

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019111302

新西兰 Hikurangi 边缘 Tuaheni 滑坡复合体黏土质粉砂储层天然气水合物饱和度估算

陈杰^{1,2,3}, 胡高伟^{1,2}, 卜庆涛^{1,2}, 王秀娟^{2,4}, 景鹏飞^{1,2}, 刘昌岭^{1,2}, 郭洋^{1,2,3}, 王自豪^{1,2}

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

2. 海洋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

3. 中国石油大学(华东), 青岛 266580

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: 准确评估新西兰 Hikurangi 边缘 Tuaheni 滑坡复合体 (TLC) 区域的天然气水合物含量与储层分布对 TLC 慢滑移现象与产生机制的解释有重要作用。本文分析了 IODP372 航次 U1517 站位测井和取心数据, 发现在局部地层纵波速度增加 (>1.7 km/s) 和电阻率升高 ($>1.5 \Omega \cdot m$) 的 104~160 mbsf 层段存在天然气水合物, 其中 112~114、130~145 和 150~160 mbsf 层段饱和度相对较高。根据岩性划分了不同井段对应的矿物成分含量, 用于纵波速度模型计算, 并利用简化三相介质 (STPE) 和改进的 Biot-Gassmann 模型 (BGTL) 分别估算了 104~160 mbsf 层段的天然气水合物饱和度, 平均饱和度分别为 5.2% 和 6.0%, 最高饱和度分别为 22.7% 和 21.6%。同时, 与阿尔奇公式估算的水合物饱和度比较, 在 104~160 mbsf 层段 3 种方法估算的饱和度值随深度变化相似, 天然气水合物平均饱和度相近 (约 6.0%), 在 130~145 mbsf 层段的水合物平均饱和度最高 (约 8.5%)。本研究使用两种声速模型和更为精细的参数估算饱和度, 其估算结果更为可靠, 可为 Tuaheni 滑坡复合体慢滑移现象研究提供良好的基础数据支撑。

关键词: 天然气水合物; 水合物饱和度; STPE 和 BGTL 模型; 新西兰 Hikurangi 边缘; IODP372 航次

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

Estimated gas hydrate saturation from the reservoir of clayey silt with sandy interlayers at Site U1517, Tuaheni landslide complex on the Hikurangi margin, New Zealand

CHEN Jie^{1,2,3}, HU Gaowei^{1,2}, BU Qingtao^{1,2}, WANG Xiujuan^{2,4}, JING Pengfei^{1,2}, LIU Changling^{1,2}, GUO Yang^{1,2,3}, WANG Zihao^{1,2}

1. Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

3. China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

4. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: Accurate assessment of natural gas hydrate saturation and reservoir distribution in the Tuaheni landslide complex (TLC) area on the Hikurangi margin, New Zealand plays a critical role in explaining the creeping TLC phenomenon and its forming mechanisms. Gas hydrates are discovered in the interval from 104 mbsf to the BGHS at 160 mbsf based on the logging- while-drilling (LWD) and coring data from the site U1517 located on the extensional and creeping part of the TLC. Elevated P-wave velocity (>1.7 km/s), electrical resistivity ($>1.5 \Omega \cdot m$), and the high saturation intervals occur in 112~114 mbsf, 130~145 mbsf and 150~160 mbsf respectively. The mineral components of different well intervals are used to calculate the P-wave velocity, to estimate the gas hydrate saturation of the 104~160 mbsf interval with the simplified three-phase equation (STPE) and the biot- gassmann theory by Lee (BGTL) models, and the average saturation was 5.2% and 6.0% and the highest was 22.7% and 21.6%, respectively. Adoption of the new method made it more efficient to get BGTL model parameters. Compared with the hydrate saturation estimated by the Expedition 372 from the Archie equation was used, the average gas hydrate saturation is similar in the 104~160 mbsf interval (about 6.0%) and about 8.5% in the interval of 130~145 mbsf. In this study, two sound velocity models were used to estimate the hydrate saturation of U1517, making the results more reliable. The accurate estimation of the gas hydrate saturation and distribution

资助项目: 国家自然科学基金“南海富含孔虫沉积物中水合物形成及其声学响应机理研究”(41474119), “裂隙充填型水合物声学响应机理研究”(41976077); 国家重点研发计划课题“水合物试采目标综合评价技术应用示范”(2017YFC0307602)

作者简介: 陈杰(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋地质学与天然气水合物方面的研究, E-mail: chenjie3545@163.com

通讯作者: 胡高伟(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋地质学与天然气水合物方面的研究, E-mail: hugaowei@mail.cgs.gov.cn

收稿日期: 2019-11-13; 改回日期: 2020-01-02. 蔡秋蓉编辑

at site U1517 will provide basic data for simulation of the creeping TLC phenomenon on the Hikurangi margin.

Key words: gas hydrate; hydrate saturations; STPE and BGTL; the Hikurangi margin; IODP 372

天然气水合物是一种笼状结构的类冰状结晶化合物,主要是由甲烷和水分子结合而成,因其在冻土地区和海洋大陆边缘广泛分布、与海底稳定性相关,以及可能对全球气候具有潜在影响而广受关注^[1-2]。新西兰 Hikurangi 大陆边缘每两年左右发生一次慢滑移事件^[3],有关证据显示,多期次水合物形成分解可能是造成该区产生蠕变的重要原因之一^[4]。

2017年11月—2018年1月执行了“蠕变中的天然气水合物滑动和 Hikurangi 随钻测井”为主旨的 IODP372 航次。该航次的主要目的之一是调查天然气水合物和海底滑坡的关系,因此,在新西兰 Hikurangi 边缘 Tuaheni 滑坡复合体(Tuaheni Landslide Complex, TLC)的 U1517 站位进行了随钻测井工作(图1)。该站位钻井的主要任务是通过在滑坡体和天然气水合物稳定区进行测井和采样,研究水合物与蠕变的关系。

20世纪末,研究人员在新西兰 Hikurangi 边缘发现地震高振幅异常和似海底反射(BSR)标志^[4-7]。该区域反射地震^[8-11]、电磁^[12-14]、甲烷渗漏、海水甲烷浓度、与渗漏相关的沉积坍塌和冷泉等证据均指示有天然气水合物存在^[15-19]。通过反射地震发现, Hikurangi 大陆边缘的 Tuaheni 滑坡复合体显示了活动蠕变变形的特征,且蠕变中的近陆边缘与海底天

然气水合物稳定带底部的尖灭相一致^[4],因此,科学家认为水合物分解—形成过程可能与新西兰 Hikurangi 边缘的多期次慢滑移密切相关^[4, 20-21]。TLC 地区水合物分布和含量估算是研究蠕变与水合物关系的必要环节。Mountjoy 提出3种机制解释浅层天然气水合物是如何导致慢滑移,主要认为是由于水合物的分解导致沉积物液化失稳、水合物分解对地层孔隙压力的影响和水合物含量对地层提供的不同支撑模式的影响^[4]。不同饱和度的水合物对沉积物的支撑模式不同^[22],因此,准确估算慢滑移区域水合物的饱和度可以进一步分析天然气水合物导致 TLC 慢滑移的原因,IODP372 航次测井和取心为水合物饱和度估算提供了可靠资料。

由于声速和电阻率对水合物储层最为敏感,常用声学、电学模型来估算天然气水合物饱和度^[23-24]。基于电阻率的模型有阿尔奇方程^[25]和连通性方程^[26];基于声速的模型有权重方程(Weighted equation, WE)^[27]、等效介质理论(Effective Media Theory, EMT)模型^[28]、改进的 Biot-Gassmann 理论(Biot-Gassmann Theory by Lee, BGTL)模型^[29-30]和简化三相介质方程(Simplified Three-Phase Equation, STPE)^[31]等,其中,常用于测井应用的模型主要是 STPE 和等效介质理论^[32]两种。由于 STPE 模型参数较易获取,所

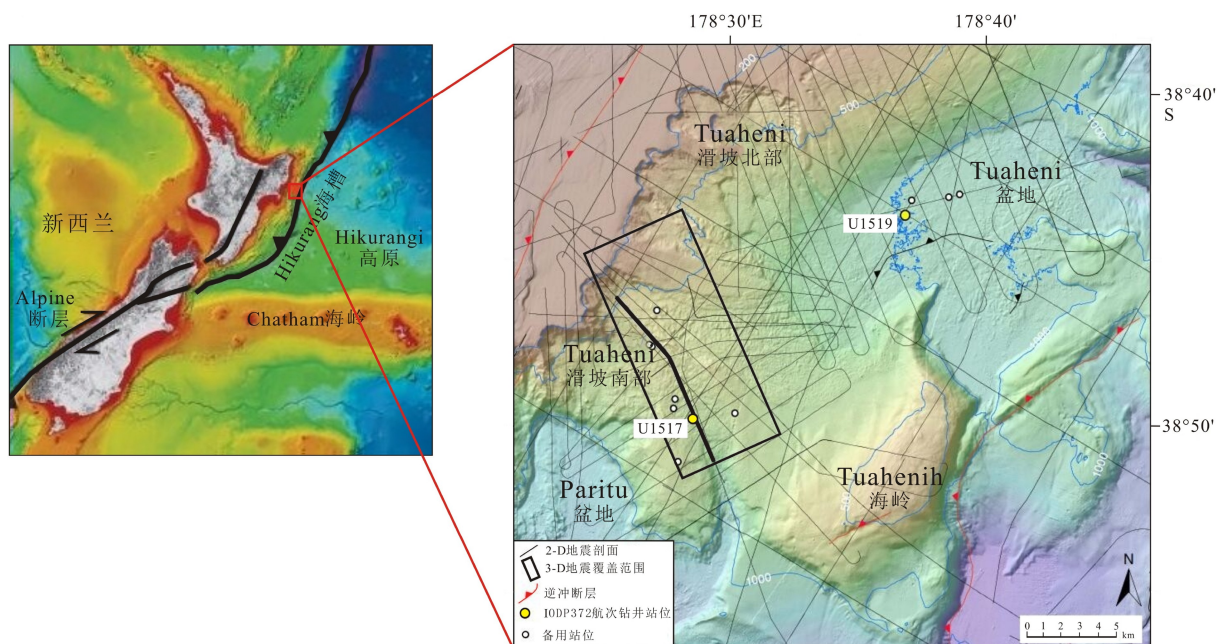


图1 滑坡复合体和 U1517 站位位置图^[36]

Fig.1 Location map showing the Tuaheni landslide complex and U1517 Site in Hikurangi margin^[36]

以多次被实际应用于估算天然气水合物饱和度, 均得到理想的预测效果^[33-34]; Hu 等采用超声探测技术和时域反射技术实时探测了沉积物的纵横波速度和水合物饱和度的变化情况, 检验了多种理论模型, 发现 BGTL 理论预测的纵、横波速度更接近实测值^[35], 但 BGTL 模型中与岩石固结程度相关参数难以通过实际地层数据计算, 从而导致较少被应用于测井数据估算水合物饱和度。本文主要通过 STPE 与 BGTL 模型对 U1517 站位水合物饱和度进行研究, 在 BGTL 模型使用新的参数选取方法, 使参数获取更为简易, 计算过程中, 根据岩性划分不同层段对应的矿物成分含量, 用于纵波速度模型计算, 以精确模型判断水合物储层深度分布和天然气水合物饱和度计算。

1 测井数据分析

IODP372 航次 U1517 站位测井位于 38°S、178°E (图 1), 井深约 205 mbsf。该航次通过随钻测井采集了井径、声波速度、伽马密度、孔隙度、自然伽马和电阻率等数据, 其中纵波数据在 160~168 mbsf 层段内未获取。通过对 LDEO (Lamont Doherty Earth Observatory) 数据库提供的 U1517 站位原始测井数据进行解释分析, 并拟合背景趋势线, 结果如图 2 所示, 实测纵波声速与背景拟合声速相比, 速度增加出现在 94~160 mbsf 层段, 氯离子浓度异常出现在 104~160 mbsf 层段; 在 94~104 mbsf 层段纵

波速度和孔隙度等明显增加, 而电阻率与密度减小, 氯离子浓度并无异常, 该层段的异常与 21~28 mbsf 层段相似, 可能为井孔和局部岩性变化造成 (图中黄色区域)。天然气水合物稳定区大概位于 104~160 mbsf, 并且在 130~145 mbsf 层段 (图中绿色区域), 纵波速度、电阻率和井径明显增加, 密度减小。该航次从 U1517 站位获得多个柱状样品, 使用红外热像仪进行扫描, 温度异常表明天然气水合物的存在, 并发现在岩心的上层沉积物或其岩心采集器中有甲烷释放^[37]。图 3 所示为地层因子与纵波速度交会图, 由于含天然气水合物的沉积物具有较高的纵波速度和地层因子, 所以含天然气水合物的沉积地层的交会图显示高于饱和水沉积地层^[34], 在 130~145 mbsf 层段显示较高的地层因子和纵波速度。

2 储层水合物饱和度估算

依据国际大洋发现计划出版物 (International Ocean Discovery Program Publications)^[36] 获取矿物类型及含量数据, 基于该数据, 根据岩性划分不同层段对应的矿物成分含量, 结果如图 4 所示, 用于纵波速度模型计算, 以精确天然气水合物饱和度计算值。岩石骨架的不同矿物类型的物性参数如表 1 所示。

2.1 简化三相介质模型 (STPE)

含天然气水合物储层具有相对较高的纵横波速度。本次研究中使用 STPE 模拟 U1517 站位井的

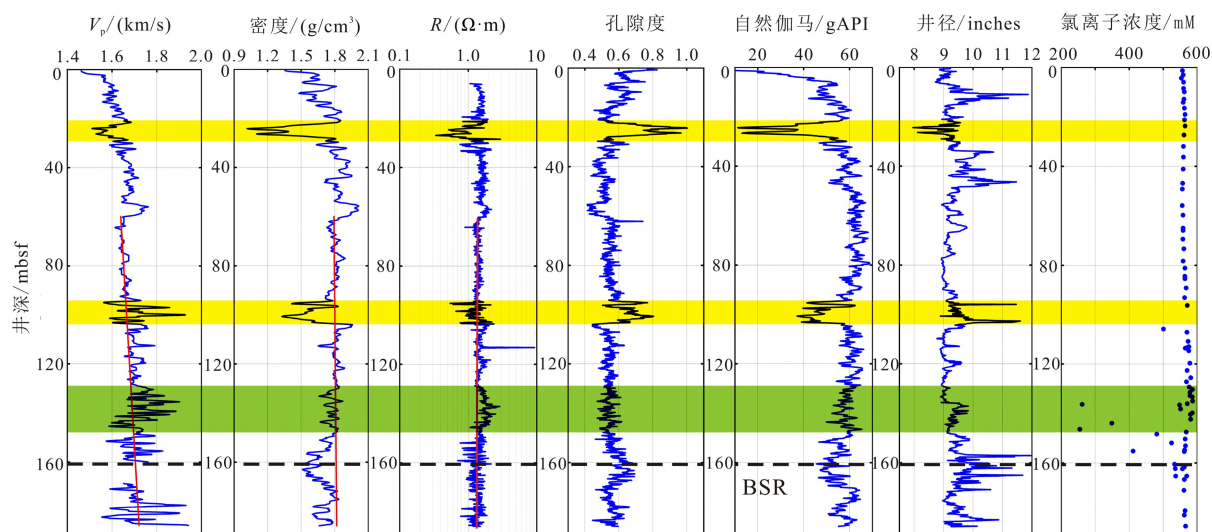


图 2 U1517 站位测井数据

蓝色实线为实测数据, 红色实线为拟合背景趋势, 黑色虚线为 BSR。

Fig.2 Well logs at Site U1517

The blue lines are measured logging data and the red lines are fitted background trends; the black dashed line is BSR.

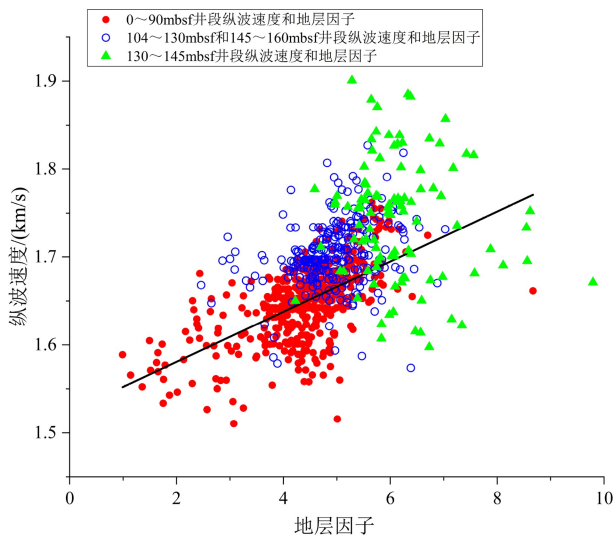


图3 U1517 站位井地层因子与纵波速度交会图
黑色实线为0~90 mbsf 拟合背景趋势线。

Fig.3 Cross plot of formation factor versus the measured P-wave velocities at Site U1517

The black line is fitted background trends of 0~90 mbsf.

纵波速度,其中用于纵波速度(V_p)建模的 STPE^[31,33]使用等式(1)对水合物储层的纵波速度建模:

$$V_p = \sqrt{\frac{k+4\mu/3}{\rho}}, V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (1)$$

式中 ρ 是含天然气水合物沉积模型的体积密度, k 是体积模量, μ 是剪切模量。建模参数 ϵ 是解释在加强主体沉积物骨架方面天然气水合物形成相对于压实的影响减小, Lee 和 Waite 推荐使用 $\epsilon=0.12$ 为建模数值^[30]。在 V_p 和 V_s 建模中使用的参数 α 使用等式(2)计算:

$$\alpha_i = \alpha_0(p_0/p_i)^n \approx \alpha_0(d_0/d_i)^n \quad (2)$$

式中 α_0 是有效压力 p_0 和深度 d_0 的固结参数, α_i 是有效压力 p_i 和深度 d_i 的固结参数,固结参数可以使用饱和水沉积物的速度来估算^[40]。固结参数取决于固结程度和该区域的有效压力, Mindlin 认为体积模和剪切模量为有效压力的 1/3 幂^[41],因此不同位置,根据研究区域的主要岩性, α 的值随深度而变化^[40]。通过建模速度基线和实测纵波速度之间的最佳拟合选定 α 的值^[40],本次研究用于 U1517 站位井的固结参数 $\alpha_i=42(60/d_i)^{1/3}$ 。使用上述参数,获得了井下剖面背景纵波速度和天然气水合物饱和度,饱和水沉积地层 V_p 符合程度较高(图 5, 图 6),黑色实线为航次实测纵波速度,红色实线为本文利用 STPE 模型计算结果,如图 5 所示,104~160 mbsf 层段内测井实测 V_p 大于理论基线速度,可能属于天然气水合物储层区,利用航次实测数据和模型结果计算出水合物饱和度(图 6)。结果显示,在 104~160 mbsf 的深度区间内平均饱和度约为 5.2%,最高

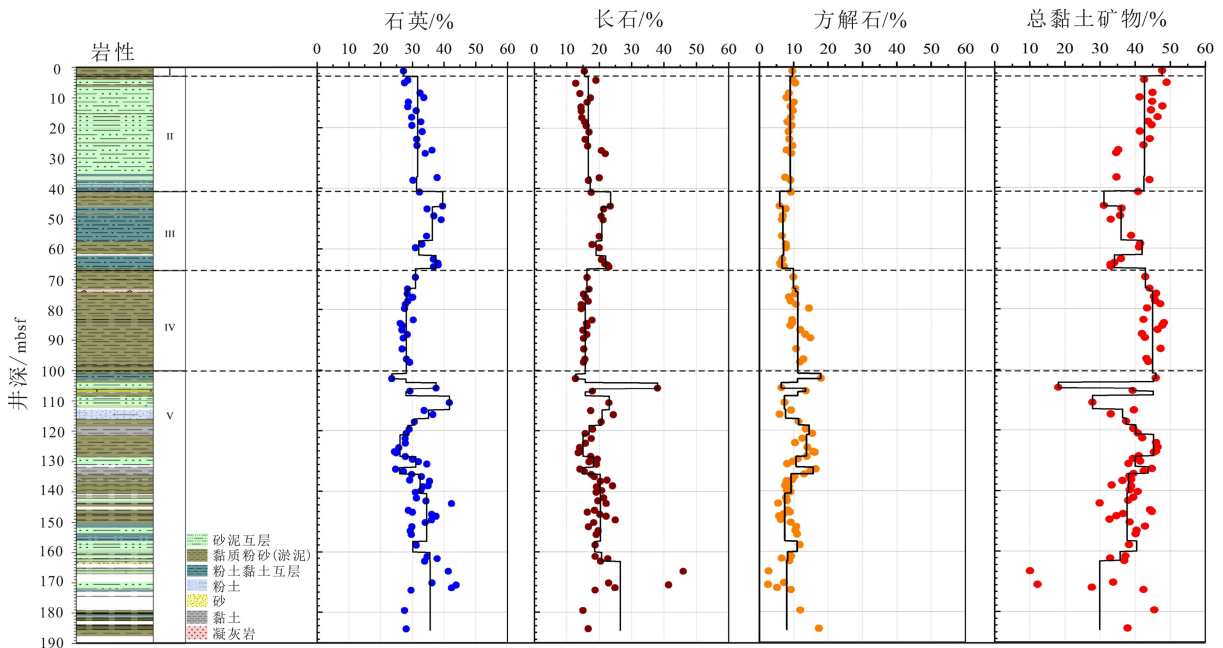


图4 U1517 站位所取岩心的岩性和岩石矿物成分相对含量数据
黑线为依据岩性平均矿物成分相对含量。

Fig.4 Simplified lithostratigraphic column with bulk powder XRD results, Site U1517

Black line is average mineral composition based on core data.

表 1 骨架组分及物性参数
Table 1 Constants used for the modeling

矿物成分	密度/(g/cm ³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	参考文献
总黏土矿物	2.58	20.9	6.6	[38]
石英	2.65	38	44	[33]
长石	2.63	75.6	25.6	[39]
方解石	2.71	76.8	32	[39]
天然气水合物 (5 MPa, 273 K)	0.925	8.41	3.54	[38]
海水	1	2.29	0	[33]

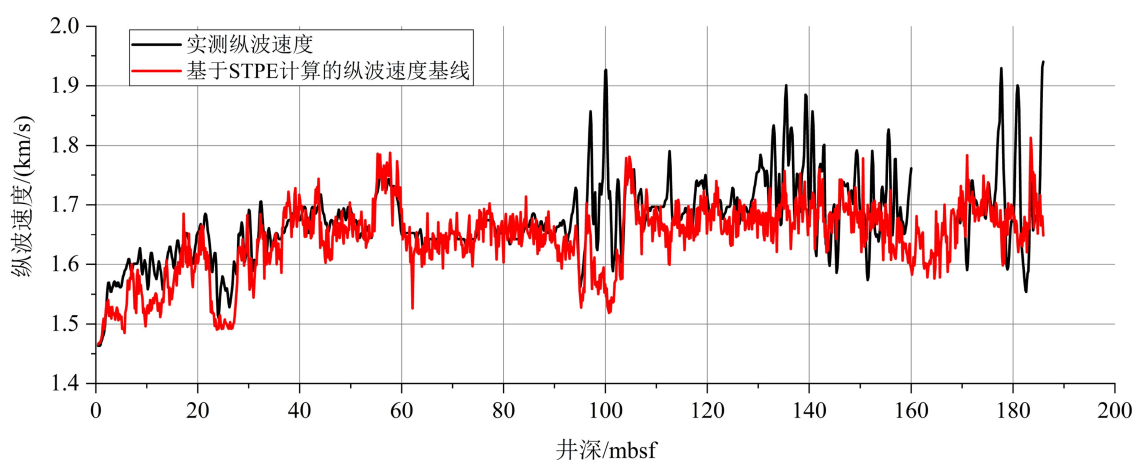


图 5 使用 STPE 在 U1517 站位井测量的纵波速度和计算的基线速度的比较

Fig.5 Measured and calculated baseline P-wave velocities with STPE at the Site U1517

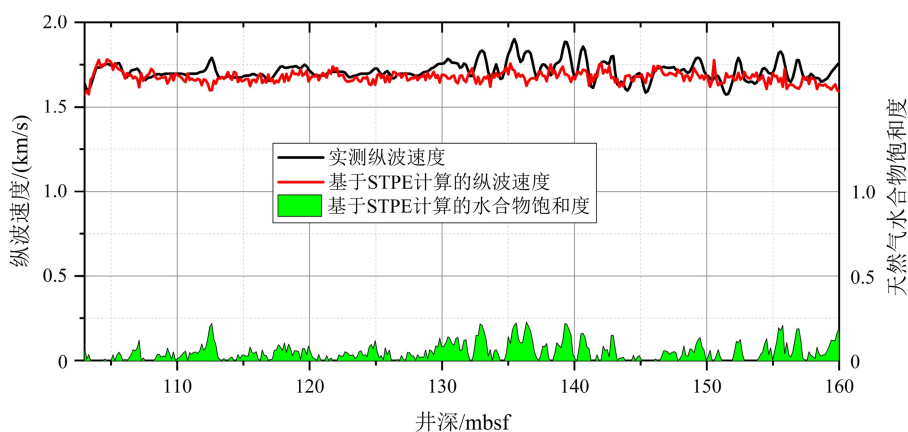


图 6 使用 STPE 计算水合物储层区的背景纵波速度及饱和度

Fig.6 Measured and calculated baseline resistivities and P-wave velocities at the Site U1517

饱和度达到 22.7%，其中 130~145 mbsf 层段内水合物饱和度较高，平均饱和度为 7.9%。

2.2 改进的 Biot-Gassmann 模型 (BGTL)

BGTL 理论建立在经典的 BGT 理论 (Biot-Gassmann Theory) 上，在预测速度时不仅考虑了分压的影响，而且还考虑了岩石的孔隙度、固结度等

因素的影响^[35]。在 BGTL 模型计算中，将天然气水合物作为基质中的一种矿物成分。本研究用于 V_p 建模的 BGTL 模型使用等式(1)进行。

公式(1)中沉积介质的剪切模量 μ 可由下式计算：

$$\mu = \frac{\mu_{ma} G^2 (1 - \Phi)^{2n} k}{k_{ma} + 4\mu_{ma} [1 - G^2 (1 - \Phi)^{2n}] / 3} \quad (3)$$

式中， k_{ma} 为岩石骨架的体积模量； μ_{ma} 为岩石骨架

的剪切模量; ϕ 为孔隙度; 常数 G 主要用来校正由基质中的黏土引起的差异。Han 等通过实验室数据表明 $G = 1$ 对清洁砂岩有利^[42], 随着黏土体积增加, G 将按下式(4)计算减少:

$$G = 0.9552 + 0.0448e^{-C_v/0.06714} \quad (4)$$

式中, 泥质含量 C_v 可使用来自 U1517A 井的伽马射线测井数据通过公式(5)^[34] 估算:

$$C_v = 0.083(2^{GCUR \times I_{GR}} - 1) \quad (5)$$

式中, GCUR 是与地层有关的经验系数, 新地层(古新近系地层)GCUR=3.7^[43], I_{GR} 为通过伽马测井数据计算的伽马射线指数, 可由公式(6)计算:

$$I_{GR} = \frac{GR_{log} - GR_{min}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (6)$$

式中, GR_{log} 为测井伽马值, GR_{min} 为砂岩层伽马值, GR_{max} 为泥岩层伽马值。

公式(3)中参数 n 取决于分压大小及岩石的固结程度, 可由公式(7)得到:

$$n = [10^{(0.426 - 0.235 \log 10 p)}] / m \quad (7)$$

测量数据表明 $m \approx 5$ 适合于固结沉积物, $m \approx 1.5$ 适用于疏松沉积物^[29]; 如图 7 所示利用 BGTL 预测饱和水沉积地层段(0~90 mbsf)速度和实测纵波速度对比, 其中使用 $P=8.0$ MPa 和 $C_v=58\%$, 改变 m 值预测速度, 在高孔隙度低纵波速度时 $m=2.5$ 预测速度拟合程度高, 而在低孔隙度高声速时, m 值应小于 2.5, 大于 1。在可能含天然气水合物地层(104~160 mbsf)的中子孔隙度主要为 45%~65%, 因此, 本次研究建模使用 $m=2.5$ 。

使用上述参数, 获得了井下剖面背景纵波速度和天然气水合物饱和度(图 8, 图 9), 如图所示, 黑色实线为航次实测纵波速度, 红色实线为本文使用

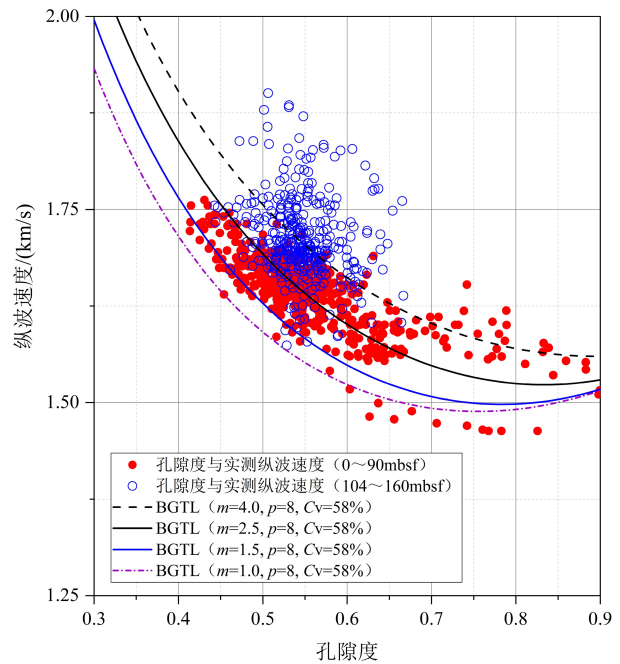


图 7 BGTL 预测和实测纵波速度

Fig.7 Measured and predicted P-wave velocities

BGTL 模型计算结果, 绿色区域为利用航次实测与模型速度计算的水合物饱和度, 104~160 mbsf 层段内测井实测 V_p 大于理论饱和水背景 V_p , 可能属于水合物储层区, 因此导出水合物饱和度。结果显示, 在 104~160 mbsf 的深度区间内平均饱和度约为 6.0%, 最高饱和度达到 21.6%, 其中 130~145 mbsf 层段内平均水合物饱和度为 8.5%。

3 讨论

图 10 为 U1517 站位井在 104~160 mbsf 层段的测井曲线, 通过测井数据和背景基线看出存在 3 层

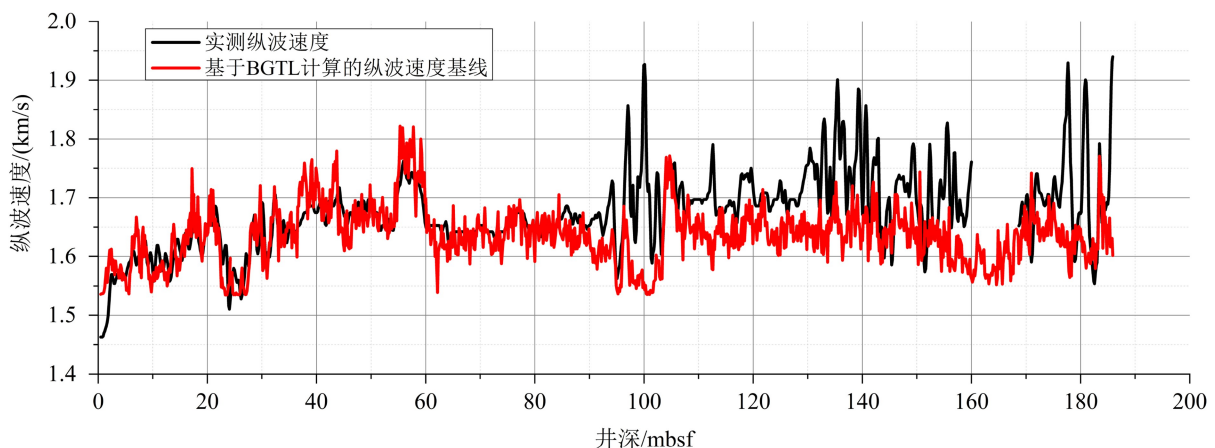


图 8 使用 BGTL 模型在 U1517 站位井测量的纵波速度和计算的基线速度比较

Fig.8 Measured and calculated baseline P-wave velocities with BGTL at the Site U1517

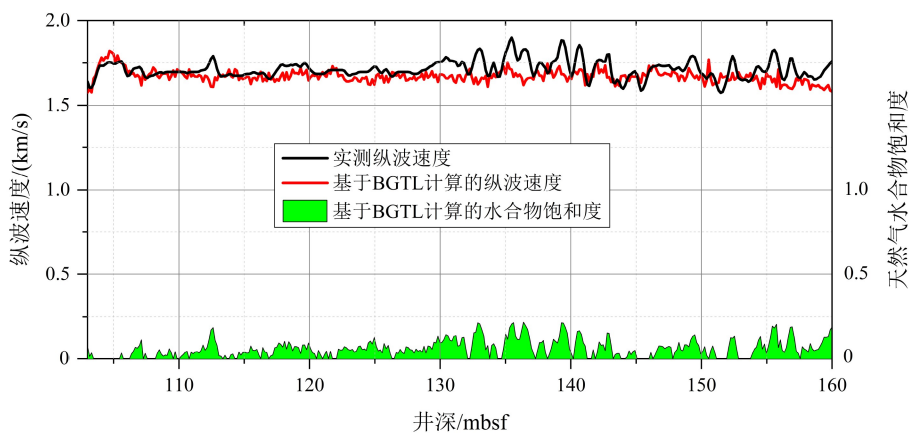


图 9 使用 BGTL 模型计算水合物储层区的背景纵波速度及饱和度

Fig.9 Background P-wave velocities and gas hydrate saturations at Site U1517 with BGTL

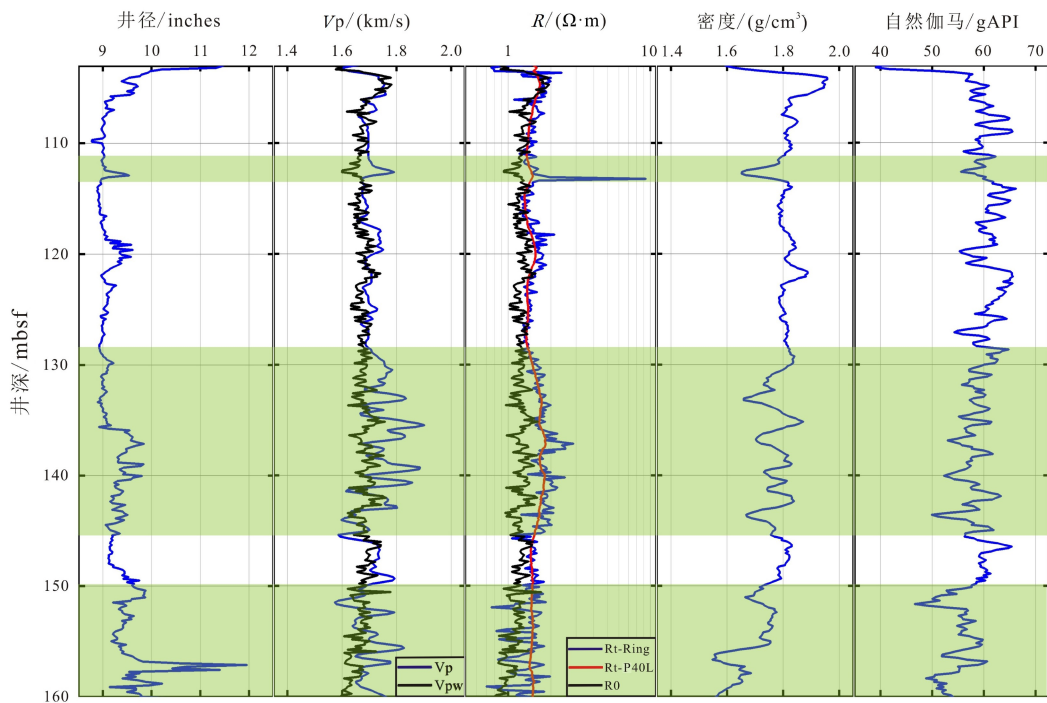


图 10 U1517 站位井井径、纵波速度、电阻率、密度和伽马测井曲线

V_p 为实测声波速度, V_{pw} 为背景速度值; Rt-Ring 为环电阻率; Rt-P40L 为低频随钻相移电阻; R0 为背景电阻率值。

Fig.10 The well logs from site U1517A showing the caliper, P-wave velocity, resistivity, density and gamma ray

V_p is measured velocity, V_{pw} is calculated velocity baseline, Rt-Ring is ring resistivity, Rt-P40L is 400 kHz phasor resistivity, R0 is calculated resistivity baseline.

纵波速度和电阻率明显异常的含水合物层段,同时,井径、密度和伽马测井数据均有不同程度的异常。在 112~114 mbsf 层段,环电阻率和声波速度明显增加,最高峰值分别为 9.25 $\Omega \cdot m$ 和 1.79 km/s,可能为含天然气水合物的薄层;在 130~145 mbsf 层段,环电阻率和声波速度最高峰值分别为 2.88 $\Omega \cdot m$ 和 1.90 km/s,属于较厚层的含水合物区域;在 150~160 mbsf 层段,密度与自然伽马降低较为明显,环电阻率和声波速度最高峰值分别为 1.97 $\Omega \cdot m$

和 1.83 km/s。

如图 11 所示,由纵波速度数据通过 STPE 和 BGTL 模型估算了 U1517 站位井 104~160 mbsf 层段的天然气水合物饱和度,并与 IODP372 航次科学家利用阿尔奇公式和氯离子浓度两种方法计算结果相比较。STPE、BGTL 和航次科学家利用阿尔奇公式 3 种模型在 104~160 mbsf 层段计算的平均饱和度分别为 5.2%、6.0% 和 6.5%,130~145 mbsf 层段的平均饱和度分别为 7.9%、8.5% 和 9.6%;130~

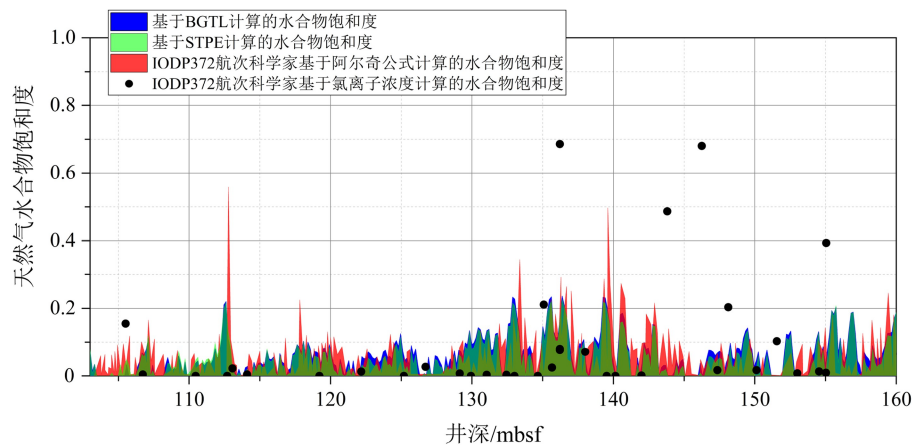


图 11 根据 BGTL、STPE 与电阻率、氯离子估算的天然气水合物饱和度的对比

Fig.11 The gas hydrate saturation calculated by BGTL, STPE compared with the hydrate saturation calculated by the Expedition 372 scientists used the Archie equation and the chloride concentration

145 mbsf 层段符合航次科学家使用氯离子浓度含量估算的高饱和度层段。112~114 mbsf 和 130~145 mbsf 层段, 阿尔奇公式估算的最高饱和度分别为 56% 和 49%, 大于 BGTL 和 STPE 计算结果, 但是电阻率识别高饱和度薄层水合物约为 2~5 cm, 而声波测井分辨率约为 15 cm, 该薄层饱和度异常可能由于声波测井无法探测到而引起的, 同时井径也发生变化, 可能影响随钻测井速度与电阻率。氯离子异常在局部地层出现异常高值, 从岩心分析看, 异常高值与薄砂层相对应。因此, 在 104~160 mbsf 层段 3 种方法估算的饱和度随深度变化相似, 表明不同测井数据之间差异不大, 且天然气水合物平均饱和度最高的层段为 130~145 mbsf。使用 STPE 和 BGTL 模型计算的饱和水地层(0~90 mbsf)的纵波速度与实测纵波速度比较见图 12 所示, 对于 U1517 井 BGTL 模型比 STPE 模型更适用于该站位水合物饱和度估算。

4 结论

(1) 通过 U1517 站位随钻测井和岩心数据综合分析, 证实了该站位黏土质粉砂岩性不同层位存在天然气水合物, 水合物呈层状分布。天然气水合物储层区域在 104~160 mbsf 层段, 其中存在 3 层纵波速度和电阻率明显异常的含水合物层段(112~114、130~145 和 150~160 mbsf), 112~114 mbsf 层段可能为薄的天然气水合物层, 而 130~145 mbsf 层段相较于其他层段水合物饱和度相对较高。其中 112~114 mbsf 层段天然气水合物饱和度最高, 130~145 mbsf 层段为主要天然气水合物赋存区域。

(2) 依据 LWD 和取心数据, 在计算过程中, 根

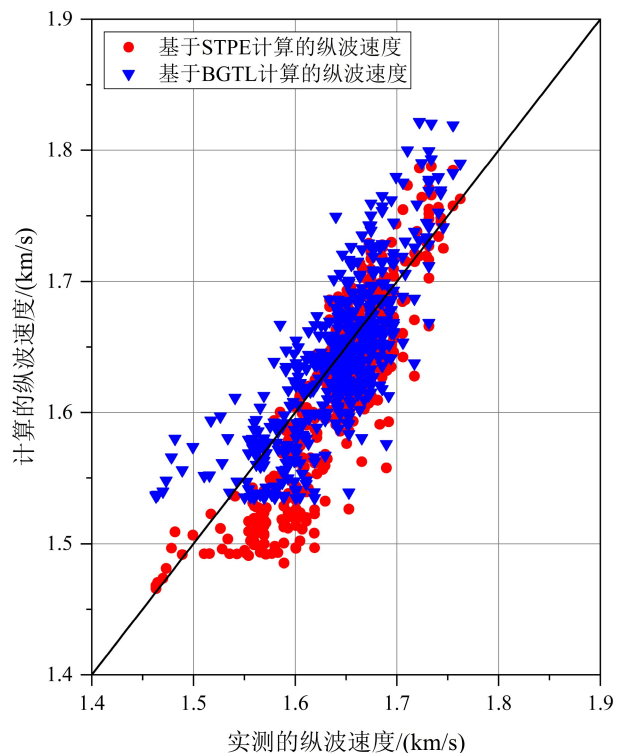


图 12 STPE 与 BGTL 在饱和水地层(0~90 mbsf) 预测纵波速度与实测纵波速度对比

Fig.12 The measured P-wave velocity compared with the calculated results of the STPE and BGTL in water-saturated sediments (0~90 mbsf)

据岩性划分不同井段对应的矿物成分含量, 用于纵波速度模型计算, 并使用饱和水地层孔隙度与纵波速度拟合得到 BGTL 模型参数的方法, 使 BGTL 模型更便于应用到测井资料估算水合物饱和度, 通过 STPE 和 BGTL 模型计算出了 U1517 站位的水合物饱和度, 并比较分析两种模型在饱和水地层的预测与实测纵波速度表明 BGTL 拟合度高于 STPE; 计算

结果与航次科学家估算的饱和度相比,平均饱和度相近,3种方法计算的水合物饱和度值随深度变化相似,表明计算结果的合理性。

致谢: 本研究所用样品和数据由 IODP372 航次提供,中国 IODP 办公室提供了胡高伟参加航次的旅费资助,在此一并致谢!

参考文献 (References)

- [1] Nixon M F, Grozic J L H. Submarine slope failure due to gas hydrate dissociation: a preliminary quantification [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2007, 44 (3): 314-325.
- [2] Brewer P G. Gas hydrates and global climate change [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2000, 912 (1): 195-199.
- [3] Wallace L M, Webb S C, Ito Y, et al. Slow slip near the trench at the Hikurangi subduction zone, New Zealand [J]. *Science*, 2016, 352(6286): 701-704.
- [4] Mountjoy J J, Pecher I, Henrys S, et al. Shallow methane hydrate system controls ongoing, downslope sediment transport in a low-velocity active submarine landslide complex, Hikurangi Margin, New Zealand [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15 (11): 4137-4156.
- [5] Singh C. Multiphase fluid flow in presence of Transverse Magnetic Field [J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1987 (53).
- [6] Townend J. Estimates of conductive heat flow through bottom-simulating reflectors on the Hikurangi and southwest Fiordland continental margins, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 1997, 141 (1-4): 209-220.
- [7] Henrys S A, Ellis S, Uruski C. Conductive heat flow variations from bottom-simulating reflectors on the Hikurangi margin, New Zealand [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30 (2): 1065.
- [8] Pecher I A, Henrys S A, Zhu H. Seismic images of gas conduits beneath vents and gas hydrates on Ritchie Ridge, Hikurangi margin, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2004, 47 (2): 275-279.
- [9] Crutchley G J, Pecher I A, Gorman A R, et al. Seismic imaging of gas conduits beneath seafloor seep sites in a shallow marine gas hydrate province, Hikurangi Margin, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 272 (1-4): 114-126.
- [10] Navalpakam R S, Pecher I A, Stern T. Weak and segmented bottom simulating reflections on the Hikurangi Margin, New Zealand—Implications for gas hydrate reservoir rocks [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2012, 88-89: 29-40.
- [11] Gorman A R, Fletcher P T, Baker D, et al. Characterisation of focused gas hydrate accumulations from the Pegasus Basin, New Zealand, using high-resolution and conventional seismic data [J]. *ASEG Extended Abstracts*, 2018, 2018 (1): 1-4.
- [12] Schwalenberg K, Haeckel M, Poort J, et al. Evaluation of gas hydrate deposits in an active seep area using marine controlled source electromagnetics: Results from Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 272 (1-4): 79-88.
- [13] Schwalenberg K, Wood W, Pecher I, et al. Preliminary interpretation of electromagnetic, heat flow, seismic, and geochemical data for gas hydrate distribution across the Porangahau Ridge, New Zealand [J]. *Marine Geology*, 2010, 272 (1-4): 89-98.
- [14] Schwalenberg K, Rippe D, Koch S, et al. Marine-controlled source electromagnetic study of methane seeps and gas hydrates at Opouawe Bank, Hikurangi Margin, New Zealand [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122 (5): 3334-3350.
- [15] Faure K, Greinert J, Pecher I A, et al. Methane seepage and its relation to slumping and gas hydrate at the Hikurangi margin, New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2006, 49 (4): 503-516.
- [16] Naudts L, Greinert J, Poort J, et al. Active venting sites on the gas-hydrate-bearing Hikurangi Margin, off New Zealand: Diffusive-versus bubble-released methane [J]. *Marine Geology*, 2010, 272 (1-4): 233-250.
- [17] Greinert J, Lewis K B, Bialas J, et al. Methane seepage along the Hikurangi Margin, New Zealand: Overview of studies in 2006 and 2007 and new evidence from visual, bathymetric and hydroacoustic investigations [J]. *Marine Geology*, 2010, 272 (1-4): 6-25.
- [18] Fraser D R A, Gorman A R, Pecher I A, et al. Gas hydrate accumulations related to focused fluid flow in the Pegasus Basin, southern Hikurangi Margin, New Zealand [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 77: 399-408.
- [19] Crutchley G J, Kroeger K F, Pecher I A, et al. Gas hydrate formation amid submarine canyon incision: Investigations from New Zealand's Hikurangi subduction margin [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18 (12): 4299-4316.
- [20] Crutchley G J, Kroeger K F, Pecher I A, et al. How tectonic folding influences gas hydrate formation: New Zealand's Hikurangi subduction margin [J]. *Geology*, 2019, 47 (1): 39-42.
- [21] Gross F, Mountjoy J J, Crutchley G J, et al. Free gas distribution and basal shear zone development in a subaqueous landslide—Insight from 3D seismic imaging of the Tuaheni Landslide Complex, New Zealand [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 502: 231-243.
- [22] 胡高伟, 李承峰, 业渝光, 等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57 (5): 1675-1682. [HU Gaowei, LI Chengfeng, YE Yuguang, et al. Observation of gas hydrate distribution in sediment pore space [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57 (5): 1675-1682.]
- [23] Hu G W, Ye Y G, Zhang J, et al. Acoustic response of gas hydrate formation in sediments from South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 52: 1-8.
- [24] Bu Q T, Hu G W, Ye Y G, et al. The elastic wave velocity response of methane gas hydrate formation in vertical gas migration systems [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2017, 14 (3): 555-569.
- [25] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics [J]. *Transactions of AIME*, 1942, 146 (1): 54-62.

- [26] Montaron B. Connectivity theory—a new approach to modeling non-Archie rocks [J]. *Petrophysics*, 2009, 50(2): 102-115.
- [27] Lee M W, Hutchinson D R, Collett T S, et al. Seismic velocities for hydrate-bearing sediments using weighted equation [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B9): 20347-20358.
- [28] Helgerud M B, Dvorkin J, Nur A, et al. Elastic-wave velocity in marine sediments with gas hydrates: Effective medium modeling [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(13): 2021-2024.
- [29] Lee M W. Modified Biot-Gassmann theory for calculating elastic velocities for unconsolidated and consolidated sediments [J]. *Marine Geophysical Researches*, 2002, 23(5-6): 403-412.
- [30] Lee M W, Waite W F. Estimating pore-space gas hydrate saturations from well log acoustic data [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(7): Q07008.
- [31] Lee M W. Models for gas hydrate-bearing sediments inferred from hydraulic permeability and elastic velocities[R]. *Scientific Investigations Report 2008-5219*. U. S. Geological Survey, 2008.
- [32] 王秀娟, 钱进, Lee M. 天然气水合物和游离气饱和度评价方法及其在南海北部的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 35-47. [WANG Xiujuan, QIAN Jin, Lee M. Methods for estimation of gas hydrate and free gas saturations and application to the northern slope of South China Sea [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 35-47.]
- [33] Lee M W, Collett T S. Scale-dependent gas hydrate saturation estimates in sand reservoirs in the Ullung Basin, East Sea of Korea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 47: 195-203.
- [34] Wang X J, Lee M, Collett T, et al. Gas hydrate identified in sand-rich inferred sedimentary section using downhole logging and seismic data in Shenhu area, South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 51: 298-306.
- [35] Hu G W, Ye Y G, Zhang J, et al. Acoustic properties of gas hydrate-bearing consolidated sediments and experimental testing of elastic velocity models [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(B2): B02102.
- [36] Pecher I A, Barnes P M, LeVay L J, et al. International ocean discovery program expedition 372 preliminary report creeping gas hydrate slides and Hikurangi LWD [J]. *Integrated Ocean Drilling Program: Preliminary Reports*, 2018, 372: 1-35.
- [37] Pecher I A, Barnes P M, LeVay L J, et al. *Proceedings of the International Ocean Discovery Program, 372A*[Z]. College Station, TX: International Ocean Discovery Program, 2019.
- [38] Waite W F, Santamarina J C, Cortes D D, et al. Physical properties of hydrate-bearing sediments [J]. *Reviews of Geophysics*, 2009, 47(4): RG4003.
- [39] Mavko G, Mukerji T, Dvorkin J. *The Rock Physics Handbook*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [40] Lee M W. Proposed moduli of dry rock and their application to predicting elastic velocities of sandstones[R]. U. S. Geological Survey, 2005.
- [41] Mindlin R D. Compliance of elastic bodies in contact [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1949, 16(3): 259-268.
- [42] Han D H, Nur A, Morgan D. Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones [J]. *Geophysics*, 1986, 51(11): 2093-2107.
- [43] Tiab D, Donaldson E C. *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*[M]. 3rd ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2012.