

# 深水油气浅层钻井的“三浅”地质灾害

吴时国<sup>1,2</sup>, 谢杨冰<sup>1,2</sup>, 秦芹<sup>1,2</sup>, 李清平<sup>3</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中海石油研究总院, 北京 100027)

**摘要:**深水浅层钻井过程中可能遇到浅水流、浅层气以及天然气水合物层分解等3种浅层地质灾害(简称“三浅”)。要规避这些风险,必须需要开展浅水流、浅层气和天然气水合物成因机理、识别特征及工程危害等方面的研究。国外利用地球物理识别技术和数值模拟方法,结合深水油气钻井测井开展了这方面的研究,在“三浅”地质灾害的形成机理和控制因素方面取得了较为重要的研究进展。目前国内学者利用地球物理方法在南海北部深水区LW3-1大气田的周围发现了超压系统、浅层气和天然气水合物。深水水道砂体的发现也推断南海北部深水区具有“三浅”地质灾害发育的地质条件。随着深水油气勘探开发的不断深入,评估和预测南海北部深水钻井的“三浅”地质灾害十分迫切。

**关键词:**深水钻井安全;浅水流;浅层气;天然气水合物;地质灾害

**中图分类号:**TE242;P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2014)09-0038-05

**Shallow Drilling Geological Disasters of Oil and Gas in Deepwater/WU Shi-guo<sup>1,2</sup>, XIE Yang-bing<sup>1,2</sup>, QIN Qin<sup>1,2</sup>, LI Qing-ping<sup>3</sup>** (1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao Shandong 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Geology & Environment, Chinese Academy of Sciences, Qingdao Shandong 266071, China; 3. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

**Abstract:** Shallow water flow, shallow gas and gas hydrate have been encountered in the deep water drilling. In order to predict the geological disasters we need to study the mechanism, identification and engineering dangerous. By using geophysics and numerous modelling, in combination with drilling hole and well logging data, there are great progresses in the ‘three shallow’ geological disasters. For the time being, we also found the over pressured system, shallow gas and gas hydrate in the LW3-1 gas field. The discovery of deepwater channel sand indicated that possibility existence of shallow water flow. By the progress of deepwater hydrocarbon exploration and development, it is very important to evaluate and predict the ‘three shallow’ geological disasters.

**Key words:** deepwater drilling safety; shallow water flow; shallow gas; hydrate; geological disasters

## 0 前言

随着近海老油田区新发现难度的增大,人们把目光自然地投向了深水区,尤其是在巴西深水区坎波斯盆地发现许多大型油气田以后,深水勘探更是不断升温,如今已成为世界上最热的油气勘探领域<sup>[1]</sup>。2004年,我国也启动了深水油气的战略选区项目,开始了我国油气勘探新的跨越。然而,深海油气勘探面临着巨大的挑战,充满许多未知的东西,我们对深水油气钻井的安全性缺乏必要的认识,对许多浅水勘探区没有出现的重大地质灾害,如浅水流、天然气水合物、海底泥石流等缺乏必要的认识<sup>[2~5]</sup>。浅水流(Shallow Water Flow)指海底下浅部地层流动的高速水体,当钻井钻过该地层后,该高速水体就从钻孔中喷出,是深水油气钻井遇到的主要事故。据Fugro地质服务公司报道,大约70%深水井都遇到

过浅水流问题<sup>[3]</sup>,如西非近岸、西设得兰岛、婆罗洲、东南亚海域、挪威海、北海、南菲律宾海和墨西哥湾。墨西哥湾的Deep Star钻井和完井委员会认为浅水流是该区深水钻井遇到的最大麻烦<sup>[6]</sup>。天然气水合物是由天然气分子和水分子组成的类似于冰的化合物,存在于低温高压环境中,温压条件的破坏导致天然气水合物发生分解,可能引起气候变化、海底滑坡和地层浅层构造变化、常规油气井平台损坏等一系列问题,美国、日本、加拿大等国家许多科学家投入大量精力研究水合物对环境产生的影响<sup>[4]</sup>。

中国海洋石油总公司与Husky能源公司在南海北部发现了巨大气田,在南海南部牵手菲律宾和越南,开展中菲越合作区块的深水勘探。中海油在国外的深水勘探发展也十分迅速,如在西非岸外、澳大利亚西北大陆边缘深水勘探也签订大量的勘探区

收稿日期:2014-06-30

作者简介:吴时国(1963-),男(汉族),湖北襄阳人,中国科学院海洋研究所研究员、博士生导师、主任,主要从事海底构造、深水油气和天然气水合物研究工作,山东省青岛市南海路7号。

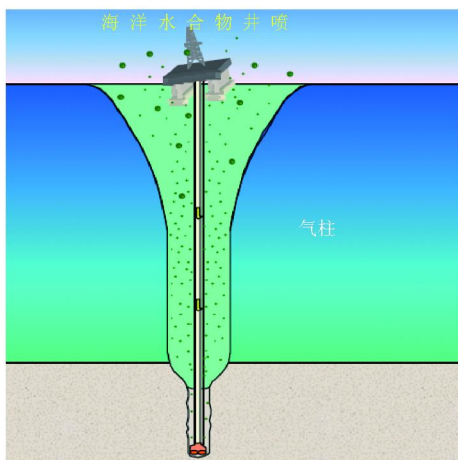
块,并且大多开始了深水钻探。据报道,在这些区域也遇到上述提及的重大地质灾害,如浅水流、水合物和浅层气等。然而,关于深水区勘探和钻井安全的地质灾害还没有研究,因此,开展这些地质灾害的形成机理和预测技术研究是十分必要的。

## 1 “三浅”地质灾害

### 1.1 天然气水合物的地质灾害问题

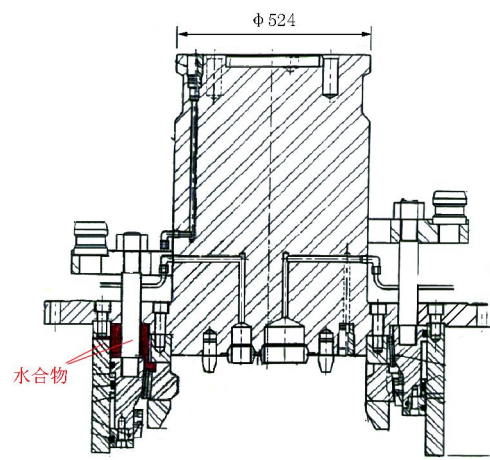
天然气水合物,简称水合物,又称“可燃冰”,是由水和天然气在高压低温环境条件下形成的冰态、结晶状笼形化合物<sup>[7]</sup>。从墨西哥湾到北海、西非,深水海床、浅层水合物和浅水流影响到深水钻探、开发、生产的安全,大约有70%深水井遇到类似问题,水深超过610 m以后,水合物成为深水钻探开发的主要难题;含天然气水合物沉积层一般是未固结的地层,水合物像流体那样充填在孔隙空间,或胶结沉积物颗粒,水合物出现的地层孔隙度降低、速度增加、反射空白、地层渗透率降低等。地层渗透率降低,阻碍下层游离气向上运移,在孔隙不均匀分析情况下,很容易产生超压地层。但目前对地层中水合物分解引起的各种灾害行为的研究还很不深入。

深水钻井作业经验规律如下:水深 $\leq 305$  m,可能没有水合物;水深 $\leq 457$  m,如果没加水合物抑制剂,水合物形成的可能性较大;水深 $\leq 610$  m,不加水合物抑制剂,必定生成水合物;水深 $\geq 610$  m,经验较少,电解质抑制剂不起作用。



(a) 海洋水合物井喷

钻探开发过程水合物风险:钻井活动会导致地层的温度和压力发生变化,导致了水合物的不稳定,分解产生大量的气体,会导致一系列的钻井事故。墨西哥湾、西非、巴西深水作业中多次遇到水合物堵塞水下防喷器,拖延了井控时间、导致防喷器无法连接、堵塞压井管线和井筒,产生严重的井控问题(见图1a);水合物还可能破坏导向基座和水上生产设备,并在海底设备上形成大量的水合物,影响正常作业(见图1b)。同样,人类对海底进行石油勘探和开发有关的钻井、铺设管线等,钻井把深部热流体带入浅部含水合物地层来,将会破坏水合物存在的温度压力条件,可能导致水合物分解。在此类地层钻井时井壁岩层失稳垮塌、井涌或井漏等问题会更加突出,当井眼打开,引起其胶结或骨架支撑作用的固态水合物分解时,分解本身就会使井壁坍塌失稳。分解后气体急剧膨胀,从而引发事故,使井径扩大、套管被压扁、井口装置失掉承载能力,失掉井控手段,出现井涌、井喷,污染周围环境,井周出现溶洞,地基下沉,产生海底地基沉降等重大事故,甚至灾难性的地质塌陷、海底滑坡和海水毒化等灾害。分解产生的部分气体进入井内同钻井液一起上返到地面,在这过程中如果井内温压条件合适,它们又会重新在钻井管线和阀门特别是防喷器内形成水合物,导致循环管道被堵塞等钻井事故发生。因此,井壁易失稳和井内事故易发是水合物地层钻井的一个主要特性。



(b) 采油树罩中水合物的位置

图1 水合物风险事故

水合物分解还会对立柱甚至整个钻井平台、水下生产设施、管线、上部设施造成危害;而且水合物分解产生大量气体,也可能导致海底滑坡和土体不稳,大量的碎屑、块体流动,将冲塌钻井平台,造成巨

大财产损失。

水合物分解后,海底地层的力学性能发生变化,由此可能导致海底大面积的滑坡。很多海洋石油生产设施坐落在水合物稳定层之上,因此水合物的分

解会直接威胁海底油气生产设施,导致平台下沉、管线毁坏等。此外,深水海底管线及水下井口等都会因其长期面临着水合物而存在着潜在的危险。水合物分解而导致的海底大规模滑坡如图 2 所示。

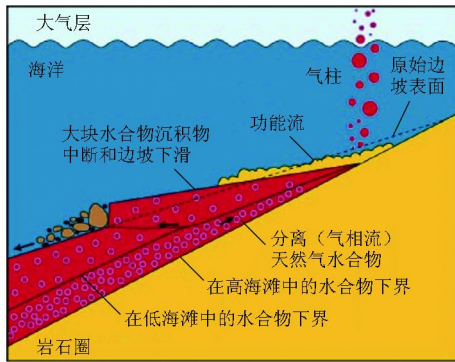


图 2 水合物分解引起的海底滑坡

为了研究墨西哥湾北部典型水合物特性和钻井、开发对水合物的影响,2003 年起美国地质调查局、石油公司开始在深水水合物区域进行油气开发风险评价与控制管理技术研究,并取得了一些成果。而我国还刚刚开始涉足深水,对水合物的地质灾害分析还不够深入<sup>[4]</sup>。

1.2 浅水流的地质灾害问题

浅水流(Shallow Water Flow,简称为 SWF)灾害是国外深水钻探中遇到的地质灾害之一。它是指深水钻探中钻遇高压砂层,在高孔隙压力驱动下砂和

水激烈流动进入井眼里甚至喷出,从而导致了钻井和钻进平台损坏的事件。一般发生在深水区(超过 800 m)海底泥线下几百米的层位,从深水钻进角度看,是相对浅层的位置,因此这种高压的砂体流动就叫浅水流<sup>[3]</sup>。第一个 SWF 报告见于 1985 年。SWF 问题在墨西哥湾、里海南部,挪威海和北海等地区已有报道。SWF 灾害可造成的巨大经济损失见图 3。

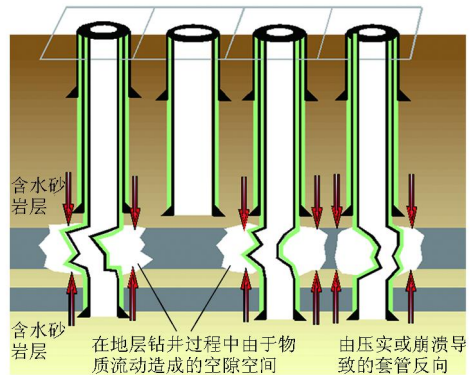


图 3 GoM 深水钻井浅水流灾害

SWF 主要出现在一种原位超压未固结砂体中(图 4)。超压的形成被认为是快速的沉积并被低渗透的泥覆盖所致;埋藏较浅未固结故砂体强度不高;钻探中如果泥浆压力不足于平衡孔隙压力或泥浆压力过大超过砂体强度,就可以导致 SWF 发生。另外,SWF 也有可能与天然气水合物存在有关。

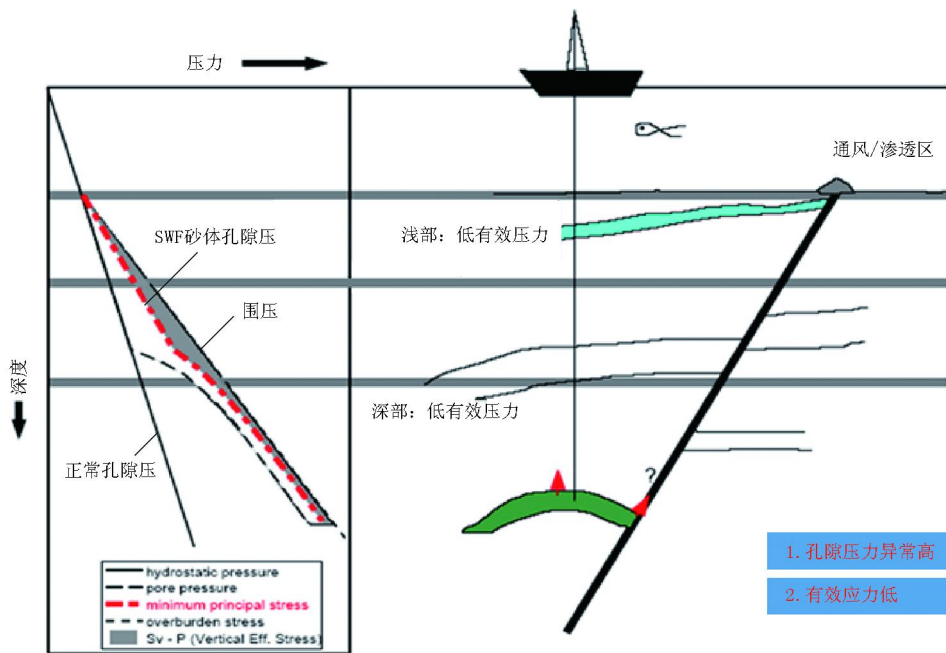


图 4 SWF 砂体地应力状态

利用 SWF 砂体物性和形成特征,钻前可以对 SWF 砂体的存在性进行评估。快速的沉积(大于 1

mm/年)环境可作为评估 SWF 砂体形成的依据。另外容易形成 SWF 的砂层常具有较高的纵横波速度

比( $V_p/V_s$ )或泊松比,这也是识别浅水流的地震方法中最常用的参数。目前用于识别和预测浅水流的方法包括测井和反射地震两大类方法。识别和估计浅水流的过高压性质的地球物理测井方法包括钻井时的测量(MWD)、钻井之后的测井及 VSP 测井等方法。反射地震方面,国外研究中主要涉及了几种用于参数提取的地震反演方法,如传统 Dix 反演、叠后振幅反演、层析反演、叠前振幅反演。国内刚开始这方面的研究<sup>[3]</sup>。

钻探中 SWF 问题也可以采取合理的工艺进行处理。其原理是要控制好泥浆。SWF 砂体中,孔隙压力与砂体断裂梯度之间的窗口很窄。如果泥浆重度不足以平衡砂体的孔隙压力,砂就会流进井里;如果泥浆重度过大,砂体就破坏;两者都导致井控失败。由于 SWF 问题的严重性,很有必要在深水钻探之前进行 SWF 问题的评估。它是钻井井位确定和钻井保护措施的重要依据。

我国即将进入深水钻探领域,在南海也发现了浅水流的形成(图 5)。但对 SWF 问题的解决尚无经验。尽管国际上在深水钻探领域的先进国家(如美国)在对付 SWF 问题已经有了积累,但是要理解和掌握这些经验和需要一个实践过程。同时也应意识到,目前有关 SWF 问题的认识和防范措施也是初步的,需要进一步的研究来提高。为了减轻和避免深水钻探中可能要面对的 SWF 灾害,十分需要如下技术。

1921 2200 2500 2800 3100 3400 3700 4000 4300 4600 4900 5200 5300

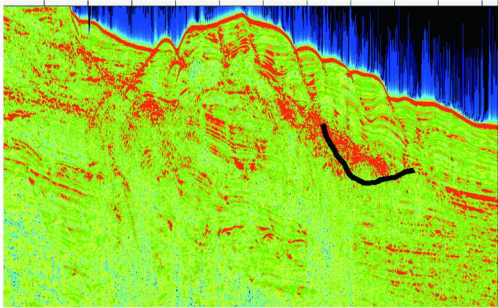


图 5 南海 0104 测线声波阻抗剖面(黑线为浅水流区)

(1) SWF 形成机理和数值模拟分析技术。SWF 砂体中压实形成超压机理、微观和宏观流动和破坏机制。数值模拟 SWF 砂体超压的形成和流动破坏过程,深入和全面理解 SWF 问题的物理本质,指导 SWF 的识别和防范。

(2) SWF 砂体识别(地球物理)技术。实验确定 SWF 砂体的岩石物理性质、特别是在低的压差(围压与孔隙压力差)下纵横波速度;确定具有 SWF 倾

向砂体的敏感的岩石物理属性参数地震响应特征,建立岩石物理性质与孔隙压力、孔隙度和沉积物矿物的关系;形成识别 SWF 砂体的地球物理物性分析技术和压力分析技术。研究针对浅水流的叠后振幅反演、层析反演、叠前振幅反演等,尤其要发展叠前全波形反演技术等研究热点。

(3) 通过 SWF 层的钻井技术,合理的工艺(泥浆和井壁处理等),防止 SWF 发生或对 SWF 破坏的修复等。

### 1.3 浅层气的地质灾害问题

浅层气是指埋藏深度比较浅(一般在 1500 m 以内)、储量比较小的各类天然气资源<sup>[8]</sup>。主要包括生物气、油型气、煤层甲烷气、水溶气等。在深水油气勘探开发、钻井过程中,浅层气会造成潜在地质灾害,通常会形成油气资源开发受阻,钻井遭受破坏,从而不可避免地造成巨大经济损失。通过探测浅层气位置,研究清楚浅层气基本特征、成分,可有效避免一些损失。

海底浅层气还经常出现超压,它是导致井喷的重要原因<sup>[5,9]</sup>。国际海岸考察理事会(ICES)报导,有 22% 的井喷是由浅层气造成的。浅层超压异常在深水勘探活动中是非常危险的一种灾害因素,一旦为钻杆或桩脚穿通,可能引起井口地基土体冲垮、气体喷逸,平台起火燃烧。钻井平台周围孔隙压力的突然减少、土体迅速压密,地基猛然沉陷导致平台倾覆。1998 年 9 月 7 日,威金入勘探者号(Viking Explorer)船在印度尼西亚的望加锡海峡的 Bekapir 油田打钻时,钻遇高压浅层气而发生井喷,并伴随爆炸,1000 多人丧生,钻探船也沉没到水下 200 多米海底。我国南海北部陆坡深水盆地中广泛分布浅层气(图 6),在深水油气钻井中应避免这类风险。

## 2 基于地球物理预测的钻前预测方法

我国南海北部陆坡盆地是深水油气勘探的重要靶区,根据海底沉积物的岩石物性实验数据分析,通过高分辨率的地震地层分析和多种地震属性反演,寻找识别浅水流层的地球物理属性参数;建立浅水流层的岩石物理模型,开展浅水流层的数值模拟,了解浅水流的形成和流动机理。采用保幅处理,尤其在地质构造相对复杂区进行多种属性反演,通过叠前反演和叠后反演结合,获得含水合物储层的纵波波阻抗、横波波阻抗、纵横波速度比、泊松比、拉梅常数  $\lambda/\mu$ 、 $\lambda\rho$  等,识别浅部沉积层天然气水合物。利用遗传算法,在叠前任意控制点进行波形反演,建立

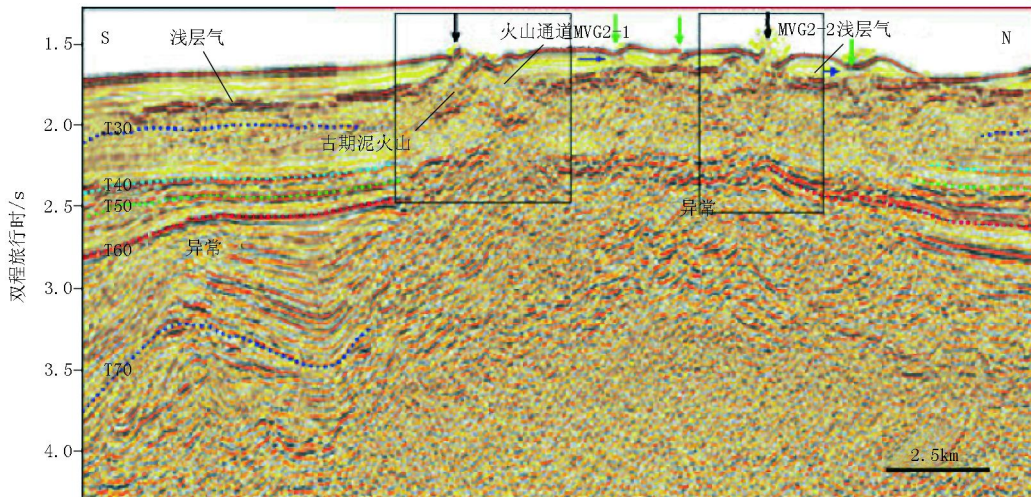


图6 珠江口盆地浅层气的地震识别<sup>[8]</sup>

弹性模型,以该模型为约束进行叠后反演,得到可靠的 $P$ -阻抗和 $S$ -阻抗及其它属性参数如纵横波速度比、泊松比和拉梅参数等,建立浅水流、天然气水合物的地球物理识别标志<sup>[3]</sup>。通过建立基于地球物理的预测方法和技术,减少深水油气钻井的地质风险。钻前预测十分重要。

### 3 存在问题与展望

深水区的油气勘探开发还处于刚起步阶段,关于深水钻井安全,迫切需要进一步深入研究,主要存在以下几个方面的问题。

(1) 深水区沉积物的岩石物性和机械特性缺乏认识,从而导致深水钻井和深水工程设计的困难。

(2) 深水沉积盆地演化、沉降史、热演化和沉积充填的特殊性,产生高压流体,形成如浅水流之类的巨大地质灾害,对于我国来说,刚进行初步研究。

(3) 大陆坡区沉积盆地内发育了大量的水合物和浅层气,已产生巨大的钻井危害,如何预防深水区的水合物的分布及可能的地质灾害,仍是尚未解决的问题。

(4) 大陆坡地区,地形崎岖,易形成水下滑坡,我们对海底滑坡的形成机制和产生的巨大灾害还认识较少。

(5) 深水区重大地质灾害的预测方法和技术。随着深水油气的勘探开发深入,我们一定要加大深水钻井的地质灾害的成因机理和预测技术研究。

### 参考文献:

- [1] Henry S P, Paul W. Worldwide deepwater exploration and production: Past, present, and future[J]. The Leading Edge, 2002, 21(4): 371-376.
- [2] 刘锋,吴时国,孙运宝,等.南海北部陆坡水合物分解引起海底不稳定性的定量分析[J].地球物理学报, 2010, 53(4): 946-953.
- [3] 吴时国,孙运宝,王秀娟,等.南海北部深水盆地浅水流的地球物理特性及识别[J].地球物理学报, 2010, 31(2): 220-229.
- [4] 吴时国,王大伟,秦志亮.深水油气开发中地质灾害及其预测技术[J].自然灾害学报, 2011, 20(S1): 1-8.
- [5] 叶银灿.中国海洋灾害地质学[M].北京:海洋出版社, 2012.
- [6] McConnell D R, Zhang Z J, Boswell R. Review of progress in evaluating gas hydrate drilling hazards. Marine and Petroleum Geology[J]. 2012, 34: 209-223.
- [7] Sloan, E. D., Koh, C. A. Clathrate hydrates of natural gases (3rd ed)[M]. New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, Publishers, 2008. 721.
- [8] Sun Q L, Wu S G, Cartwright J, Shi H S. Shallow gas and its origin in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. Marine Geology, 2012, 315-318: 1-14.
- [9] Dugan B, Flemings P B. Overpressure and Fluid Flow in the New Jersey Continental Slope: Implications for Slope Failure and Cold Seeps[J]. Nature, 2000, 289: 288-291.