

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017080103

神狐海域 W18/19 区块水合物上覆层水平渗透系数分布

李彦龙^{1,2}, 陈强^{1,2}, 胡高伟^{1,2}, 马廷雷³, 吴能友^{1,2}, 刘昌岭^{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. 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. 中国石油集团海洋工程有限公司, 北京 100028

摘要:水合物储层上覆地层水平渗透系数是水合物试采工程设计的关键参数之一。以我国南海北部神狐海域 W18/19 区块水合物上覆钙质黏土层孔压静力触探数据为依托, 在剖析基于位错理论的地层水平渗透系数预测模型基本原理的基础上, 进行 W18/19 区块水合物层上覆钙质黏土层水平渗透系数纵向分布规律预测。结果表明, Elsworth 方法不适用于 W18/19 区块水合物层上覆钙质黏土层水平渗透系数评价; W18/19 区块水合物层上覆钙质黏土层水平渗透系数为 $0.1 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-8}$ m/s, 且随着深度的增大而减小; 30mbsf 以浅地层预测结果受扰动较大, 30mbsf 以深地层的水平渗透率系数为 $0.1 \times 10^{-8} \sim 0.6 \times 10^{-8}$ m/s, 且不同模型预测结果间的差异较小; 孔压扩散模型和初始孔压分布函数的差异是导致不同模型预测结果差异的根本因素。

关键词:水平渗透系数; 孔压静力触探; 水合物试采; 钙质黏土; 位错理论; 神狐海域

中图分类号: P754.1 **文献标识码:** A

Distribution of horizontal permeability coefficient of the cover layer of HBS at Site W18/19 of Shenhu area

LI Yanlong^{1,2}, CHEN Qiang^{1,2}, HU Gaowei^{1,2}, MA Tinglei³, WU Nengyou^{1,2}, LIU Changling^{1,2}

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural 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. CNPC Offshore Engineering Company Limited, Beijing 100028, China

Abstract: Horizontal permeability coefficient (HPC) of the cover layer of hydrate bearing sediment (HBS) is one of the crucial factors that affect engineering design for marine hydrate production test. Based on the piezocone penetration test (CPTU) data obtained from the calcareous cover layer of hydrate formation at site W18/19 of the Shenhu area, different HPC estimation models based on the dislocation theory were analyzed, together with their corresponding adaptability to calcareous cover clay in the Shenhu area of northern South China Sea. Finally, the vertical distribution of HPC value for the calcareous cover clay of HBS at the site of W18/19 was predicted and analyzed using the above prediction models. The research results show that the Elsworth (2005) method is not adapt for HPC evaluation at site W18/19. Totally, HPC value at site W18/19 ranges from $0.1 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-8}$ m/s and increase gradually with depth. In the interval shallower than 30mbsf, HPC values are vastly fluctuated because of some disturbance. In the interval below 30mbsf, of which the HPC values range from $0.1 \times 10^{-8} \sim 0.6 \times 10^{-8}$ m/s, however, the gaps from different prediction models come closer. Prediction results indicate that pore-pressure diffusion model and diffusion function are two basic factors that lead to the gaps among HPC values obtained from different models.

Key words: horizontal permeability coefficient; piezocone penetration test; hydrate production test; calcareous strata; dislocation theory; Shenhu area

资助项目:国家自然科学基金“降压法开采水合物过程中储层动态出砂临界压差预测研究”(41606078); 泰山学者特聘专家项目 (ts201712079); 国家重点研发计划“水合物试采、环境监测与综合评价应用示范”(2017YFC0307600); 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金“南海北部水合物多分支孔降压开采方法研究”(QNLM2016ORP0207)

作者简介:李彦龙(1989—), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事海域天然气水合物开采相关的力学和工程地质评价工作, E-mail: liyanlongupc@163.com

通讯作者:胡高伟(1982—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事海域天然气水合物试采工程准备工作, E-mail: hgw-623@163.com

收稿日期: 2017-08-01; **改回日期:** 2017-08-30. 蔡秋蓉编辑

我国南海海域蕴藏大量的天然气水合物资源^[1,2],2017年由我国地质调查局主持在我国南海神狐海域开展首次天然气水合物试采工程获得成功,使我国成为全球首个实现在海域粉砂质储层水合物开采中获得连续稳定产气的国家^[3,4]。我国南海北部区域水合物储层埋藏浅、胶结性差、疏松程度极高^[5-7],水合物试采过程中对水合物上覆地层特性的评价是保证试采作业安全进行的必要条件。

地层水平渗透系数是直接反映土体渗透性的参数,获取水合物储层上覆地层水平渗透系数具有重要的工程实践意义^[8]。目前获取地层水平渗透系数的主要方法有室内渗透实验法、现场孔压消散法以及近年来逐渐发展完善的基于孔压静力触探数据资料进行反演的方法。由于室内实验法和现场孔压消散法耗时较长且其只能对测试特定深度的部分岩心或土层进行测试,不能反映地层渗透性能的纵向分布规律^[9,10]。因此,利用孔压静力触探获取的连续性资料,建立孔压静力触探参数与地层渗透系数之间的经验、半经验或理论关系式,对地层渗透系数进行反演,成为获取地层渗透系数的首选^[11,12]。其中最为行之有效且具有一定理论基础的,便是近年来逐步发展和完善的位错理论模型。

为此,本文在分析基于位错理论提出的不同的地层水平渗透系数预测模型基本原理、适用条件的基础上,提出采用基于位错理论的水平渗透系数预测模型计算神狐海域 W18/19 区块水合物上覆钙质黏土层水平渗透系数的合理性,基于位错理论模型对 W18/19 区块水合物上覆钙质黏土层水平渗透系数纵向分布规律进行预测。

1 水平渗透系数求解方法

目前国内外常用的基于孔压静力触探资料估算地层水平渗透系数的方法都是基于位错理论提出的^[13,14],其基本思想是孔压静力触探探头压入地层过程中,利用土层内有限单元的运动体积错位来近似模拟探头周围孔隙水压力的改变情况。其核心是将探头周围一定体积空间内孔隙水的渗流量等价于探头贯入产生的土体体积改变量,通过不同的渗流模型描述孔隙水的渗流规律,进而求解地层水平渗透系数^[15,16]。根据位错理论计算地层水平渗透系数的基本原理如图 1 所示。

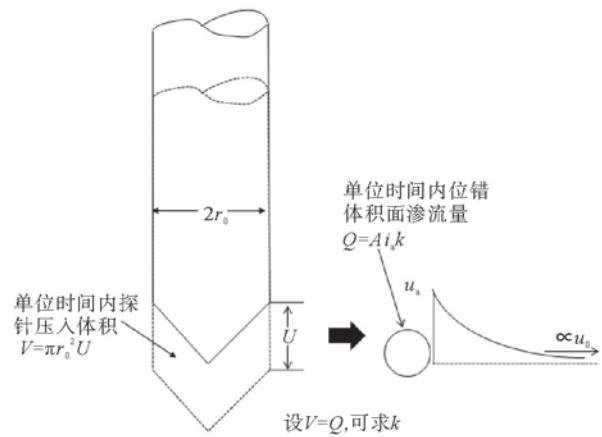


图 1 位错理论求解地层渗透系数原理图
Fig.1 Permeability coefficient calculation theory based on CPTU dislocation

图 1 中 A 表示孔压扩散过程中的控制面积, m^2 ; i_a 表示孔压扩散流表面的水力梯度; U 表示探头贯入速度, m/s ; r_0 表示探头半径, m ; u_2 锥头处实测孔隙水压力, Pa ; u_0 为静水压力, Pa 。由图 1 可知,基于位错理论求解地层水平渗透系数的基本原理可以表示为:

$$k = \frac{\pi r_0^2 U}{A i_a} \tag{1}$$

在孔压静力触探探头规格和贯入速度一定的条件下,地层水平渗透系数的估算结果直接取决于 A 、 i_a 。基于上述基本理论,不同的研究者通过假设探头周围孔压扩散流表面形状(图 2)、初始孔隙水压力分布函数(式 2)等的差异,提出了不同的地层水平渗透系数计算方法(表 1)。

$$\begin{cases} \text{幂函数形式: } u - u_0 = (u_2 - u_0) \frac{r_0}{r} \\ \text{负指数形式: } u - u_0 = (u_2 - u_0) e^{-\beta(\frac{r}{r_0}-1)} \\ (0.15 \leq \beta \leq 0.40) \end{cases} \tag{2}$$

引入无量纲渗透系数 K_D , 尽管不同的水平渗透系数计算模型所采取的孔压扩散模型和初始孔压分布假设有所区别,但式(1)均可转化为通式(3)来表述:

$$k = \xi \cdot K_D \cdot \frac{U r_0 \gamma_w}{\sigma'_{w0}} \tag{3}$$

式中, ξ 为模型系数,不同的学者提出的基于位错理论的地层水平渗透系数计算模型参数及其基本应用条件如表 1 所示。

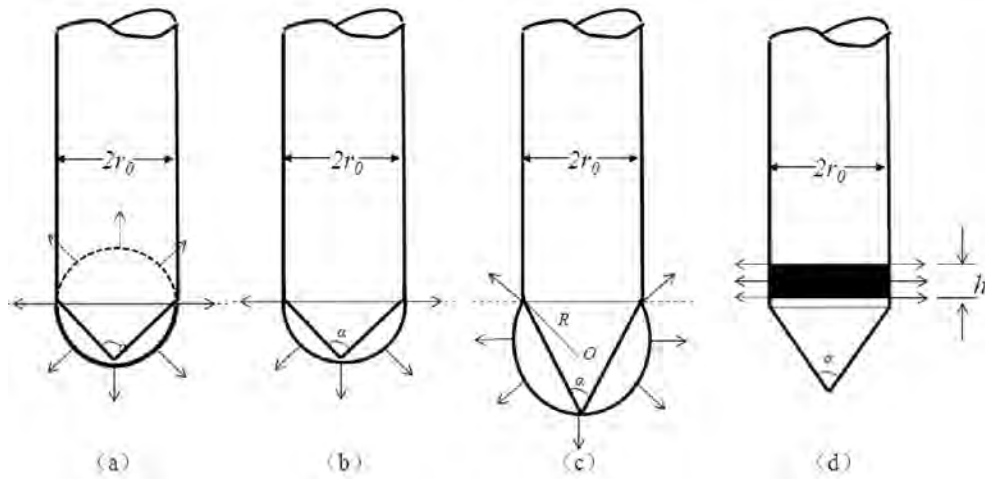


图 2 基于位错理论的孔压扩散模型示意图

a:球面流模型;b:半球面流模型;c:任意锥角球形流模型;d:柱面径向流模型

Fig.2 Flow models based on CPTU dislocation

a: spherical flow;b: half spherical flow;c:Spherical flow for any tip cone angle;d:cylindrical flow

表 1 中, Q_t 、 B_q 分别表示归一化锥尖阻力和孔压参数比, $Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$, $B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{vo}}$ 。 σ_{vo} 、 σ'_{vo} 分别为上覆土层的总自重应力及有效自重应力, q_t 为锥尖总阻力, α 为触探探头锥尖角, h 表示孔压过滤环的高度。

值得指出的是,虽然基于球面流、半球面流计算模型并未明确说明计算的地层渗透系数 k 的方向,然而实际上无量纲渗透系数 K_D 仍然主要受到土层水平向渗透系数的控制^[7],因此,上述方法计算的渗透系数均为水平渗透系数。而且,上述方法均假定 CPTU 探头的贯入产生正的超静孔隙水压力,而对

表 1 基于位错理论的地层水平渗透系数计算方法对比

Table 1 Horizontal permeability coefficient calculation methods based on CPTU dislocation theory

求解模型	孔压扩散模型	初始孔压分布函数	K_D	ξ	建议适用条件
Elsworth 方法 ^[17,18]	球面流	幂函数分布	$K_D = \frac{0.62}{(B_q Q_t)^{1.6}}$	0.25	$B_q Q_t < 1.2$, 不排水地层
Chai 方法 ^[12]	半球面流	幂函数分布	$\begin{cases} K_D = \frac{1}{B_q Q_t}, B_q Q_t < 0.45 \\ K_D = \frac{0.044}{(B_q Q_t)^{4.91}}, B_q Q_t \geq 0.45 \end{cases}$	0.5	正常固结或 轻微超固结 的黏性土和 松散的无黏 性土
王君鹏方法 ^[19,20]	任意锥角球面流	负指数分布		$\frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{0.3e^{-0.3(\frac{1}{\sin \alpha} - 1)}}$	
邹海峰方法 ^[15]	柱面径向流	幂函数分布	$\begin{cases} K_D = \frac{1}{B_q Q_t}, B_q Q_t < 0.35 \\ K_D = \frac{0.017}{(B_q Q_t)^{4.64}}, B_q Q_t \geq 0.35 \end{cases}$	$\frac{r_0}{2h}$	
李镜培方法(2016) ^[21]	柱面径向流	负指数分布	$\begin{cases} K_D = \frac{0.1}{B_q Q_t}, B_q Q_t < 0.45 \\ K_D = \frac{0.0044}{(B_q Q_t)^{4.91}}, B_q Q_t \geq 0.45 \end{cases}$	$\frac{r_0}{0.6h}$	

强超固结黏土和致密砂土,探头贯入可能引起周围土体剪胀,从而导致正超静孔隙水压力的降低,甚至产生负值。因此,上述方法均仅适用于松散的无黏性土与正常固结或轻微超固结的黏性土。

2 水合物上覆层水平渗透系数分布

2.1 CPTU 测试曲线特征

CPTU 测试采用国际标准探头完成, W18/19

区块全井段井下 CPTU 测试深度达 141mbsf, 测试区平均水深约 1300m。与地层水平渗透系数分布求解相关的典型 CPTU 测试结果如图 3 所示。

由图 3 可知, W18/19 区块 CPTU 测试过程中锥尖阻力、孔隙压力线性规律比较明显, 说明该站位纵向上土类分布较为一致, 但自上而下土层压实程度逐渐增大。临井全井段取心结果显示, 该区块水合物上覆地层为典型的钙质黏土层。

由图 4 可知, W18/19 区块水合物上覆地层超孔隙压力和有效上覆土应力线性趋势较好, 超孔隙

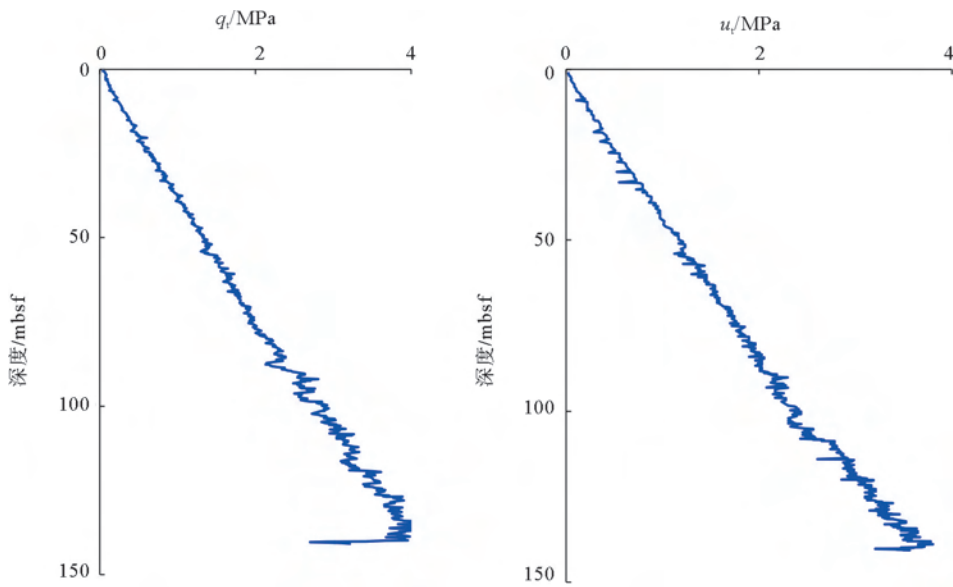


图 3 W18/19 区块典型 CPTU 测试结果
Fig.3 Typical CPTU test results at site W18/19

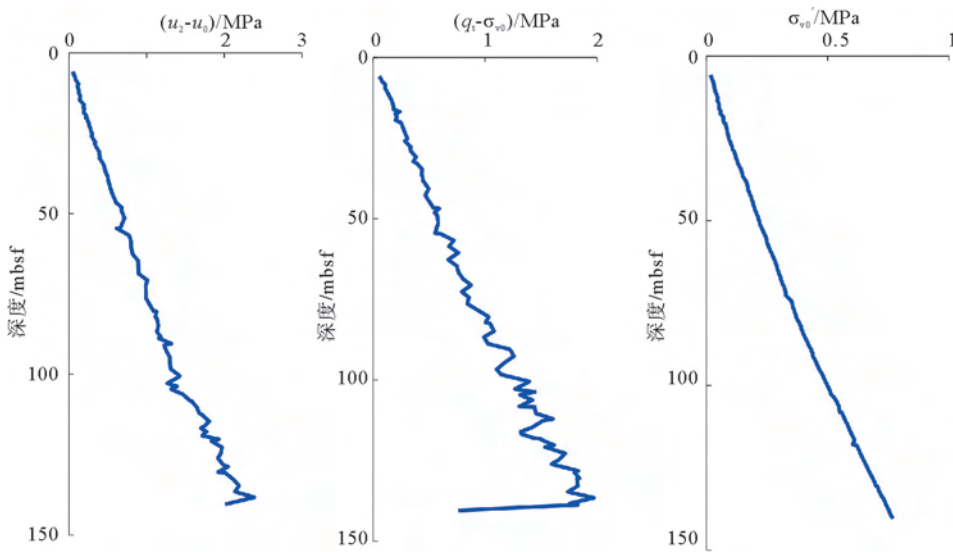


图 4 W18/19 区块上覆地层超孔隙压力、有效锥尖阻力和有效上覆土应力分布
Fig.4 Excess pore-pressure, effective cone resistance and effective overlying stress at site W18/19

压力均为正值,地层为正常固结地层,因此,可以采用位错理论,利用孔压静力触探基本参数进行地层水平渗透系数纵向分布规律的求解。

2.2 地层水平渗透系数纵向分布规律

由表 1 可知,求解地层水平渗透系数的关键是计算无量纲参数($B_q \cdot Q_t$),W18/19 区块水合物上覆地层无量纲参数($B_q \cdot Q_t$)的纵向分布规律如图 5 所示。由图可知,测试站位水合物上覆钙质黏土层无量纲参数的基本分布范围是: $2.5 \leq B_q \cdot Q_t \leq 3.6$,而文献[22]指出,Elsworth 方法的基本适用条件是 $B_q \cdot Q_t < 1.2$,因此,Elsworth 方法不适用于我国南海神狐海域天然气水合物上覆钙质黏土层评价。

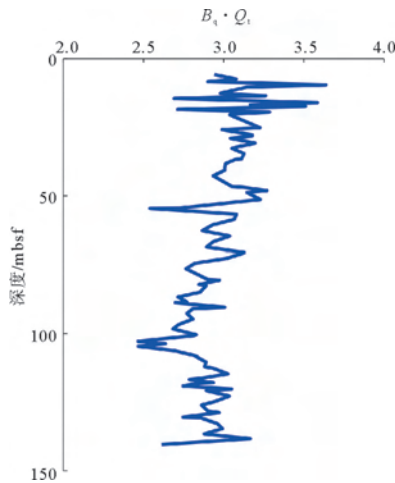


图 5 W18/19 区块无量纲参数 $B_q \cdot Q_t$ 分布

Fig.5 $B_q \cdot Q_t$ versus depth relationship at site W18/19

因此,以下将基于半球面流、任意锥角球面流和柱面径向流模型评价水合物上覆钙质黏土层的水平渗透系数。基于不同预测模型的水合物上覆钙质黏土层水平渗透系数纵向分布规律评价结果如图 6 所示。

由图 6 可知,W18/19 水合物储层上覆钙质黏土层水平渗透率系数为 $0.1 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-8}$ m/s,当深度小于 30mbsf 时,地层水平渗透率系数较大,且不同模型的预测结果均有较大的扰动,模型预测结果离散性强。当深度大于 30mbsf 时,不同模型的预测结果趋于一致,30mbsf 以深地层的水平渗透率系数为 $0.1 \times 10^{-8} \sim 0.6 \times 10^{-8}$ m/s,且随着深度的增加,水平渗透率系数逐渐降低。

为了进一步分析不同模型对水合物上覆钙质黏土层水平渗透率系数预测结果的差异,将 30mbsf

以深地层的预测结果单独分析(如图 6 右下角)。横向对比结果发现,不同模型预测结果之间恒存在如下关系式:

$$k_{\text{Chai}} \leq k_{\text{李镜培}} < k_{\text{王君鹏}} \leq k_{\text{邹海峰}} \quad (4)$$

式(4)中下标分别代表不同的预测模型。即:虽然从数量级上来讲,不同模型的预测结果均表明 W18/19 区块水合物上覆地层的水平渗透率系数在 10^{-8} m/s 量级,但 Chai 模型和李镜培模型预测的水合物上覆钙质黏土层水平渗透率系数较接近且偏保守,而王君鹏方法和邹海峰方法的预测结果较接近且偏大。

但对比上述预测结果与表 1 可知,从探针外围初始孔压分布函数来分析,邹海峰方法与 Chai 方法均假设探针外围初始孔隙压力扩散模式为幂函数分布,而王君鹏方法和李镜培方法均假设探针外围初始孔隙压力扩散模式为负指数分布。而从孔压扩散模型的角度来分析,Chai 方法与王君鹏方法均采用“类球面流”模型,而邹海峰方法与李镜培方法则采用柱面径向流模型,上述结论与式(4)的相对大小关系没有确切的对应关系,因此,地层水平渗透系数是孔压扩散模型和孔压分布函数共同作用的结果,虽然部分研究已证明负指数分布函数更能确切的表述静力触探探针外围孔压分布规律^[23,24],但是如果抛开孔压扩散模型,不能仅利用孔压分布函数来判断水平渗透系数计算模型对特定土层的适应性。

3 结论

(1) 位错理论提供了利用 CPTU 数据直接进行地层水平渗透系数估算的有效途径,南海北部 W18/19 区块水合物上覆钙质黏土层属于正常固结土层,孔压静力触探探头贯入过程中产生的超孔隙压力均为正值,因此,可以用基于位错理论的模型评价该区域水合物上覆钙质黏土层的水平渗透系数,Elsworth 方法不适用于 W18/19 区块水合物上覆钙质黏土层水平渗透系数评价;

(2) 基于不同的模型,得到的 W18/19 区块水合物上覆钙质黏土层水平渗透系数为 $0.1 \times 10^{-8} \sim 4 \times 10^{-8}$ m/s,且随着深度的增大而减小;30mbsf 以浅地层预测结果受扰动较大,30mbsf 以深地层的水平渗透率系数为 $0.1 \times 10^{-8} \sim 0.6 \times 10^{-8}$ m/s 且不同模型预测结果间的差异较小,因此,基于位错理论的模型预测结果能反映 W18/19 区块水合物上覆钙质黏土层水平渗透系数分布区间;

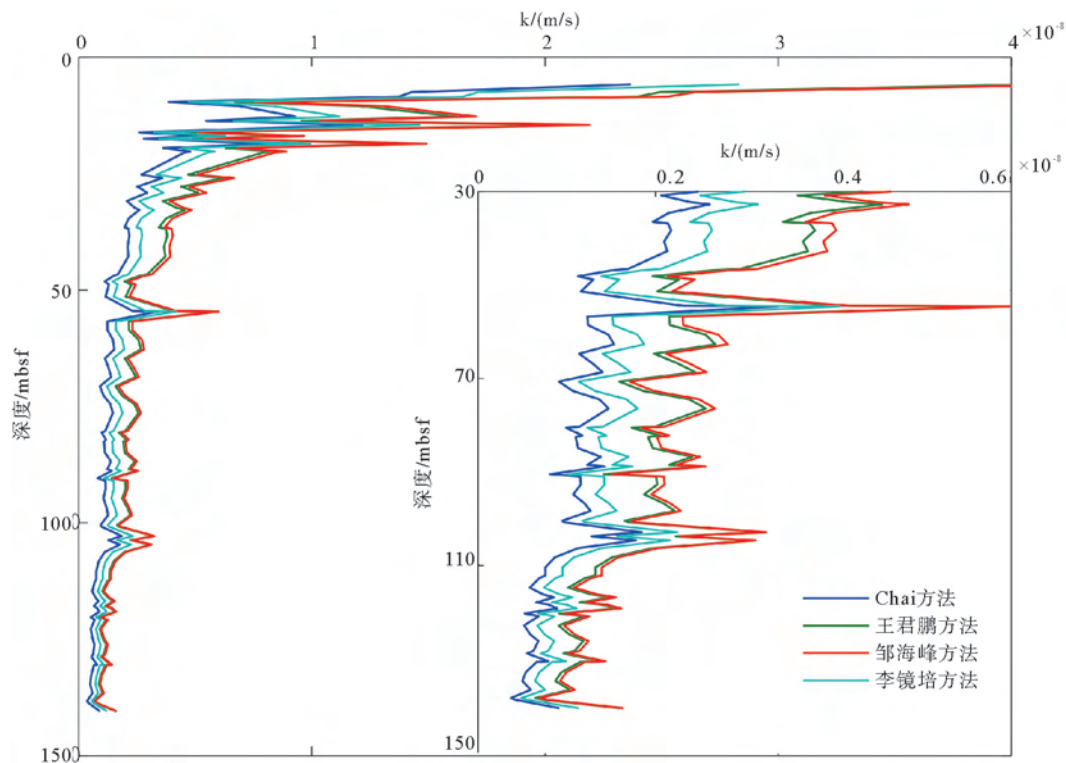


图6 W18/19区块水合物上覆层水平渗透率系数纵向分布规律

Fig.6 Vertical distribution of horizontal permeability coefficient at site W18/19

(3) 孔压扩散模型和初始孔压分布函数的差异是导致不同模型预测结果差异的根本因素,为了进一步优化模型,需要从以上两方面进行优化,并结合实际矿场孔压消散结果和室内渗透系数测试结果对模型进行修正,才能进一步增强模型的实用性。

参考文献 (References)

- [1] Wu Nengyou, Zhang Haiqi, Yang Shengxiong, et al. Gas hydrate system of Shenhu area, northern South China Sea: Geochemical results [J]. *Journal of Geological Research*, 2011, 10: 1687-8833.
- [2] 龚跃华, 张光学, 郭依群, 等. 南海北部神狐西南海域天然气水合物成矿远景[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(2): 97-104.[GONG Yuehua, ZHANG Guangxue, GUO Yiqun, et al. Prospect of gas hydrate resource in the area to southwest Shenhu of northern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(2): 97-104.]
- [3] Li J F, Ye J L, Qin X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. *China Geology*, 2018, 1: 5-16.
- [4] http://china.cnr.cn/xwwgf/20170518/t20170518_523762235.shtml, 2017-05-18.
- [5] 苏明, 沙志彬, 乔少华, 等. 南海北部神狐海域天然气水合物钻探区第四纪以来的沉积演化特征[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(8): 2975-2985.[SU Ming, SHA Zhibin, QIAO Shaohua, et al. Sedimentary evolution since Quaternary in the Shenhu hydrate drilling area, northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(8): 2975-2985.]
- [6] 陈芳, 周洋, 苏新, 等. 南海神狐海域含水合物层底栖有孔虫群落结构与同位素组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2): 1-8.[CHEN Fang, ZHOU Yang, SU Xin, et al. Benthic foraminifera and stable isotopic composition of gas hydrate-bearing sediments from Shenhu area in the northern South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 1-8.]
- [7] 高红艳, 钟广法, 梁金强, 等. 应用改进的 Biot-Gassmann 模型估算天然气水合物的饱和度[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(4): 83-89.[GAO Hongyan, ZHONG Guangfa, LIANG Jinqiang, et al. Estimation of gas hydrate saturation with modified Biot-Gassmann theory: A case from northern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(4): 83-89.]
- [8] Bergado D T, Asakami H, Alfaro M C, et al. Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117(10): 1509-1530.
- [9] Takai A, Inui T, Katsumi T. Evaluating the hydraulic barrier performance of soil-bentonite cutoff walls using the piezocone penetration test[J]. *Soils & Foundations*, 2016, 56(2): 277-290.
- [10] Indraratna B, Rujikiatkamjorn C, Sathananthan I. Radial consolidation of clay using compressibility indices and varying. [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2005, 42(5):

- 1330-1341.
- [11] Robertson P K. Estimating in-situ soil permeability from CPT&CPTU [C]// Proceedings of the 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'10). Huntington Beach, California, May, 2010: 535-542.
- [12] Chai J C, Agung P M A, Hino T, et al. Estimating hydraulic conductivity from piezocone soundings [J]. Géotechnique, 2011, 61(8): 699-708
- [13] Ansari Y, Merifield R, Sheng D. A piezocone dissipation test interpretation method for hydraulic conductivity of soft clays [J]. Soils & Foundations, 2014, 54(6):1104-1116.
- [14] Elsworth. Analysis of piezocone data using dislocation based methods[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(10): 1601-1623.
- [15] 邹海峰, 蔡国军, 刘松玉. 基于位错理论的饱和土渗流特性 CPTU 评价研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3):519-528. [ZOU Haifeng, CAI Guojun, LIU Songyu. Evaluation of coefficient of permeability of saturated soils based on CPTU dislocation theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3):519-528.]
- [16] Shen S L, Wang J P, Wu H N, et al. Evaluation of hydraulic conductivity for both marine and deltaic deposits based on piezocone testing[J]. Ocean Engineering, 2015, 110:174-182.
- [17] Elsworth D, Lee D S. Permeability determination from on-the-fly piezocone sounding [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 643-653.
- [18] Elsworth D, Lee D S. Limits in determining permeability from on-the-fly UCPT Sounding [J]. Géotechnique, 2007, 57(8): 769-685.
- [19] 王君鹏, 沈水龙. 基于孔压静力触探确定土体的渗透系数 [J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3335-3339. [WANG Junpeng, SHEN Shuilong. Determination of permeability coefficient of soil based on CPTU [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3335-3339.]
- [20] Wang J P, XU Y S, Ma L, et al. An approach to evaluate hydraulic conductivity of soil based on CPTU test [J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2013, 31(3): 242-253.
- [21] 李镜培, 李险峰, 张亚国. CPTU 确定饱和土体水平渗透系数的改进方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(8):185-188. [LI Jingpei, LI Xianfeng, ZHANG Yaguo. A modified approach to determine horizontal permeability coefficient of saturated soils based on CPTU [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(8):185-188]
- [22] Elsworth LEE D S. Limits in determining permeability from on-the-fly uCPT Sounding [J]. Géotechnique, 2007, 57(8): 769-685.
- [23] 马淑芝, 汤艳春, 孟高头, 等. 孔压静力触探测试机理、方法及工程应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2007. [MA Shuzhi, TANG Yanchun, MENG Gaotou, et al. Theory, Method and Application of Piezocone Penetration Test [M]. Wuhan: Press of China University of Geoscience, 2007.]
- [24] Koizumi Y, Ito K. Field tests with regard to pile driving and bearing capacity of piled foundations [J]. Soils and Foundations, 1967, 7(3): 30-53.