

尼日尔三角洲前缘挤压带的古今BSRs分布特征

杨金秀¹,宋朋霖¹,何巍巍²,王红亮³,王 民¹,肖佃师¹

[1. 中国石油大学(华东) 深层油气重点实验室, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油 勘探开发研究院 西北分院, 甘肃 兰州 730020;
3. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083]

摘要:本文通过对尼日尔三角洲前缘挤压带的三维地震资料进行解释和属性提取,结合BSR数值模拟,分析了与天然气水合物相关的古今BSRs的分布特征及其发生垂向运移的主控因素。古今BSRs分别代表了天然气水合物稳定底界过去和现今的位置,在研究区古今BSRs均分散分布且主要位于褶皱带断层、气烟囱或者底辟构造等流体运移通道发育的地区,反映了流体运移条件对BSR的形成具有控制作用。古BSRs的反射特征较现今BSR弱,分布范围也更局限,其振幅特征可能是由先前存在的天然气水合物所导致的成岩作用引起的。现今BSR深度与海底深度呈正相关,但水合物稳定区厚度随海底深度的增加变化不大,约为425 m。BSR在地质历史时期的垂向迁移是诸多因素综合作用的结果。尼日尔三角洲挤压带的构造活动强烈且目的层沉积速率较高,深部热流也可沿断层、底辟等通道运移至浅部;下伏地壳是洋壳和过渡壳,大地热流值较高,且海相泥页岩热封盖能力强,这些条件均有利于BSR的向上迁移。另外,研究区的高饱和度水合物层表现为BSR上部的正极性、强振幅异常,主要位于气烟囱和背斜顶部,指示了流体运移通道对水合物成藏的控制作用。研究区BSR下伏游离气FGZs发育较为局限,仅在褶皱带流体运移通道发育的位置发育较薄的FGZs。

关键词:BSR;地震解释;流体运移;天然气水合物;尼日尔三角洲

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Distribution pattern of paleo and present BSRs in the toe-thrust belt of Niger Delta front

Yang Jinxiu¹, Song Penglin¹, He Weiwei², Wang Hongliang³, Wang Min¹, Xiao Dianshi¹

[1. Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;
2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou, Gansu 730020, China;
3. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: Interpretation of 3D seismic data from the compression domain of Niger Delta, related seismic attribute extraction and BSR numerical modelling are carried out in this paper to study the seismic characteristics of the present and paleo-bottom simulating reflections (BSRs), and the controlling factors of BSR vertical migration. In the study area, the present and paleo-BSRs, representing present previous and locations of the base of gas hydrate stability zones (GHSZ), are scattered and mainly located in areas with well-developed fluid pathways including folding faults, gas chimneys, and diapire structures. This indicates that fluid migration conditions control the occurrence of BSR. Compared with the present BSR, the paleo-BSRs are of weaker amplitude, and distributed in much more limited areas. The amplitude of the paleo-BSRs is interpreted to represent petrophysical interfaces caused by diagenesis driven by previous gas hydrate. The depth of the present BSR deepens as the seabed water depth increases, but the thickness of GHSZ is relatively stable, about 425 m. The upward resetting of the BSR is a result jointly contributed by various factors in the geological history. The toe-thrust belt of the Niger delta is characterized by intense tectonic activities, high sedimentary rate, and well developed fluid migration pathways, including fault and diapire, for heat flows from deep to shallow. Besides, the underlying oceanic and

收稿日期:2018-12-10;修订日期:2019-07-31。

第一作者简介:杨金秀(1984—),女,博士、讲师,油气地质和天然气水合物。E-mail: yangjinxiu@upc.edu.cn。

基金项目:山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2019QD013);中央高校基本科研业务费专项资金项目(19CX02003A);国家自然科学基金项目(41406050);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2014HZ001)。

transitional crusts allow higher heat flows, and marine mudstones have higher heat sealing capacity. All these are driving the upward resetting of the BSR. In addition, higher gas hydrate saturation formations in the study area feature higher amplitude anomalies on the present, upper BSR with positive polarity, mainly on top of anticlines and gas chimneys, indicating the effective control of fluid migration pathways on gas hydrate accumulation. The occurrence of free gas zones (FGZs) underlying the present BSR is limited, and only thin FGZs occurred in fold belts with well-developed fluid migration pathways.

Key words: bottom simulating reflection (BSR), seismic interpretation, fluid migration, gas hydrate, Niger Delta

天然气水合物简称水合物,近年来受到了全世界很多学者的关注^[1-4]。水合物作为资源量丰富的未来洁净新能源,由于其不稳定性 and 甲烷的强温室效应,还可能对海底滑坡、全球气候变化以及海洋生态等造成一定影响。水合物主要存在于低温、高压条件下,通常分布于海底至埋深几百米的浅层沉积物中^[2,5-6]。在天然气水合物的地震研究中,一般将地震剖面上的似海底反射层 BSR (bottom simulating reflection) 作为天然气水合物存在的主要地震标志,它代表了天然气水合物稳定区的底界 BHSZ (base of gas hydrate stability zone)^[2,7]。BSR 在地震上表现为强振幅、负极性、斜切等时地层等特征,其发育位置主要受天然气水合物稳定条件控制,包括温度、压力、盐度和气体组分等因素,此外还受储层沉积物物理性质的影响^[3,8-10]。天然气水合物稳定条件的变化会造成 BHSZ 在垂向上的迁移,在地震资料上表现为 BSR 的上下移动。

除与天然气水合物相关的现今 BSR 外,研究人员还在日本海域的南海海槽、俄勒冈近海的水合物脊、黑海和挪威大陆边缘等地区发现了古 BSR (或残余 BSR)、双 BSR,以及多 BSRs 等 BSR 类型^[10-14]。综合前人研究认为,按照 BSR 个数可将 BSR 分为单 BSR、双 BSRs 和多 BSRs 等类型;而按照成因可将 BSR 分为与天然气水合物相关的 BSR (包括现今 BSR 和古 BSRs) 和与成岩作用相关的 BSR。其中,与天然气水合物相关的现今 BSR 也可出现双个或多个,例如在挪威大陆边缘,双 BSRs 分别是由 I 型和 II 型天然气水合物的稳定底界所造成,较深的 BSR 代表了较重烃类所形成的 II 型水合物的稳定底界^[10-11]。II 型水合物的稳定温度界限较高,因此其深度比 I 型甲烷水合物的稳定底界要深,这两个 BSRs 之间游离气和 II 型水合物共存。

与天然气水合物相关的古 BSRs 代表了 BHSZ 迁移前的位置,是由天然气水合物稳定条件的变化造成的,如沉积、剥蚀、褶皱与底辟等作用^[7,12,15]。目前地震研究中的古 BSRs 大多位于现今 BSR 附近,在深部地层并不可见。这可能是由于发育古 BSRs 的地层随着埋深的增大而发生了压实、成岩、变质,甚至受构造

运动等作用而遭到破坏,因此深部地层古 BSRs 的痕迹并未保留下来。与成岩作用相关的 BSR 通常具有正极性,成岩作用所需温度比天然气水合物的温度稳定界限要高,因此深度也比天然气水合物相关的 BSR 要深,且此类 BSR 距离海底的深度比较固定,有时甚至会随着海底水深的增加而变浅^[14]。

综上,本文利用尼日尔三角洲前缘挤压带的三维地震资料,通过地震解释和数值模拟,研究天然气水合物系统的古今 BSR 分布特征,以及天然气水合物稳定底界在地质历史时期的垂向迁移过程及主控因素。通过以上研究,可以掌握天然气水合物稳定区 (GHSZ: gas hydrate stability zone) 随地质过程的垂向动态响应,认识地质历史时期随水合物生成和分解发生的碳循环过程,有助于客观认识水合物在全球碳循环中所起的双重作用,一方面,水合物作为缓冲器束缚了甲烷气体,防止其进入海水和大气中;另一方面当其分解时,烃类气体可能会从岩石圈进入水圈和大气圈,引起环境和气候效应。

1 地质背景

尼日尔三角洲位于中非西部的被动大陆边缘,是世界上最大的海退型三角洲,位于泛非断裂与中非转换断层的三联点 (图 1)^[16-17]。尼日尔三角洲盆地在早白垩世开始发育,是尼日利亚油气最富集的三角洲盆地。盆地分为两个演化阶段,早白垩世—晚白垩世桑顿期的裂谷阶段和晚白垩世坎佩尼期的漂移漂移 (图 2)^[17]。海相沉积物开始沉积于南大西洋扩张后的阿尔必期^[18-19],到第三纪时期,尼日尔三角洲在尼日尔—贝努埃 (Niger-Benue) 河口处扩张至大西洋,真正的三角洲沉积始于晚古新世—始新世,沉积物在现今三角洲区域的北翼开始充填基底地垒断块之间的构造洼槽。中新世是尼日尔三角洲一个重要的时期,由于快速沉积和泥岩欠压实,形成了一系列与重力作用相关的构造类型如生长断层、滚动背斜、泥底辟和逆冲褶皱构造等^[16-24]。

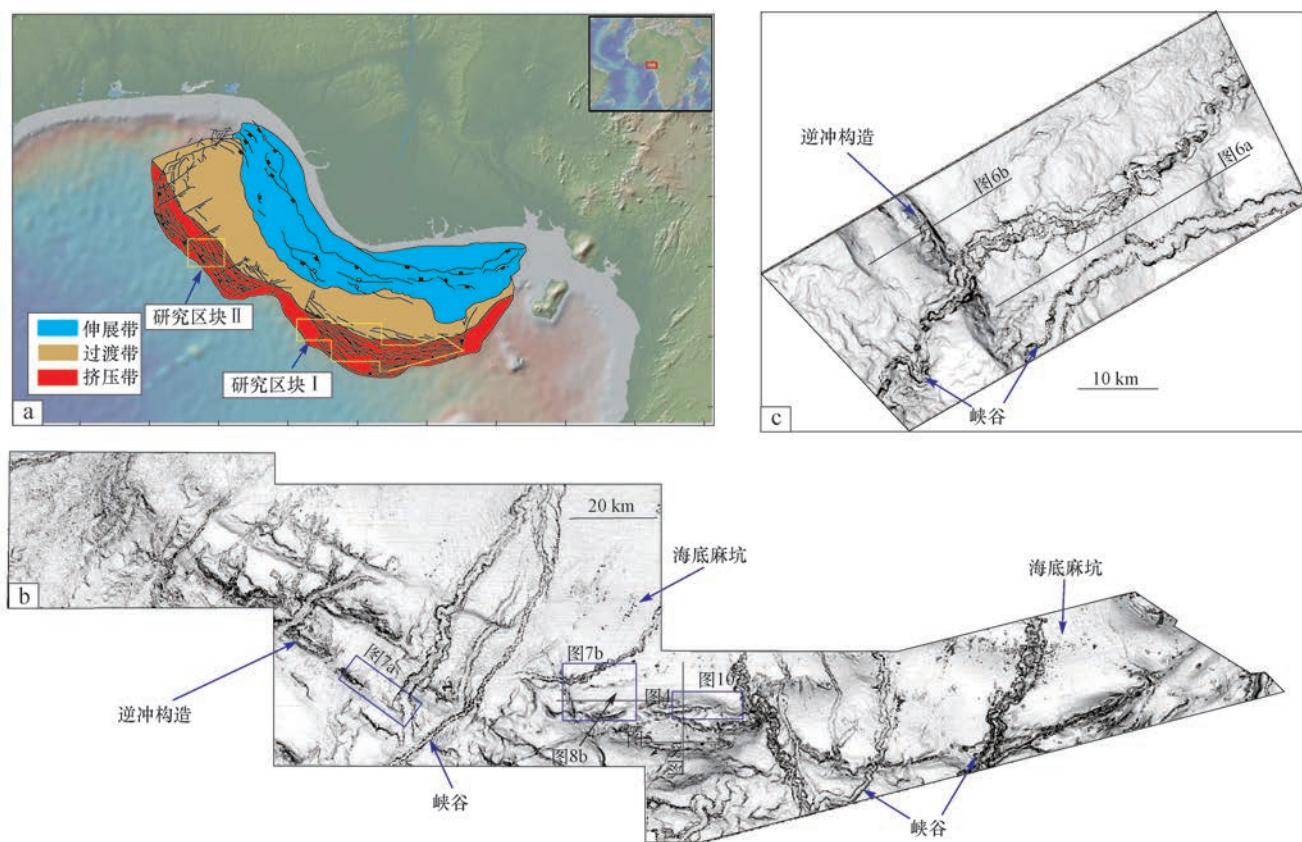


图1 尼日尔三角洲构造带及研究区位置

Fig. 1 Locations of the Niger Delta structural zone and the study area

a. 研究区位置; b. 研究区块 I 海底倾角属性平面图; c. 研究区块 II 海底倾角属性平面图

尼日尔三角洲的沉积地层主要为新生界,包括海相的 Akata 组,海陆过渡相的 Agbaba 组和陆相的 Benin 组,最大沉积厚度可达 12 km (图 2)^[18,20]。据前人研究,研究区主要的烃源岩为 Akata 组泥岩,而主要的储层为 Agbaba 组的砂岩^[20-24]。受区域构造应力场、大陆坡重力和泥岩超压等影响,尼日尔三角洲构造特征具有明显的分区性,由陆向海可分为伸展带、过渡带和挤压带 3 个构造带 (图 1)^[18-19,21]。研究区位于尼日尔三角洲前缘挤压带,下伏地壳类型是洋壳、过渡壳,大地热流值较高,且海相泥页岩热封盖能力强,故挤压带地温梯度值较高^[17]。

2 数据与方法

本文使用位于尼日尔三角洲前缘挤压带的两套三维地震数据,研究区块 I 和研究区块 II,其分布面积分别约为 9 880 和 1 700 km² 的面积,水深范围为 1 300 ~ 4 300 m (图 1)。三维地震数据采集于 2004 年,对地震子波进行了零相位化处理,以及 Kirchhoff 弯曲射线叠前时间偏移。地震数据的面元为 12.5 m × 18.75 m,

主频为 50 Hz,地震资料的垂向分辨率约为 10 m,这相当于主频波长的 1/4。本文研究利用 Landmark 工作站进行地震解释、视极性属性和振幅属性提取等方面的研究,综合分析了天然气水合物系统的古今 BSR 反射特征及其控制因素。在地震剖面上,地震反射层由红色同相轴和下部紧挨着的黑色同相轴组成,代表向下波阻抗的增大,如海底。视极性属性为振幅包络峰值处地震道的极性,可以辅助分析振幅异常的品质^[14]。例如,含气沉积物和周边沉积物相比通常具有较低的波阻抗,因此含气地层的顶部通常具有负极性。

另外,本次研究还通过选择 Moridis (2003) 的纯甲烷天然气水合物在 35 psu 盐度下的相平衡稳定曲线,对研究区天然气水合物稳定底界 BHSZ (地震资料上表现为 BSR) 进行了数值模拟^[25]。世界大洋数据库 World Ocean Database (WOD) 数据表明,研究区的盐度值约为 35 psu (图 3)。纯甲烷天然气水合物在 35‰ 盐度下的相平衡相平衡公式如下:

$$\ln P = a + bT + cT^2 + dT^3 + fT^4 + gT^5 \quad (1)$$

式中: p 和 T 分别为甲烷水合物的稳定压力条件和稳定温度条件, a, b, c, d, f, g 为经验常数,分别为

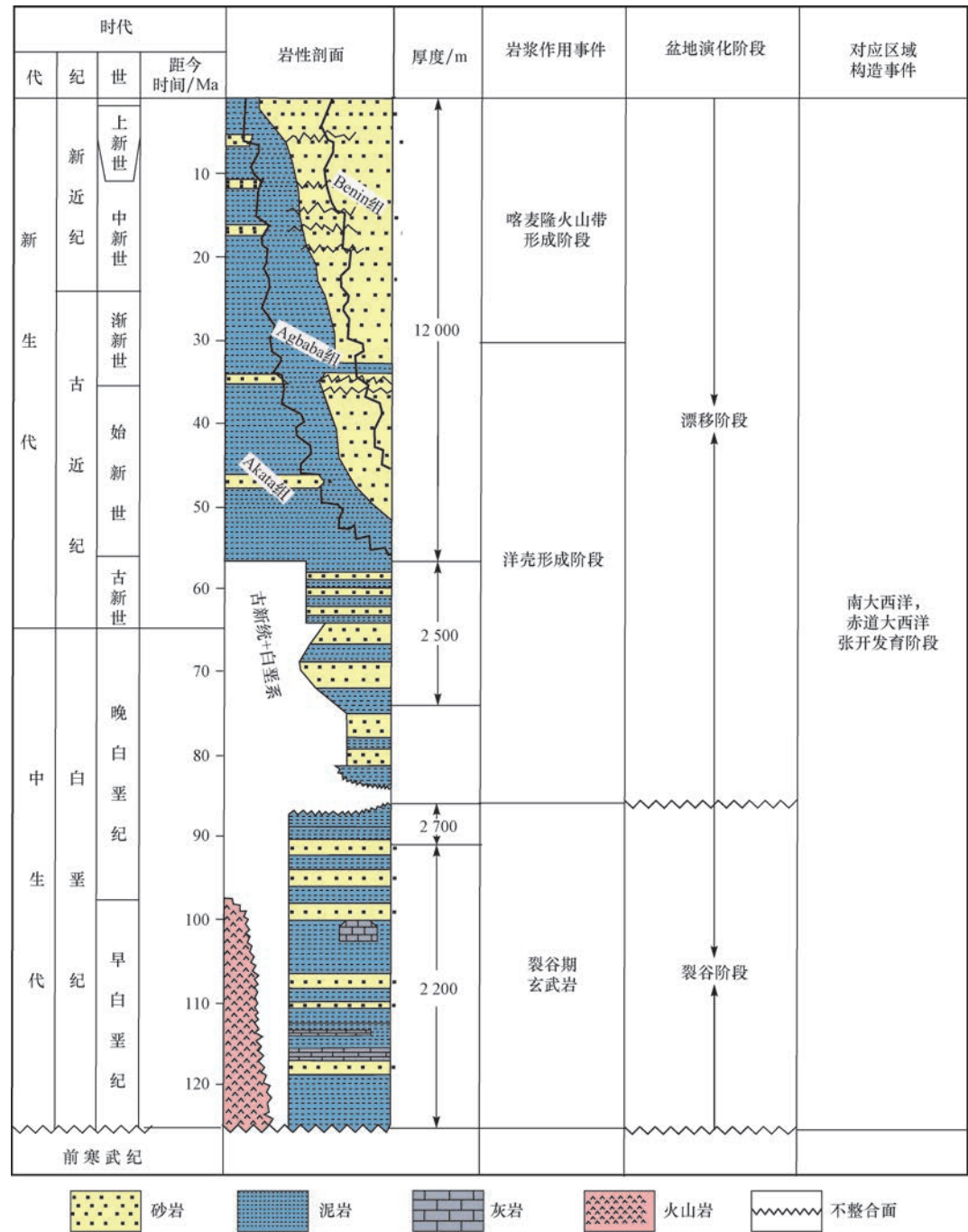


图2 尼日尔三角洲地层综合柱状图^[17]

Fig.2 Composite geological column of the Niger Delta^[17]

a. 研究区位置;b. 研究区块 I 海底倾角属性平面图;c. 研究区块 II 海底倾角属性平面图

$$a = -1.941\ 385\ 044\ 645\ 60 \times 10^5,$$
$$b = 3.310\ 182\ 133\ 979\ 26 \times 10^3,$$
$$c = -2.255\ 402\ 644\ 938\ 06 \times 10^1,$$
$$d = 7.675\ 591\ 177\ 870\ 59 \times 10^{-2},$$
$$f = -1.304\ 658\ 297\ 887\ 91 \times 10^{-4},$$
$$g = 8.860\ 653\ 166\ 875\ 7 \times 10^{-8}.$$

由于水合物稳定底界的深度较浅,本次模拟假设地震剖面上 BSR 发育深度处的压力值为静水压力,压力可

通过以下公式求取:

$$p_{\text{bsr}} = \rho_{\text{sw}} g H_{\text{bsr}} \tag{2}$$

式中: ρ_{sw} 为海水密度,为 $1\ 028\ \text{kg/m}^3$; g 是重力加速度,为 $9.81\ \text{m/s}^2$; H_{bsr} 是 BSR 的深度值,可通过下面公式求得:

$$H_{\text{bsr}} = V_{\text{sb}} \times TWT_{\text{sb}}/2 + V_{\text{sed}} (TWT_{\text{bsr}} - TWT_{\text{sb}})/2 \tag{3}$$

式中: V_{sed} 为沉积物地震波速度,为 $1\ 700\ \text{m/s}$; V_{sw} 为海水

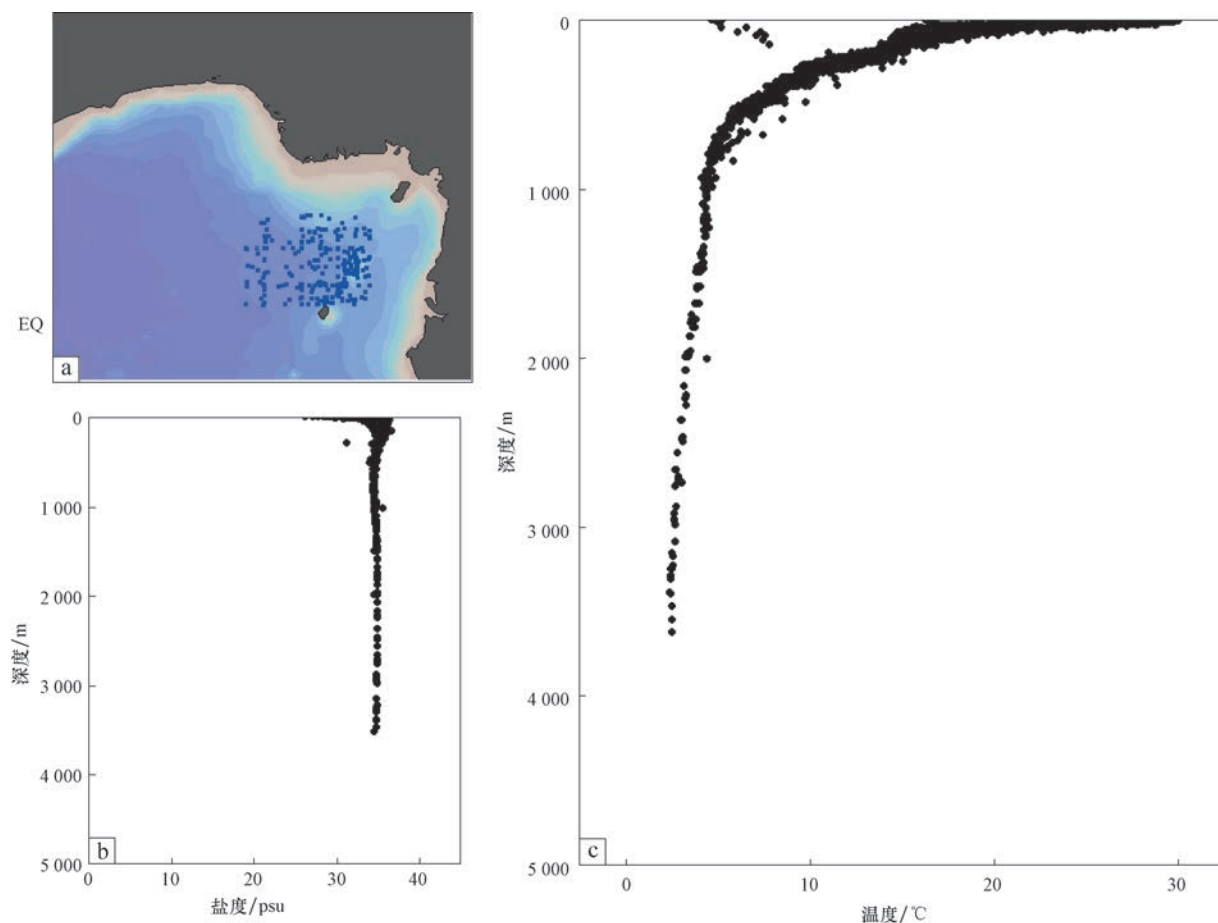


图3 尼日尔三角洲世界大洋数据

Fig. 3 The Niger Delta in the World Ocean Database (WOD)

a. 研究区世界大洋数据点位置; b. 盐度散点图; c. 温度散点图^[26]

地震波速度, 为 1 500 m/s; TWT_{bsr} 和 TWT_{sb} 分别为 BSR 和海底的双程走时, 单位是 s, 可通过地震剖面读取。地震剖面上的温度分布可由下面公式求取:

$$T_H = T_{sb} + GG \times H \quad (4)$$

式中: T_H 为海底以下 H 米深处的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{sb} 为海底的温度值, $^{\circ}\text{C}$, 可通过 WOD 查询 (图 3); GG 为地温梯度值, $10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。通过设定不同的地温梯度, 将模拟 BSR 与观测 BSR 进行对比, 拟合程度高则代表了所选地温梯度较符合实际。

3 结果与讨论

3.1 现今 BSR 地震反射特征与分布

本文利用地震和视极属性特征来识别与水合物相关的 BSR。研究区的现今 BSR 表现为大致平行于海底、斜切等时地层以及具有强振幅和负极性地震特征 (图 4, 图 5)。现今 BSR 的强振幅和负极性是由含天然气水合物沉积物和下部含游离气沉积物之间明显的波

阻抗差决定的, 代表了天然气水合物和游离气之间的相界面, 主要受温压条件控制^[27-29]。研究区现今 BSR 的埋藏深度为海底以下约 500 ms (双程走时 TWT ; two way travel time), 假设沉积物的地震波速度为 1 700 m/s, 则 BSR 的深度约为 425 mbsf (meters below sea floor)。现今 BSR 主要分布在水深大于 1 800 ms (双程走时) 的区域, 假设海水的的海地震波速度为 1 500 m/s, 则水深大于 1 350 m。

与毛里塔尼亚滨海地区 (offshore Mauritania)、水合物脊 (Hydrate Ridge) 和 Storegga 滑坡 (Storegga Slide) 等地 BSR 连续分布的案例不同, 研究区的现今 BSR 分布呈分散状, 主要位于褶皱-逆冲推覆构造带附近^[2,8]。根据地震解释结果, 现今 BSR 在平面上的分布面积总共约 670 km^2 , 约占工区面积的 7%^[28]。在研究区, BSR 大多分布在断层、气烟囱或者底辟构造等流体运移通道发育的地区, 反映了流体运移条件对 BSR 的形成具有重要作用, 为水合物系统提供了气源。在褶皱地区, 现今 BSR 向上拱起并通常与根部较深的断层伴生, 可能是因为褶皱带的断层等通道向上疏导了深处热流体, 影响了

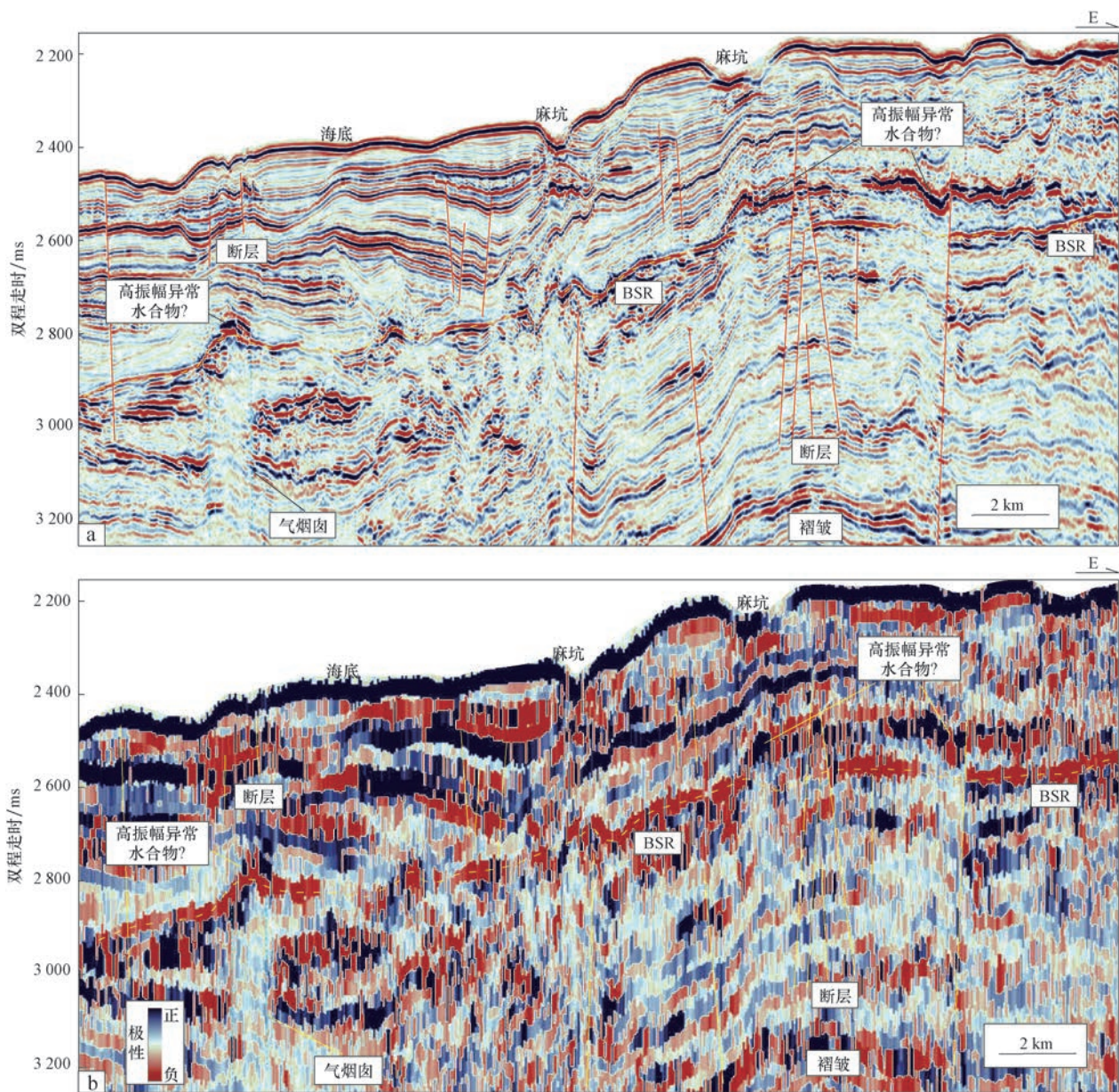


图4 尼日尔三角洲南北向地震剖面及对应属性剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 4 The N-S seismic section of the Niger Delta and its corresponding attribute section

a. 地震剖面上的现今BSR特征; b. 视极性属性剖面上的现今BSR特征

水合物稳定条件,导致BSR上拱(图4,图5,图6)。而在气烟囱发育的地区,也可见现今BSR的局部上拱,这可能是由气烟囱带来的热流异常所造成(图4,图5)^[29]。

图5a为未解释的位于尼日尔三角洲前缘挤压带的地震剖面,可见明显的斜切等时地层的反射层,其下可见高振幅反射异常。经地震解释,发现除BSR下部发育小范围的游离气区(FGZs; free gas zones)外,其上下地层还发育断层和气烟囱(图5b)。而对该地震剖面进行的BSR数值模拟结果表明,地温梯度设置为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,模拟预测的BSR位置与地震剖面上的观测BSR拟合程度最高,说明目前研究区较高

的地温梯度条件(图5b)。图中绿色实线代表间隔为 5°C 的温度等值线。

图6显示了尼日尔三角洲前缘挤压带北部两条地震剖面的BSR数值模拟结果,该模拟结果与图5的模拟结果一致,当地温梯度设置为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时,模拟预测的BSR位置与地震剖面上的观测BSR拟合程度最高。由图可见,该地区BSR下部的游离气区FGZs发育规模也较小,在挤压背景下形成的背斜褶皱带伴生了大量的断层和气烟囱等垂向流体运移通道(图6a,b)。通常,海底和BSR之间的区域被认为是水合物稳定区,因此水合物稳定区厚度即可通过计

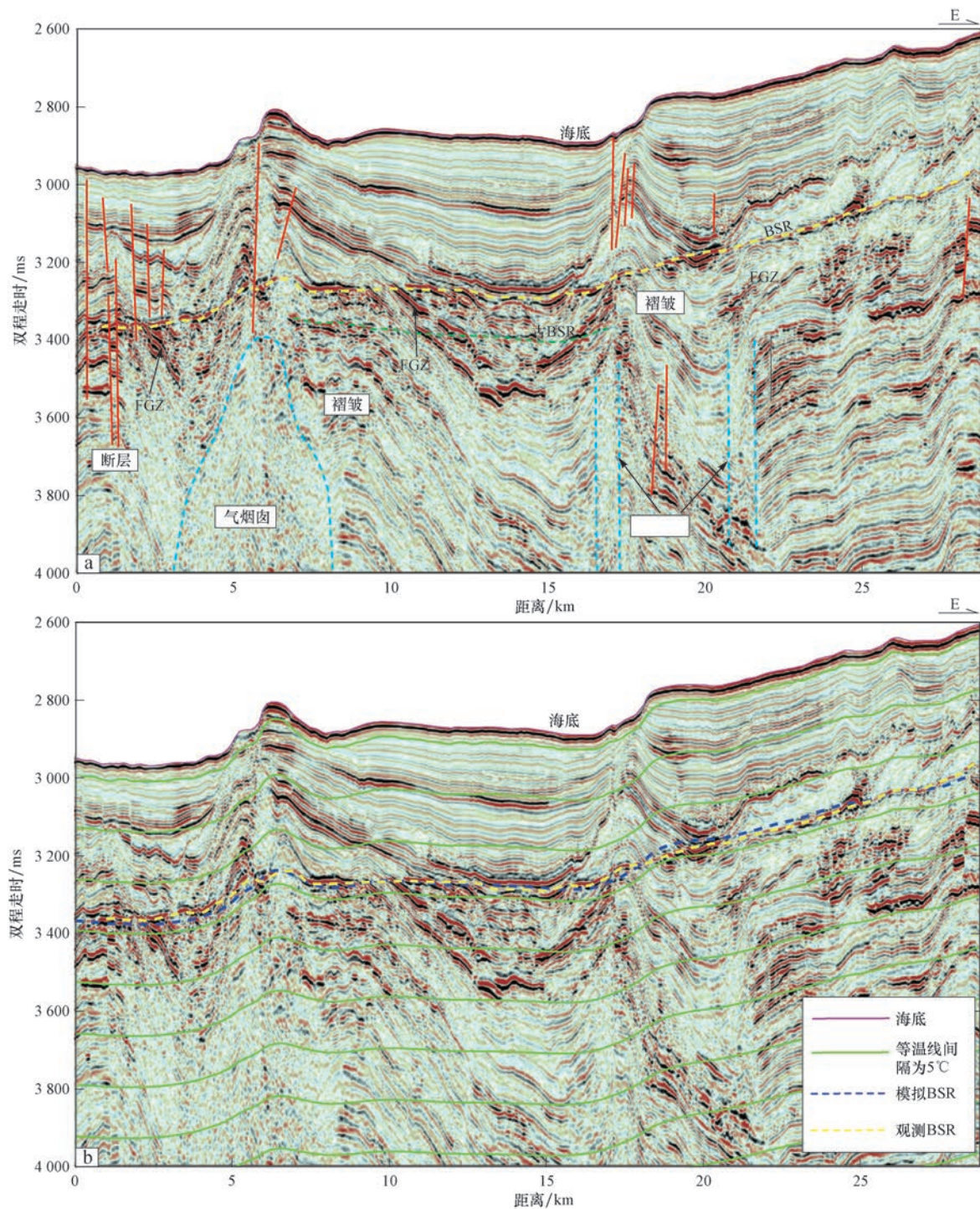


图 5 尼日尔三角洲南部前缘带东西向地震剖面及 BSR 数值模拟结果(剖面位置见图 1b)

Fig. 5 The E-W seismic section of the deformation front of the southern Niger Delta, and the numerical modelling result of the BSRs

a. 地震剖面显示现今 BSR、古 BSR、气烟囱、断层和褶皱等解释结果;b. 该地震剖面在地温梯度为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时的现今 BSR 数值模拟结果

算 BSR 深度与海底深度之差求取。本次研究绘制了 BSR 深度和水合物稳定区厚度随海底深度变化的散点图(图 6c)。由图可知,北部研究区的水深较大,大于 3 100 m,BSR 深度与海底深度呈正相关,随海底深度

的增加而变深。但随海底深度的增加,水合物稳定区厚度变化不大,约为 500 ms (双程走时 TWT : two way travel time),假设沉积物的地震波速度为 1 700 m/s,则约为 425 m。

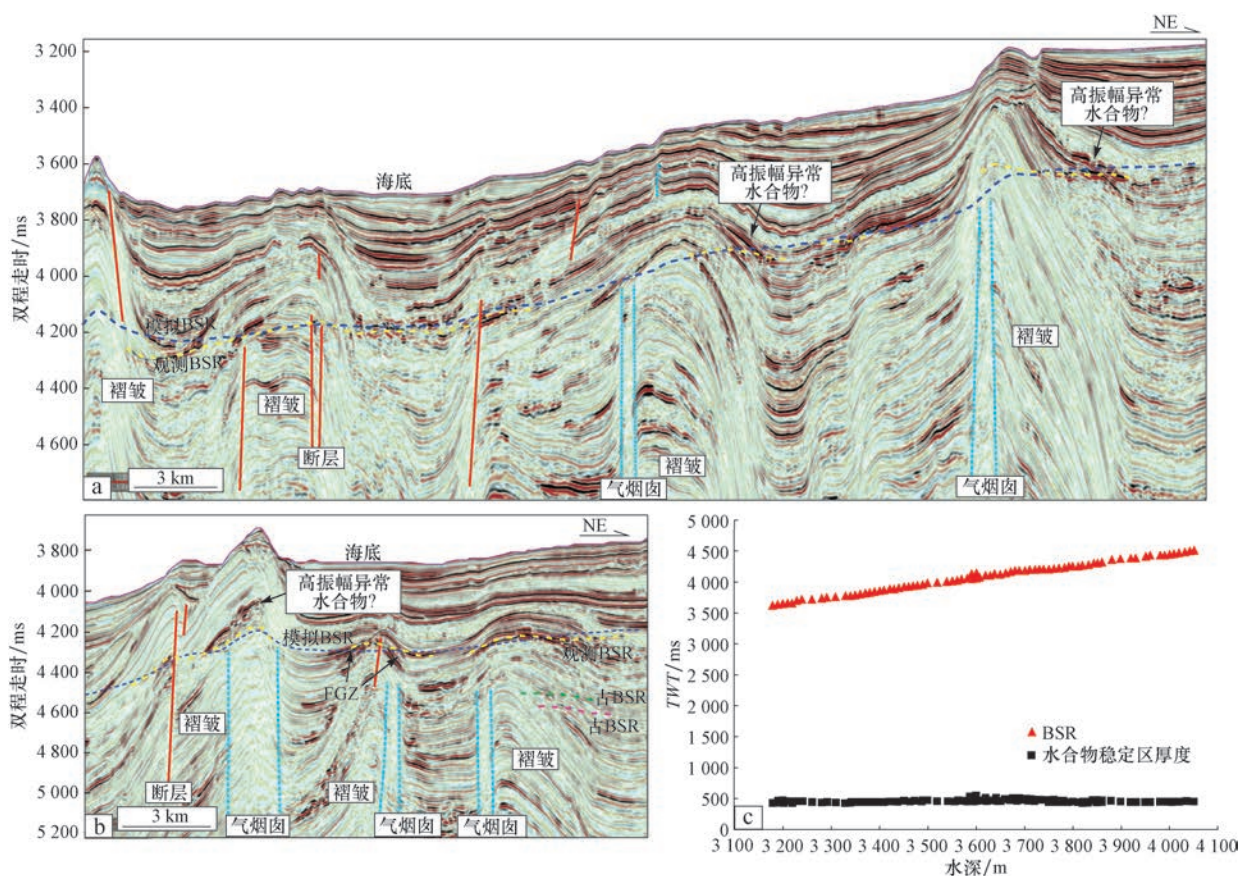


图6 尼日尔三角洲西部前缘带地震剖面 and BSR 模拟深度及水合物稳定区厚度(剖面位置见图1c)

Fig.6 The seismic section of the deformation front of the western Niger Delta, and the map showing the BSR depth in numerical modelling and the thickness of the hydrate stable zones

a. 地震剖面 a 在地温梯度为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C/m}$ 时的现今 BSR 数值模拟结果; b. 地震剖面 b 在地温梯度为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C/m}$ 时的现今 BSR 数值模拟结果; c. a, b 剖面上模拟 BSR 深度和 GHSZ 厚度随海底水深的变化曲线

3.2 古 BSRs 地震反射特征与分布

除现今 BSR 外,研究区还发现多个古 BSRs,主要分布在褶皱地区的背斜缓翼(图7,图8)。古 BSRs 大多位于现今 BSR 下部,垂向分布范围大概为现今 BSR 至 200 m 以深的范围。

研究区的古今 BSRs 不是连续的地震反射,而是表现为振幅终止点的连线^[30]。古今 BSRs 均斜切等时地层,在地震剖面上,古今 BSRs 与地层的相交表现为交点;在三维空间,该相交表现为交线^[30]。其中,现今 BSR 与地层相交处振幅较强且可见相位反转(图7c,d)。本次研究选择古今 BSRs 较发育的两个区块,分别对斜切古今 BSRs 的 A 和 B 两个层位进行了地震解释,绘制出反映古今 BSRs 分布特征的振幅属性平面图(图7a,b)。A 层位的振幅平面图显示了 7 个古 BSRs(图7a),B 层位的振幅平面图在西部有 4 个古 BSRs,而到东部增加到了 10 个古 BSRs(图7b)。其中,有区域可对比的古 BSRs,可能主要受区域性的天然气水合

物热稳定条件的影响;也有局部的古 BSRs,区域上不连续,主要受局部热异常条件或储层物性条件的控制。在地震剖面上,古 BSRs 也具有大致平行于海底、斜切等时地层以及具有负极性的特征,与现今 BSR 的区别在于古 BSRs 的反射特征较弱,并且不连续,分布范围也比现今 BSR 更局限。在相关地层的振幅平面图中,古 BSRs 表现为平行分布的直线或曲线,延伸长达数十千米,可用现今 BSR 作为参照来识别振幅较弱的古 BSRs(图5ab)。如图6c所示,背斜翼部的古 BSRs 被较为连续的弱反射层隔开,推测该连续的弱反射层可能代表了低孔隙度的细粒沉积物地层,其低孔隙度阻碍了天然气水合物和游离气的存在,因此未形成古今 BSRs。

通过调查大量的地震剖面,认识到古 BSRs 大多位于现今 BSR 下部,与现今 BSR 大致平行,具有较弱的振幅(图5b,图6c,图7,图8b)。但本次研究中也发现一处位于现今 BSR 上部的古 BSR,也具有斜切等时地层、平行于现今 BSR 且具有较弱振幅的地震

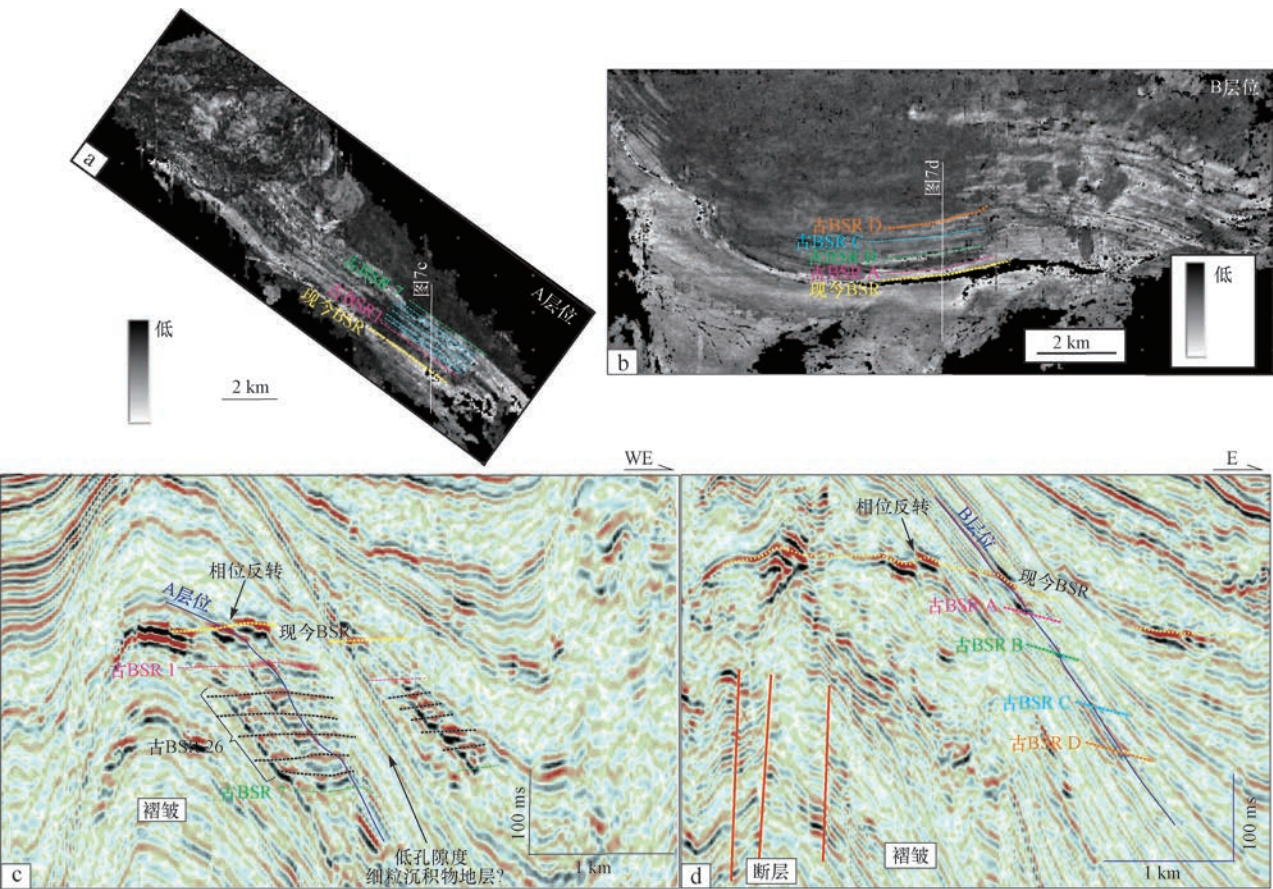


图 7 尼日尔三角洲南部前缘带 BSR 振幅属性平面图及地震剖面(区域平面位置见图 1b)

Fig. 7 The amplitude surface attribute maps and the seismic section of the BSR deformation front of the southern Niger Delta

a,b. 振幅属性平面图显示了古今 BSRs 与地层交线; c,d. 地震剖面显示的古今 BSRs 特征

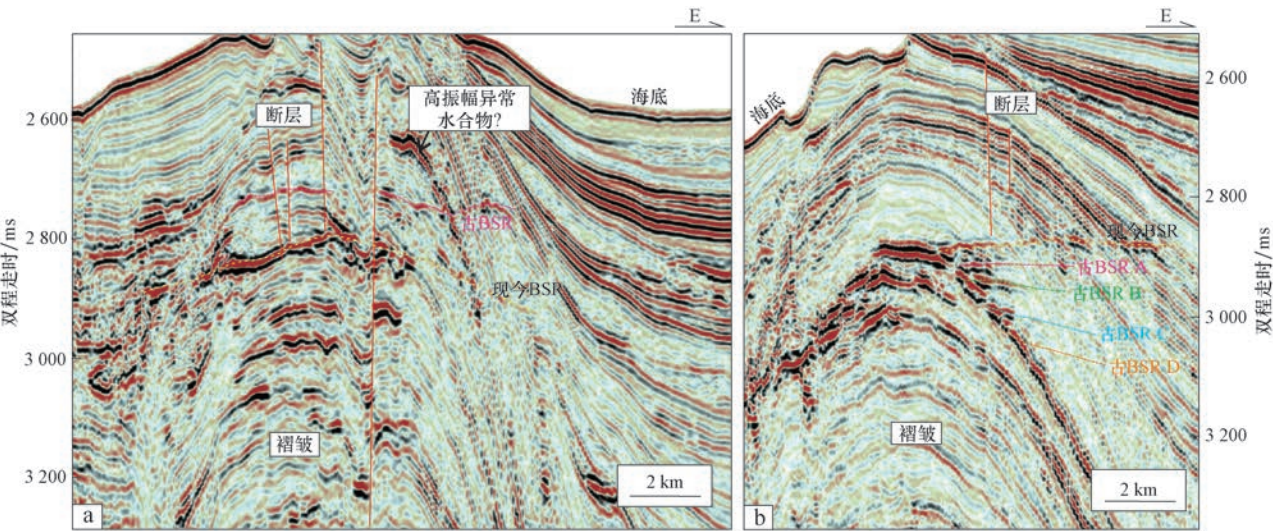


图 8 尼日尔三角洲南部前缘带地震剖面(剖面位置见图 1b)

Fig. 8 The seismic section of the deformation front of the southern Niger Delta

a. 地震剖面显示现今 BSR 及上部的古 BSR;b. 地震剖面显示现今 BSR 与下部的 4 个古 BSRs

反射特征(图 8a)。这可能是由于该处热流作用相对较弱、构造抬升引起的剥蚀占主导作用,或海底水温的减小等条件影响了天然气水合物的稳定条件,造成了天然气水合物稳定底界的向下迁移,表现为古 BSR 位于现今 BSR 的上部。另外,前人研究认为古 BSRs 的振幅特征是由之前存在的天然气水合物所导致的成岩作用

所引起的,如硫化铁的沉淀,而非残余的游离气,因为在较长的时间尺度内,游离气会扩散掉^[13,30-32]。

3.3 BSR 垂向迁移及其主控因素

现今 BSR 与古 BSRs 不同的叠置关系代表了 BSR 不同的垂向迁移历史,这是由天然气水合物稳定条件的变化决定的。一个地区的水合物稳定条件通常是受多种因素控制,因此需综合考虑各因素及对水合物稳定条件影响的权重,来解释具体工区 BSR 位置的演化。通常认为,沉积作用、海底水温增大和热流高异常等因素,能够使天然气水合物稳定底界向上迁移,即古 BSR 深度大于现今 BSR;而剥蚀作用和海底水温减小等条件会导致天然气水合物稳定底界向下迁移,从而使古 BSR 深度小于现今 BSR^[13,33]。

尼日尔三角洲前缘挤压带构造活动强烈且目的层的沉积速率较高,沉积作用会使 BSR 上移(图 9a)。另外,研究区下伏地壳类型是洋壳和过渡壳,大地热流值较高,且海相泥页岩热封盖能力强,而热流沿顺层面更易传播,所以在尼日尔三角洲的挤压带,尤其是背斜顶部,地温梯度值较高^[17]。研究区以褶皱、逆冲推覆构造等构造单元为特征,并发育大量伴生的断层、生长断层和气烟囱等^[17,34-35]。这些流体运移通道除为天然气水合物系统(包括水合物和下伏游离气)提供气源外,还可将深部热液运至浅部,造成地温梯度的增大和浅部地层温度的增加。如天然气水合物相平衡曲线所示,地层温度和地温梯度的增大,也会造成 BSR 的向上移动(图 9b)。对现今 BSR 的数值模拟结果显示,研究区浅层的地温梯度设置为 $4.2 \times 10^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ 时模拟 BSR 与观测 BSR

拟合程度最好,也反映了该地区的地温梯度较高。

除沉积作用、地层温度和地温梯度对古 BSRs 的影响外,海底水温和海平面变化也会造成 BSR 的垂向移动,但海底水温和海平面的变化通常具有幕式、周期性和旋回性的特点,它们的升降会造成 BSR 的上下移动^[30,36]。BSR 在地质历史时期的垂向迁移是诸多因素综合作用的结果,鉴于研究区的古 BSR 主要位于现今 BSR 之下,结合研究区的挤压构造背景,本次研究认为沉积作用和地下热流的影响是引起研究区 BSR 上移的主要因素。

3.4 BSR 对天然气水合物分布的指示

在海域天然气水合物系统,现今 BSR 的上部和下部地层常可见强振幅异常,可能分别是由水合物和游离气造成的,但成岩作用或者高含水的砂岩储层也可在地震资料上表现为强振幅异常^[4,14]。前人研究认为,水合物的形成对沉积物具有胶结作用,使 BSR 上部出现了空白反射,而下部游离气的存在则使地震反射增强^[5,8]。Hovland (1997)则认为,BSR 上部的空白反射是由其相对较高的含水饱和度,而非由水合物的胶结作用造成^[37]。由于水合物的生成消耗了 BSR 附近的孔隙水,造成其含水饱和度较低,因此上部的含水饱和度正常或相对较高,因此造成了声波空白。而 Boswell 等(2016)认为,振幅空白和区域上广泛分布的 BSR 仅代表细粒沉积物内的中低饱和度水合物,不具有资源远景^[4]。随着全球范围内针对海域天然气水合物系统的钻探活动的增加,发现高饱和度水合物层通常在地震资料上表现为天然气水合物稳定区 GHSZ 内的强振幅异常反射,且非空白反射^[4,38-39]。2015 年的

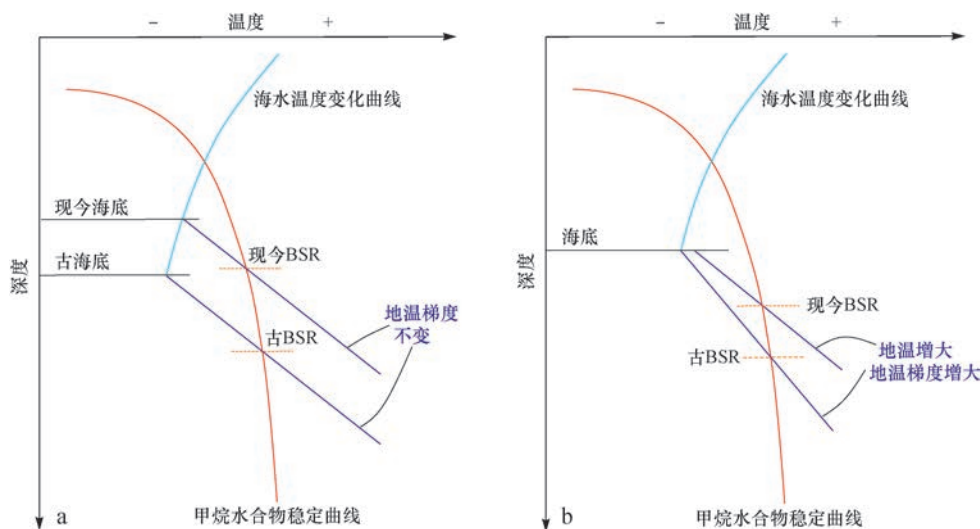


图9 天然气水合物稳定相图

Fig. 9 The phase diagram of the gas hydrate stability zone

a. 相图反映了 BSR 随沉积作用而发生的垂向迁移;b. 相图反映了 BSR 随地温梯度和地温的增加而发生的垂向迁移

GMCS3 钻探的全部 19 个钻位均发现水合物,其中 5 口井钻遇高饱和度水合物,井震对比发现水合物层在地震剖面上表现为 BSR 上部与海底极性相同的强振幅反射^[39]。综上,尽管缺少测井和取芯数据,本次研究认为研究区位于 BSR 上部具有正极性的强振幅异常代表了水合物层,而 BSR 下部的强振幅、负极性的地震反射特代表了游离气区 FGZs。

本次研究认为含水合物地层在研究区表现为强振幅异常和正极性反射,位于水合物稳定区 GHSZ 内,且靠近现今 BSR (图 4,图 5,图 7,图 8)。从地震剖面可以看出,研究区的含水合物地层可分为两类,一类为气烟囱顶部的强振幅、杂乱反射(图 4),可能是受气烟囱的影响,较强的垂向流体运移过程使地层产生裂缝群,造成杂乱反射^[34]。另一类为背斜顶部的强振幅、较连续的反射(图 6)。本次研究在一个高振幅异常较为发育的小区块,提取了现今 BSR 至 250 ms 以浅窗口的振幅属性,其平面图显示了强振幅异常,即水合物层的分

布范围,代表了水合物勘探的有利目标区(图 10)。尽管如此,目前研究并不能排除其他导致 BSR 上部强振幅异常的因素,但随着研究资料和手段的进一步丰富,对这些强振幅异常的解释将得到更充分的证据支撑。

4 结论

1) 本文通过地震解释与地震属性提取对尼日尔三角洲前缘挤压带的水合物系统进行研究,识别了古今 BSRs,以及现今 BSR 上下水合物层和游离气区 FGZs。研究表明,古今 BSRs 均与水合物相关,具有大致平行于海底、斜切等时地层、强振幅和负极性等特征,在研究区呈分散状分布,主要位于褶皱-逆冲推覆构造带附近。其中,古 BSRs 的反射特征较现今 BSR 弱,分布范围也比现今 BSR 更局限,其振幅特征可能是由先前存在的天然气水合物所引起的成岩作用造成的。

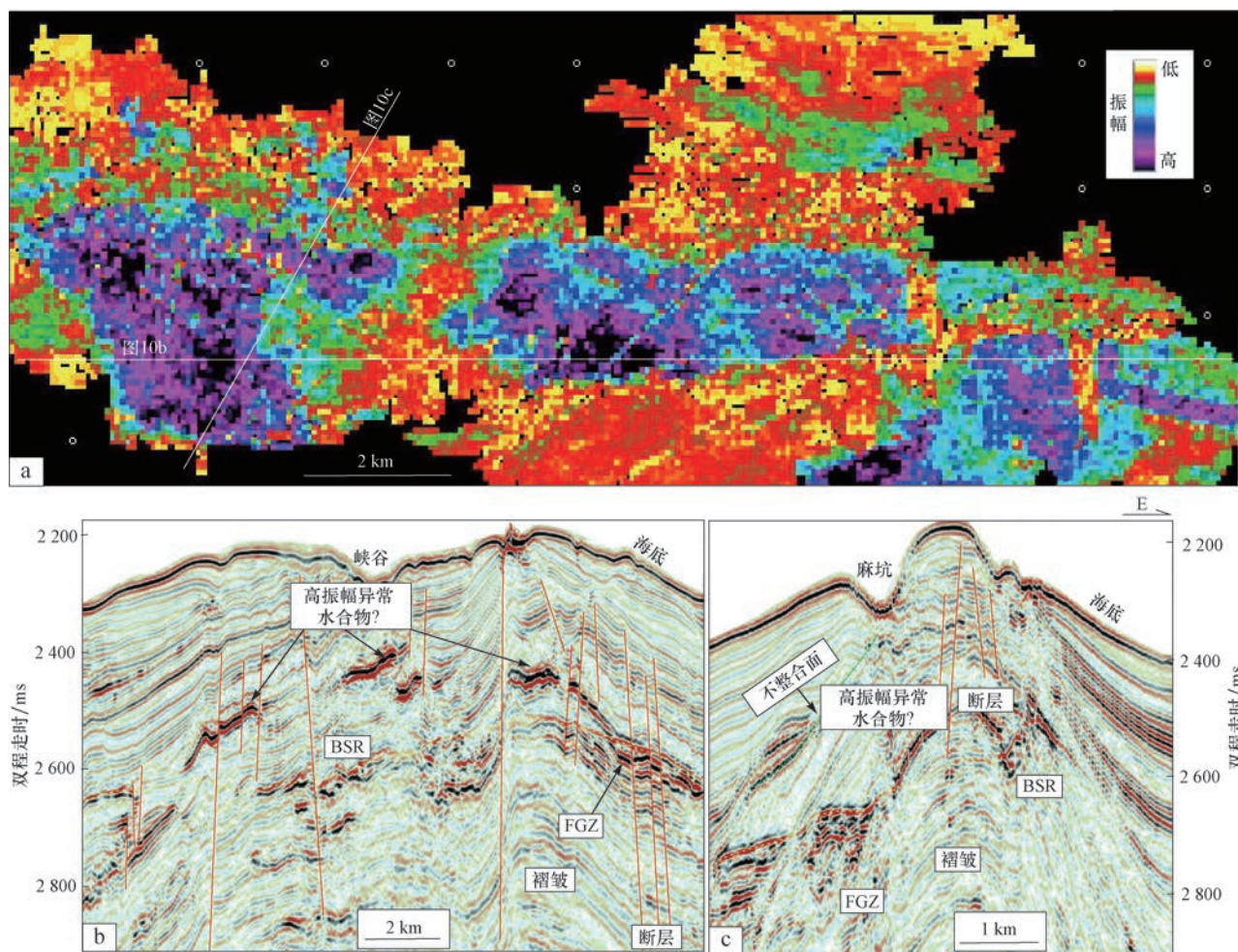


图 10 尼日尔三角洲南部前缘带 BSR 至 250 ms 以浅时窗的振幅属性平面图和地震剖面(区域平面位置见图 1b)

Fig. 10 The amplitude surface attribute maps and the seismic section of the deformation front from BSR to a location 250 ms lower than it in the southern Niger Delta

a. 振幅属性平面图显示 BSR 上部的高振幅异常,时窗范围为 BSR 至 250 ms 以浅;b,c. 地震剖面显示 BSR 上下的高振幅异常

2) 高饱和度水合物层在地震剖面上表现为强振幅异常和正极性反射,位于水合物稳定区 GHSZ 内,且靠近现今 BSR,主要位于气烟囱和背斜顶部。FGZs 一般位于现今 BSR 下部,具有强振幅、负极性的地震反射特征。研究区的 FGZs 发育较为局限,大多地区没有发育 FGZs 或者仅发育较薄的 FGZs,且薄的 FGZs 主要位于背斜顶部或其周边地区。

3) 沉积作用和地温梯度的增大被认为是研究区 BSR 上移的主要影响因素。研究区构造活动强烈且目的层的沉积速率较高;下伏地壳类型是洋壳和过渡壳,大地热流值较高;热流易沿顺层面传播,所以在背斜顶部地温梯度值较高;尼日尔三角洲挤压带的断层、气烟囱和底辟构造发育,也为热流的垂向运移提供了通道。

参 考 文 献

- [1] Kvenvolden K A. Methane hydrates and global climate[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1988, 2(3): 221–229.
- [2] Bünz S, Mienert J, Berndt C. Geological controls on the Storegga gas-hydrate system of the mid-Norwegian continental margin[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2003, 209(3–4): 291–307.
- [3] Haacke R R, Westbrook G K, Hyndman R D. Gas hydrate, fluid flow and free gas: Formation of the bottom-simulating reflector[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2007, 261(3–4): 407–420.
- [4] Boswell R, Shipp C, Reichel T, et al. Prospecting for marine gas hydrate resources[J]. *Interpretation*, 2016, 4(1): SA13–SA24.
- [5] Brown K M, Bangs N L, Froelich P N, et al. The nature, distribution, and origin of gas hydrate in the Chile Triple Junction region[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1996, 139(3–4): 471–483.
- [6] 王秀娟, 吴时国, 刘学伟. 天然气水合物和游离气饱和度估算的影响因素[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 504–511.
Wang Xiujuan, Wu Shiguo, Liu Xuewei. Factors affecting the estimation of gas hydrate and free gas saturation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(2): 504–511.
- [7] Golmshtok A Y, Soloviev V A. Some remarks on the thermal nature of the double BSR[J]. *Marine Geology*, 2006, 229(3): 187–198.
- [8] Milkov A V, Dickens G R, Claypool G E, et al. Co-existence of gas hydrate, free gas, and brine within the regional gas hydrate stability zone at Hydrate Ridge (Oregon margin): evidence from prolonged degassing of a pressurized core[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2004, 222(3–4): 829–843.
- [9] Clennell M B, Hovland M, Booth J S, et al. Formation of natural gas hydrates in marine sediments: 1. Conceptual model of gas hydrate growth conditioned by host sediment properties[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1999, 104(B10): 22985–23003.
- [10] Bangs N L B, Musgrave R J, Tréhu A M. Upward shifts in the southern Hydrate Ridge gas hydrate stability zone following postglacial warming, offshore Oregon[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2005, 110(B3): 67–99.
- [11] Andreassen K, Mienert J, Bryn P, et al. A double gas-hydrate related bottom simulating Reflector at the Norwegian Continental Margin[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2000, 912(1): 126–135.
- [12] Foucher J P, Nouzé H, Henry P. Observation and tentative interpretation of a double BSR on the Nankai slope[J]. *Marine Geology*, 2002, 187(1–2): 161–175.
- [13] Bangs N L, Hornbach M J, Moore G F, et al. Massive methane release triggered by seafloor erosion offshore southwestern Japan[J]. *Geology*, 2010, 38(11): 1019–1022.
- [14] Berndt C, Bünz S, Clayton T, et al. Seismic character of bottom simulating reflectors: examples from the mid-Norwegian margin[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2004, 21(6): 723–733.
- [15] Zander T, Haeckel M, Berndt C, et al. On the origin of multiple BSRs in the Danube deep-sea fan, Black Sea[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2017, 462: 15–25.
- [16] Morgan R. Structural controls on the Positioning of Submarine Channels on the Lower Slopes of the Niger Delta[J]. *Geological Society London Memoirs*, 2004, 29(1): 45–52.
- [17] 邓荣敬, 邓运华, 于水, 等. 尼日尔三角洲盆地油气地质与成藏特征[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(6): 755–762.
Deng Rongjing, Deng Yunhua, Yu Shui, et al. Hydrocarbon geology and reservoir formation characteristics of Niger Delta Basin[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2008, 35(6): 755–762.
- [18] Doust H, Omatsola E. Niger Delta. In: Edwards J D, Santogrossi P A, eds., *Divergent/Passive margins basins*[J]. AAPG Memoir, 1990, 48: 201–238.
- [19] Cohen H A, McClay K. Sedimentation and shale tectonics of the northwestern Niger Delta front[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 1996, 13(3): 313–328.
- [20] 侯高文, 刘和甫, 左胜杰. 尼日尔三角洲盆地油气分布特征及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(3): 374–378.
Hou Gaowen, Liu Hefu, Zuo Shengjie. A study of distribution characteristics of petroleum in Niger delta basin and their controlling factors[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(3): 374–378.
- [21] Cobbold P R, Clarke B J, Lø H, et al. Structural consequences of fluid overpressure and seepage forces in the outer thrust belt of the Niger Delta[J]. *Petroleum Geoscience*, 2009, 15(1): 3–15.
- [22] Damuth J E. Neogene gravity tectonics and depositional processes on the deep Niger Delta continental margin[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 1994, 11(3): 320–346.
- [23] 刘剑平, 潘校华, 马君, 等. 西部非洲地区油气地质特征及资源概述[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 378–384.
Liu Jianping, Pan Xiaohua, Ma Jun, et al. Petroleum geology and resources in West Africa: An overview[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2008, 35(3): 378–384.
- [24] 孙海涛, 钟大康, 张思梦. 非洲东西部被动大陆边缘盆地油气分布差异[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(5): 561–567.
Sun Haitao, Zhong Dakang, Zhang Simeng. Difference in hydrocarbon distribution in passive margin basins of east and west Africa[J]. *Shiyou Kantan Yu Kaifa/petroleum Exploration & Development*, 2010, 37(5): 561–567.
- [25] Moridis G J. Numerical studies of gas production from methane hydrates[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 2003, 32: 359–370.
- [26] Johnson D R, H E Garcia, T P Boyer. World Ocean Database 2013 Tutorial. Sydney Levitus, Ed.; Alexey Mishonov, Technical Ed.;

- NODC Internal Report 23, 2013, NOAA Printing Office, Silver Spring, MD, 25 pp.
- [27] 杨金秀, Richard Davies, 肖佃师, 等. BSR 及其下伏游离气区的分布特征与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 87–92.
- Yang Jinxiu, Richard Davies, Xiao Dianshi, et al. Distributions of BSR and underlying free gas zones and related controlling factors [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 87–92.
- [28] 杨金秀, 王红亮, 何巍巍, 等. 尼日尔三角洲天然气水合物体系地震特征研究[J]. 地球物理学报, 2017(10): 3889–3898.
- [29] Yang J, Wang X, Jin J, et al. The role of fluid migration in the occurrence of shallow gas and gas hydrates in the south of the Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Interpretation, 2017, 5(3): SM1–SM11.
- [30] Davies R J, Morales Maqueda M Á, Li A, et al. Millennial-scale shifts in the methane hydrate stability zone due to Quaternary climate change[J]. Geology, 2017, 45(11): 1027–1030.
- [31] Popescu I, De Batist, M Lericolais G, et al. Multiple bottom-simulating reflections in the Black Sea: Potential proxies of past climate conditions[J]. Marine Geology, 2006, 227: 163–176.
- [32] Housen B A, Musgrave R J. Rock-magnetic signature of gas hydrates in accretionary prism sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1996, 139: 509–519.
- [33] Posewang J, Mienert J. The enigma of double BSRs: Indicators for changes in the hydrate stability field? [J]. Geo-Marine Letters, 1999, 19: 157–163.
- [34] 孙启良, 吴时国, 陈端新, 等. 南海北部深水盆地流体活动系统及其成藏意义[J]. 地球物理学报, 2014, 57(12): 4052–4062.
- Sun Qiliang, Wu Shi guo, Chen Duanxin, et al. Focused fluid flow systems and their implications for hydrocarbon and gas hydrate accumulations in the deep-water basins of the northern South China Sea [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(12): 4052–4062.
- [35] Heiniö P, Davies R J. Degradation of compressional fold belts: Deep-water Niger Delta[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(5): 753–770.
- [36] Bintanja R, Van de Wal R S W. North American ice-sheet dynamics and the onset of 100,000-year glacial cycles[J]. Nature, 2008, 454: 869–872.
- [37] Hovland M, Gallagher J W, Clennell M B, et al. Gas hydrate and free gas volumes in marine sediments: Example from the Niger Delta front [J]. Marine & Petroleum Geology, 1997, 14(3): 245–255.
- [38] Wang X, Qian J, Collett T S, et al. Characterization of gas hydrate distribution using conventional 3D seismic data in the Pearl River Mouth Basin, South China Sea[J]. Interpretation, 2016, 4(1): SA25–SA37.
- [39] Yang S X, Zhang M, Liang J Q, et al. Preliminary results of china's third gas hydrate drilling expedition: a critical step from discovery to development in the South China Sea, Fire in the Ice. Methane Hydrate Newsletter, National Energy Technology Laboratory, US Department of Energy, 2015, 15(2): 1–5.

(编辑 董立)

(上接第1294页)

- [26] 王君, 朱如凯, 郭宏莉, 等. 火山岩风化壳储层发育模式——以三塘湖盆地马朗凹陷石炭系火山岩为例[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 217–226.
- Wang Jun, Zhu Rukai, Guo Hongli, et al. Wethered crust volcanic reservoir: a case study on Malang depression, Carboniferous Santanghu Basin, NW, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 217–226.
- [27] 王盛鹏, 林潼, 孙平, 等. 两种不同沉积环境下火山岩储层成岩作用研究[J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 145–152.
- Wang Shengpeng, Lin Tong, Sun Ping, et al. Influences of diagenetic effects on volcanic rock reservoirs under two different sedimentary environments [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 145–152.
- [28] 孔垂显, 陈轩, 秦军, 等. 中-基性火山岩孔隙缝储集体形成控制因素——以准噶尔盆地金龙区块石炭系为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 558–566.
- Kong Chuixian, Chen Xuan, Qin Jun, et al. Controlling factors for the formation of pore-fracture reservoirs in intermediate-basic volcanic rocks: A case study of the Carboniferous Jinlong Block, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 558–566.
- [29] 吴红烛, 黄志龙, 柳波, 等. 马朗凹陷哈尔加乌组烃源岩分布和生烃演化与石炭系成藏关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(1): 22–31.
- Wu Hongzhu, Huang Zhilong, Liu Bo, et al. Relationship between distribution, hydrocarbon generation and evolution of source rock in Haerjiawu formation and Carboniferous hydrocarbon accumulation in Malang sag, Santanghu Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(1): 22–31.
- [30] Swanson B F. A simple correlation between permeabilities and mercury capillary pressures [J]. Journal of Petroleum Technology, 1981, 33(12): 2498–2504.
- [31] Higgs K E, Arnot M J, Brindley S. Advances in grain-size, mineral, and pore-scale characterization of lithic and clay-rich reservoirs Characterization of Lithic and Clay-Rich Reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(7): 1315–1348.
- [32] Aliakbari E, Rahimpour-Bonab H. Effects of pore geometry and rock properties on water saturation of a carbonate reservoir [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 112: 296–309.
- [33] Comisky J T, Newsham K, Rushing J A, et al. A comparative study of capillary-pressure-based empirical models for estimating absolute permeability in tight gas sands [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. California, USA: Society of Petroleum Engineers, 2007: 1–17.

(编辑 张亚雄)