rise L. Submarine landforms and

- the reconstruction of fast-flowing ice streams within a large Quaternary ice sheet: the 2500-km-long Norwegian-Svalbard margin (57°-80°N)[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(7/8): 1033-1050.
- [65] Andreassen K, Laberg J S, Vorren T O. Seafloor geomorphology of the SW Barents Sea and its glaci-dynamic implications[J]. *Geomorphology*, 2008, 97(1/2): 157-177.
- [66] Winsborrow M C M, Andreassen K, Corner G D, et al. Deglaciation of a marine-based ice sheet: late Weichselian palaeo-ice dynamics and retreat in the southern Barents Sea reconstructed from onshore and offshore glacial geomorphology[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(3/4): 424-442.
- [67] Rùther D C, Mattingsdal R, Andreassen K, et al. Seismic architecture and sedimentology of a major grounding zone system deposited by the Bjørnøyrenna Ice Stream during Late Weichselian deglaciation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 30(19/20): 2776-2792.
- [68] Laberg J S, Andreassen K, Knies J, et al. Late Pliocene-Pleistocene development of the Barents sea ice sheet[J]. *Geology*, 2010, 38(2): 107-110.
- [69] Cavanagh A J, Primio D R, Wenderoth S M, et al. Severity and timing of Cenozoic exhumation in the southwestern Barents Sea[J]. *Journal of the Geological Society*, 2006, 163(5): 761-774.
- [70] Nisbet E G. Have sudden large releases of methane from geological reservoirs occurred since the Last Glacial Maximum, and could such releases occur again?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2002, 360(1793): 581-607.
- [71] Green P F, Duddy I R. Synchronous exhumation events around the Arctic including examples from Barents Sea and Alaska North Slope[C] //Vining B A, Pickering S C (Eds.), *Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference*. Petroleum Geology Conference Series, Geological Society, London, 2010, 7: 633-644.
- [72] Talleraas E. The Hammerfest Basin-an Aulacogen?[J]. *Proceedings, Norwegian Sea Symposium Norwegian Petroleum Society*, 1979, 18: 1-13.
- [73] Solheim A, Kristoffersen Y. The physical environment Western Barents Sea, 1: 500000. Sediments above the upper regional unconformity: thickness, seismic stratigraphy and outline of the glacial history[J]. *Norsk Polarinsittut Skrifter*, 1984, 179: 1-26.
- [74] Faleide J I, Gudlaugsson S T, Jacquart G. Evolution of the western Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1984, 1: 123-150.
- [75] Cartwright J, Huuse M, Aplin A. Seal bypass systems[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(8): 1141-1166.
- [76] Sloan E D. *Clathrate Hydrates of Natural gases*[M]. New York: Marcel Dekker, 1990.
- [77] Ruppel C, Dickens G R, Castellini D G, et al. Heat and salt inhibition of gas hydrate formation in the northern Gulf of Mexico[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L04605.
- [78] Laberg J S, Andreassen K, Knutsen S M. Inferred gas hydrate on the Barents Sea shelf a model for its formation and a volume estimate[J]. *Geo-Marine Letters*, 1998, 18: 26-33.

INFLUENCE FACTORS FOR GAS HYDRATE FORMATION AND DECOMPOSITION IN SOUTHWEST BARENTS SEA: A REVIEW

GENG Wei^{1,2}, SUN Zhilei^{1,2*}, WU Nengyou^{1,2}, CAO Hong^{1,2}, ZHANG Xilin^{1,2}, WANG Libo^{1,2},
ZHANG Xianrong^{1,2}, XU Cuiling^{1,2}, ZHAI Bin^{1,2}

(1 Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; 2 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China)

Abstract: There are abundant petroleum and gas hydrate resources in the Arctic, which is also an important window to the study of global environmental change. A large number of methane leakage activities have been found in the southwest Barents Sea. This contribution is devoted to a review of published literatures from previous investigations, so as to sum up the resource indicators, leakage characteristics and spatial distribution of gas hydrate found on the continental shelf of the southwest Barents Sea, reveal the controlling factors of gas hydrate formation and decomposition and evaluate the resource potential of gas hydrate. It is important to ascertain the hydrate resources in and around the Barents Sea to enhance China's voice in Arctic affairs, put forward the research on global climate change and develop the geological theory on gas hydrate reservoirs in high-latitude waters.

Key words: gas hydrate; Barents Sea; fluid leakage; glaciation