

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0398

基于原位多功能孔压静力触探的含浅层气地层识别与应用

汪晔欢^{1,2}, 王 勇^{1,2}, 孔令伟^{1,2}, 陈 成^{1,2}, 郭爱国^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 孔压静力触探 (piezocone penetration test, CPTU) 广泛应用于工程地质勘探中, 但对浅层气地层的识别与探测精度方面还存在不足。基于 CPTU 贯入原理, 分析了贯入过程中锥肩处土体的剪切变形特征, 借助不同初始饱和度含气密砂的固结不排水三轴剪切试验, 探讨了 CPTU 探头贯入饱和与含气砂层时锥肩处土体的超孔压响应规律及其差异性。结果表明: 气体的存在显著影响砂土的剪切变形特性, 且随着含气量增多, 砂土剪切体变量增大, 体变由剪胀过渡为剪缩; 但土体孔压响应的敏感性却在降低, 超孔压呈现出非负的典型特征, 将其作为含气层识别的重要标志。针对分布于我国江浙沿海平原浅层气的储层物性特征, 提出了基于原位多功能孔压静力触探的含浅层气地层精细识别方法。采用粉、细砂类土性辨识和超孔压非负特征构成“双控”指标进行初判, 再结合多功能辅助参数做进一步检验校正。应用于工程实际, 初步验证了该方法的有效性, 提高了多层位含气层辨识的精度, 可为浅层气地质区的岩土工程勘察与灾害防治提供借鉴。

关 键 词: 孔压静力触探 (CPTU); 浅层气; 地质灾害; 含气土; 识别方法

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 12-3474-10

Identification of shallow gas-bearing strata based on in situ multi-function piezocone penetration test and its application

WANG Ye-huan^{1,2}, WANG Yong^{1,2}, KONG Ling-wei^{1,2}, CHEN Cheng^{1,2}, GUO Ai-guo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Although piezocone penetration test (CPTU) is widely used in engineering geological exploration, it has undeniable deficiencies in detection accuracy of shallow gas-bearing strata. Based on CPTU penetration principle, the shear deformation characteristics of soil at cone shoulder during penetration are analyzed. Furthermore, using the consolidated undrained triaxial shear test of dense gassy sand with different initial saturations, the response law and difference of excess pore pressure in soil at cone shoulder are discussed when CPTU probe penetrates into saturated and gas-bearing strata. The results show that, the presence of gas can significantly affect the shear deformation characteristics of sand, and with the increase of gas content, the shear volumetric strain increases, and transitions from shear dilatancy to shrinkage; however, the sensitivity of pore pressure response in soil decreases, leading to a non-negative characteristic phenomenon, which can be regarded as an important symbol of gas-bearing strata identification. According to the characteristics of shallow gas reservoir distributed in Jiangsu and Zhejiang coastal plain in China, a fine identification method of gas-bearing strata based on in situ multi-function piezocone penetration test is developed. In this method, the “dual control” index composed of silt or fine sand soil property identification and non-negative characteristics of excess pore pressure is used for preliminary judgment, and then combined with multi-functional auxiliary parameters for further inspection and correction. The validity of identification method is preliminarily verified in a practical engineering, and the identification accuracy of multi-layer gas-bearing strata is thereby improved.

Keywords: piezocone penetration test (CPTU); shallow gas; geological disaster; gassy soil; identification method

收稿日期: 2022-03-29

修回日期: 2022-06-09

基金项目: 国家自然科学基金 (No.51979269, No.52127815); 武汉市应用基础前沿项目 (No.2020010601012181)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51979269, 52127815) and the Application Foundation Frontier Project of Wuhan (2020010601012181).

第一作者简介: 汪晔欢, 男, 1997 年生, 硕士研究生, 主要从事浅层气与工程灾害及防治方面的研究。E-mail: nbwyh0113@163.com

通讯作者: 王勇, 男, 1977 年生, 博士, 研究员, 主要从事含气沉积物多尺度土力学与灾害防治方面的研究。E-mail: wangyong@whrsm.ac.cn

1 引言

我国长三角及东南沿海地区冲积平原的浅部地层中广泛分布有浅层气，成分主要为甲烷（CH₄），埋深一般小于 100 m^[1-3]。赋存浅层气的地质是一种潜在的工程灾害，气体喷发、渗漏或燃烧对工程建设构成严重威胁^[4-5]。利用勘探手段查清浅层气的地质分布是富浅层气区域工程建设安全施工、防灾减灾措施制定的前提和重要依据^[6]。

目前，随着越来越多的工程遭遇到浅层气地质^[7-9]，一些用于浅层气地质的勘探技术相继被应用，包括：浅层横波地震勘探、土壤气氦勘探、微生物勘探和静力触探（cone penetration test, CPT）等^[10]。浅层横波地震勘探成本高且识别精度较差；土壤气氦勘探和微生物勘探只适用于粗略界定浅层气藏的平面位置，且无法识别储气层的埋深及厚度。CPT 技术相较于上述方法，具有操作简单、成本低、易于推广的特点，因而在含浅层气地质勘察方面具有优势^[11]。

CPT 是常见的岩土工程勘察原位测试技术，其发展经历了机械式-电测式-电子式-数字式的过程，其中孔压静力触探（piezocone penetration test, CPTU）是最具突破性的一环^[12]。孔压量测可反映不同土体的特性，提高了土层辨识的准确性，但其受传感器在 CPTU 探头位置的影响，目前国际标准通用锥肩位置^[13]。当前，随着科技不断进步，CPTU 技术朝着多功能方向发展，越来越多的新型传感器被安装在 CPTU 探头上，以满足不同工程的需求^[14]。

我国自 20 世纪 90 年代起，因油气行业普查油气资源的需要，CPT 技术被应用于浅层气的地质勘探中。蒋维三等^[15]基于 CPT 开发并研制了中途测试技术，能直观观察是否含气，也可采集气样并测量气压及流量；李粮纲等^[16]改进静力触探探杆，外包滤网阻止砂颗粒进入 CPT 探头；陶灵法等^[17]采用上拔式方法进行探气，过程中采取打压吹气手段防堵，在含气的淤泥质土层中取得较好的效果；郭爱国等^[18]开展了含浅层气地层气体释放前后的 CPTU 试验，认为砂层中出现超孔隙水压力非负可作为地层含气的指示。事实上，工程中经常报道遭遇的浅层气地质多分布于陆海交互环境，且气压力大、气量足、工程危害性强的气体主要储集于砂层中，但少见厚层纯净砂，多为海陆交互的淤泥质黏土或粉质黏土与粉砂、细砂薄层的交互层，呈现千层饼状的赋存结构特征。因此，浅层气沿地层深度方向一般分布层位较多，且气层薄（一般 1~20 cm 不

等），现有探查技术还难以匹配此类含气地层的准确识别。因此，需要进一步发展能够满足工程精度需要的含浅层气地层精细探测技术与识别方法。

本文基于 CPTU 贯入土体时锥肩处土体的变形特征及其对孔压响应的影响，结合密砂在含气状态下的固结不排水剪切（consolidated undrained shear, CU）特性，提出基于原位多功能孔压静力触探的含浅层气地层精细识别方法，通过实际工程检验其有效性，为浅层气地质区的岩土工程勘察提供借鉴。

2 CPTU 贯入特征与多功能探头

由前述可知，孔压量测是静力触探技术发展中的重要一环，而孔压传感器一般设置在探头的锥肩位置，因此有必要探讨 CPTU 探头贯入过程中锥肩处土体的剪切变形特征及其对孔压响应的影响。

2.1 锥肩处土体变形特征

Arshad^[19]和 Liu^[20]等基于 DIC（digital image correlation）数字图像处理技术，研究了 CPTU 探头贯入砂土过程中的土体位移模式，结果显示锥肩位置土体变形基本为径向位移，近似于孔穴扩张。

球孔扩张理论常被用来解释 CPTU 的贯入机制^[21-22]。无限土体中球孔扩张如图 1 所示，初始孔径为 a_0 的球孔，受到初始孔壁压力 p_0 ，当球孔孔径从 a_0 扩张至 a 时，孔壁压力从 σ_{ra} 变化至 p_0 。在孔壁压力的持续增大过程中，孔周土体受挤压不断进入塑性状态，最终塑性区半径扩张至 r_p ，同时孔周原先位于 r_0 处的土体移动至 r 处。

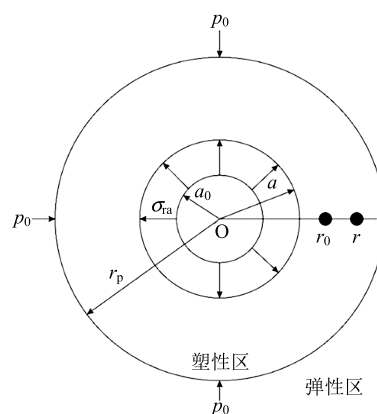


图 1 球孔扩张示意图

Fig.1 Schematic diagram of spherical cavity expansion

在砂层中，考虑砂土剪胀性，李林等^[23]基于 Yao 等^[24]提出的砂土临界状态模型，推导了对应球孔扩张的弹塑性解，如式（1）所示：

$$\frac{r_p}{a} = \exp \left\{ \int_{\xi_a}^{\xi_p} \frac{d\xi}{1 - \xi - v_0 / [v(1 - \xi)^2]} \right\} \quad (1)$$

式中: 辅助变量 $\xi = \frac{r-r_0}{r}$; ξ_p 为弹塑性边界处位移; ξ_a 为球孔孔壁位移; v 为土体比体积; v_0 为弹性区土体比体积。

图 2 为密实、中密、疏松 3 种密实度砂土在球孔孔径扩大 1 倍, 即 $a/a_0 = 2$ 时孔周土体比体积的发展规律。其中, 横坐标表示土体与孔壁的距离, 纵坐标为比体积 v , 其值越大, 意味着孔周土体的体积膨胀越显著, 反之则相反。由图 2 可看出, 在塑性区内, 3 种密实度砂土发展规律存在较大差异: 对于疏松态砂土, 靠近孔壁处的比体积 v 减小, 意味着剪缩变形; 对于中密、密实态砂土, 土体越靠近孔壁, 比体积 v 值增大越明显, 在孔壁处 ($r/a_0 = 1$) 达到最大。说明越靠近孔壁, 砂土在 CPTU 探头贯入过程中剪胀变形越明显, 孔壁处土体比体积 v 可增加近 30%。因此, CPTU 探头贯入过程中, 锥肩位置土体剪切变形将显著影响锥肩处的孔压响应。

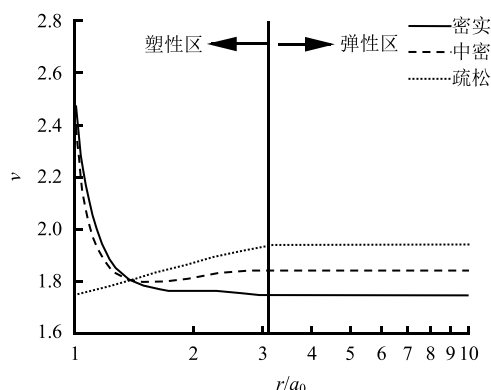


图 2 不同密实度砂土的比体积发展规律

Fig.2 Development law of specific volume of sand with different compactnesses

2.2 多功能 CPTU 的发展

自 20 世纪 90 年代以来, 为满足工程需求, 众多科研工作者相继开发了适用于静力触探的多功能传感器, 可在贯入过程获取多功能土体原位参数, 例如电阻率传感器、地震波传感器、伽马射线传感器、放射性传感器、薄膜界面探测器等[14, 25-27]。利用上述多功能传感器获取的地层特征参数, 可辅助性识别含气层。

本文后续试验由于采用的多功能 CPTU 探头为电阻率 CPTU (resistivity cone penetration test, RCPTU) 探头, 故本节仅介绍 RCPTU。RCPTU 是在常规 CPTU 基础上增加了电阻率传感器, 通过电阻率反映土体的导电性能, 目前在环境岩土工程中污染范围的圈定以及污染程度的评价中已有较多的

应用[14]。美国最新的 Hogentogler 电阻率探头, 如图 3 所示, 电阻率传感器采用四电极排列方式, 两相邻电极间距为 5 cm。

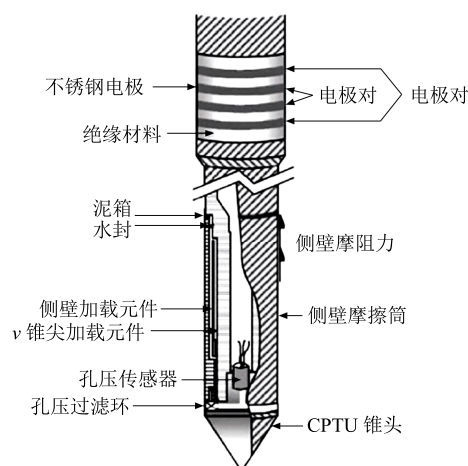


图 3 RCPTU 探头组成[14]

Fig.3 Composition of RCPTU probe[14]

由于电阻率量测受到土体与电极之间的接触条件、温度、水质、不同土类以及电极间距等多重因素的综合影响, 单一电阻率参数难以有效、精细化地识别“千层饼状”赋存的浅层气地层[28-29]。在本文中, 电阻率被用于识别含气层时是作为一种辅助性校验参数加以利用的。

3 含气密砂 CU 的孔压特征

前述已知, CPTU 贯入时锥肩位置土体的剪切变形将会影响该处孔压的响应, 故借助锥肩处孔压传感器的孔压响应记录可以间接反映出不同土层在贯入条件下的剪切变形特征。因此, 开展室内三轴试验, 模拟 CPTU 贯入土体的剪切过程, 对比含气与不含气状态下土体的体变特性, 并探讨超孔压的响应规律, 有助于发现识别含气土层的典型特征。

表 1 统计了分布于我国江浙沿海平原典型浅层气储层基本物性特征[29-30]。由表可看出, 浅层气的主要储集层土体主要为粉砂、细砂, 且孔隙比 e 一般小于 0.7。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001)[31]采用孔隙比 e 粗判密实度的方法, 可看出江浙沿海平原储层砂土多为中、密实态粉、细砂。因此, 本文三轴试验以密实态细砂作为研究对象。

当 CPTU 探头以 1.5 cm/s 贯入地层时, 由于荷载作用时间极短, 孔隙水来不及排出, 产生超孔隙水压力, 其孔压响应特征可参考不排水条件下密砂的剪切试验特性[32]。因此, 以下采用 CU 试验开展

研究。

表 1 江浙沿海平原典型浅层气储层物性特征^[29-30]

Table 1 Physical characteristics of gas reservoirs in typical shallow gas areas in Jiangsu and Zhejiang coastal plain^[29-30]

浅层气区域	储层岩性	孔隙比 e
夹灶	含砂质粉砂	0.39~0.56
东塘	细砂	0.69
黄菇	细砂	0.45~0.60
海盐	细砂	0.65~0.67
雷甸	细砂	0.51
杭州地铁一号线江南段	细砂	0.72

3.1 试验土样

选取杭州湾含浅层气区的典型砂质沉积物，主要矿物组成为石英和长石，经风干处理后，过 2 mm 筛去除颗粒杂质，并充分混合均匀。基本物理性质试验测得，土样相对密度 G_s 为 2.68，最小孔隙比 $e_{\min}$ 为 0.739，最大孔隙比 $e_{\max}$ 为 1.239。图 4 为试验土样粒径级配曲线，粒径主要分布在 0.1~0.6 mm 范围内， $D_{50} = 0.3$ mm，属于细砂。

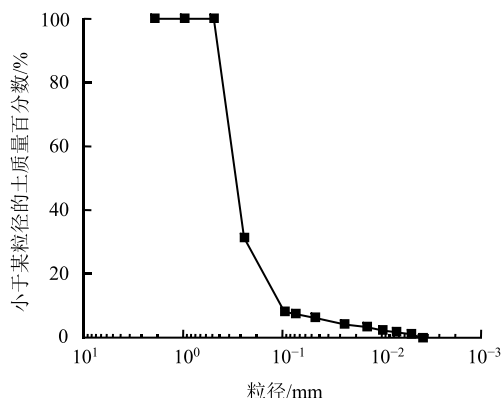


图 4 试验砂土粒径级配曲线

Fig.4 Grain size distribution curve of testing sand

3.2 试验方案

3.2.1 饱和试样制备

控制恒定室温，砂土经烘干后依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[33]，采用水下沉积法制备直径 50 mm，高度 100 mm，相对密度 D_r 为 70% 的三轴饱和砂样，通过 B 值进行检验，当 $B > 0.98$ 时，认为试样饱和。

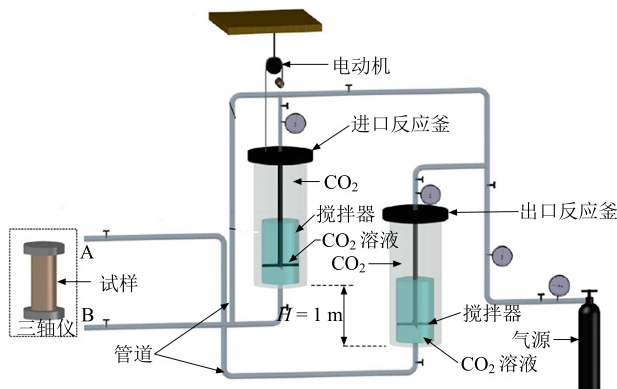
3.2.2 含气砂样制备

参照《海上风电场工程岩土试验规程》(NB/T 10107—2018)^[34]中规定开展含气砂样的制备和固结不排水剪切试验。试验采用的仪器设备为 GDS 应力路径三轴仪和自主研制的高压溶气饱和仪^[34]，

高压溶气饱和仪实物及原理如图 5 所示。



(a) 实物图



(b) 原理图

图 5 高压溶气饱和仪图^[35]

Fig.5 High pressure dissolved gas saturator^[35]

首先，在高压溶气饱和仪中制备饱和 CO_2 溶液，连接溶气仪的 B 接头与三轴仪反压系统出水口形成回路，利用进出口两个溶气釜之间的水头差 ($H < 1$ m)，自下而上驱替试样中的孔隙水。为尽可能减小对试样的扰动，驱替速率应通过调节水头差进行控制，驱替时间大于 2 h，且驱替水量须超过试样体积 5 倍以上。其次，采用 GDS 三轴仪进行不排水卸荷，同步降低试样围压与反压，使溶解在孔隙水中的 CO_2 脱溶。为尽可能减小对试样的扰动，每级递减不应超过 50 kPa，且 15 min 内孔压变化量小于 5 kPa 时，方可认为脱溶稳定，继而进行下一级卸荷。通过上述步骤逐级卸荷，以此制备不同初始含气量的密砂样品^[36]。根据记录试验制备过程中的土体体积变化量，可以计算试样在不同时刻的饱和度，采用式 (2) 获得含气砂样品的饱和度^[35]。

$$S_1 = S_0 - \frac{S_0}{n} \frac{dV^t}{V_0^t} \quad (2)$$

式中: S_1 为卸荷后的饱和度; S_0 为卸荷前的饱和度; n 为卸荷前的初始孔隙率; V_0^1 为卸荷前的试样总体积; dV^1 为卸荷后的体积变化量。

3.2.3 不排水剪切试验

本文针对初始高饱和度的含气密砂(初始饱和度 $S_r \geq 90\%$) 开展常规三轴 CU 试验, 试验方案如表 2 所示。

表 2 含气砂 CU 试验方案

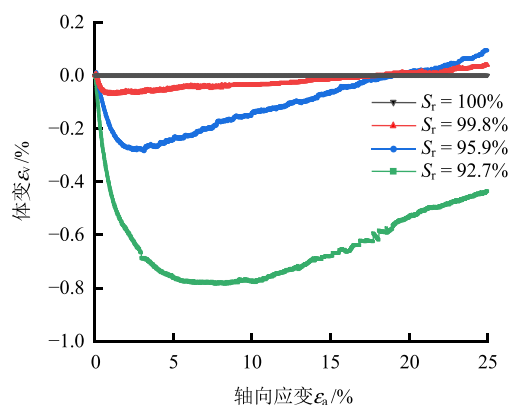
Table 2 CU test scheme of gassy sand		
试验编号	有效围压/kPa	饱和度/%
CU1	200	100.0
CU2		99.8
CU3		95.9
CU4		92.7

3.3 试验结果

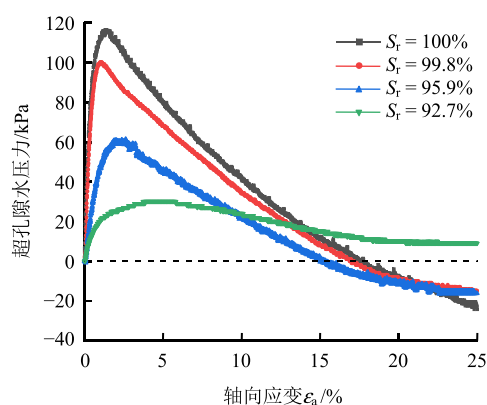
含气密砂 CU 试验结果如图 6 所示。由图 6(a) 可看出, 不排水条件下, 由于水难以压缩, 因此饱和密砂在剪切过程中的体变始终为 0; 而对于含气砂, 在剪切过程中的体变不再维持为 0, 加载初期表现出明显的剪缩现象, 之后又不断向剪胀过渡。而且, 随着初始含气量的增多, 剪切过程中含气砂的体变量增大。当初始饱和度较高时(如 $S_r = 95.9\%$), 轴向应变大于 20% 后, 体胀发生; 当初始饱和度相对较低时(如 $S_r = 92.7\%$), 轴向应变大于 25% 时, 含气密砂总体仍表现为体缩。这种现象主要是由土体孔隙流体中含有游离态气体后, 土体的可压缩性变化所致。根据理想气体状态方程($PV = nRT$), 同一温度条件、相同压力下, 气体量越大, 体积变化量越大, 由此引起的土体颗粒重排列趋势越显著。

图 6(b) 为 CU 试验获得的超孔压-轴向应变变化曲线。由图可看出, 对于不同初始饱和度的含气密砂, 随着剪应变的发展, 砂土中超孔压均表现为先快速上升后缓慢减小, 对应了图 6(a) 中试样由剪缩向剪胀过渡的体变现象。但是, 随着初始含气量的增大, 超孔压变化幅度愈发不显著, 气体的存在减弱了孔压响应的敏感性。主要原因是: 土体在受到剪胀或剪缩作用下, 孔隙变化体积 ΔV_v 增大或减小; 在饱和状态时, ΔV_v 与水变化体积 ΔV_w 相等, $\Delta V_v = \Delta V_w$, 剪缩/剪胀趋势引起孔压的迅速升高/降低; 而当土体中气体存在时, 孔压的升高/降低会导致气体变化体积 ΔV_a 的减小/增大, 即在不排水条件下, ΔV_v 与 ΔV_a 的变化趋势同步, 此时 $\Delta V_v = \Delta V_w + \Delta V_a > \Delta V_w$ 。因此, 由于气体存在导致剪缩/剪胀作用引起的孔压响应敏感性降低。值得注意的是, 初始饱和度较高时

($S_r = 95.9\%$), 密砂最终因剪胀而导致超孔压为负值; 但当初始饱和度进一步降低($S_r = 92.7\%$) 时, 因最终体缩而使得超孔压自始至终都表现出非负或正向趋于 0 的现象。试验结果说明: 对于含气密砂, 若初始含气量越大, 剪切体变量越大, 但由于孔隙气压的存在, 超孔压在剪切过程中会始终呈现非负的特征现象。值得一提的是, 前述可知, CPTU 探头贯入过程中锥肩孔壁处土体剪应变远超本文 CU 试验的 25%。因此, 大应变下的含气密砂超孔压响应特征反映了 CPTU 锥肩处量测孔压的特殊现象, 这也通过试验证实了郭爱国等^[18]结合工程经验提出的以超孔压非负作为含气地层识别指示的合理性。



(a) 体变-轴向应变曲线



(b) 超孔压-轴向应变曲线

图 6 含气密砂 CU 试验结果

Fig.6 CU test results of dense gassy sand

4 含气层识别方法

前述已知, 在我国江浙沿海平原广泛分布的典型浅层气主要储集于中~密实态的细、粉砂层中, 初始气量越大, 对工程的危害程度就越大。针对浅层气千层饼状的赋存特点, 为满足工程精度, 本文

提出如下含气层精细辨识方法，用于浅层气地质区域的多功能 CPTU 探测识别。

(1) 首先，采用多功能 CPTU 按照《静力触探技术规则》(TBJ 37—93)^[37]进行现场原位静力触探试验，获取锥尖阻力 q_t 、侧摩阻力 f_s 、静水压力 u_0 、孔隙水压力 u_2 、上覆总应力 σ_{v0} 以及多功能传感器参数随地层深度的变化曲线。

(2) 基于上述所获取数据，对定测站位进行土类识别与土层划分，寻找出储集层物性特征的细砂、粉砂的分布层位和层厚。

(3) 基于多功能 CPTU 所测得砂层的超孔压非负特征，从细砂、粉砂分布层中识别出疑似含气层。

(4) 根据多功能辅助参数，针对数据异常点，对疑似含气层做进一步校验，最终确定含气层的具体位置及层厚。

5 工程应用

北沿江高铁是国家“八纵八横”高速铁路网中“沿江通道”的骨干线路，是京沪辅助通道的重要组成部分，也是长江三角城市群核心城际通道。项目起点为上海，向西经由南通、泰州、扬州、南京北站，终点到合肥。崇太越江隧道作为北沿江高铁中的一段，其由西向东连接了江苏太仓与上海崇明岛两岸，总长约 14.1 km，隧道平面图如图 7 所示。

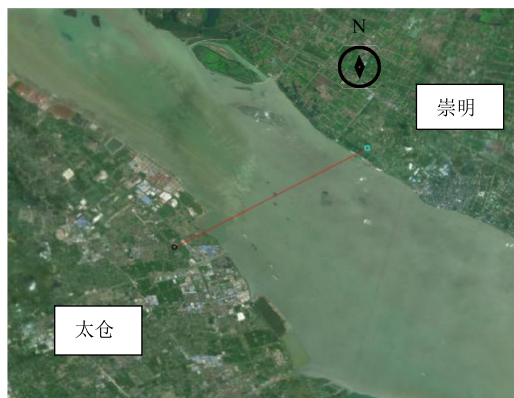


图 7 崇太越江隧道平面图

Fig.7 Plan of cross-river tunnel from Chongming to Taicang

越江隧道工程存在浅层气不良地质，勘探过程中多次出现浅层气喷发现象，对隧道构成不利影响。基于前述提出的含气层辨识方法，针对北沿江高铁崇太越江隧道隧址区浅层气地质开展原位多功能 CPTU 试验，以验证本文所提方法的有效性。

5.1 土类识别与土层划分

首先，通过现场多功能 CPTU 试验获取定测站

位地层的原始数据，包括锥尖阻力 q_t 、侧摩阻力 f_s 、静水压力 u_0 、孔隙水压力 u_2 、上覆总应力 σ_{v0} 以及多功能传感器参数随深度的分布曲线。其次，根据 Robertson 土分类方法 (SBTn 图)^[38]对原始指标数据进行处理，得到归一化锥尖阻力 Q_t 和归一化摩阻比 F_r ，并通过 Q_t - F_r 分类方法完成土类识别与土层划分，其定义如下：

$$Q_t = (q_t - \sigma_{v0}) / (\sigma_{v0} - u_0) \quad (3)$$

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \times 100\% \quad (4)$$

由于 SBTn 图采用的国际土质分类方法 (USCS)，与我国标准《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[31]中的土类名称定义存在差异，因此需要进行相应转换^[39]，转换后的国标土分类方法如图 8 及表 3 所示。

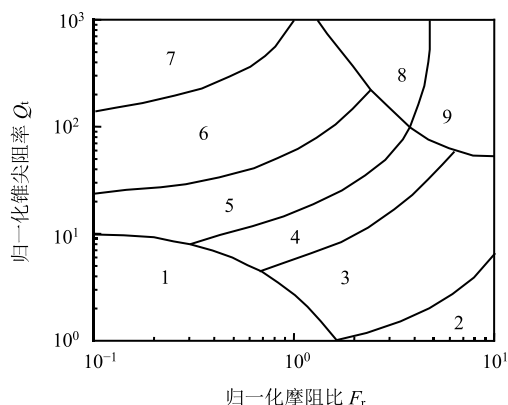


图 8 国标土分类方法^[39]

Fig.8 Classification method of Chinese standard soil^[39]

表 3 国标土分类代号及对应分区^[39]

Table 3 Soil classification in Chinese code and corresponding partition^[39]

国标土分类	对应分区
淤泥质土	1 区和 2 区
黏土	3 区
粉质黏土	3 区和 4 区
粉土	4 区
粉砂	5 区和 6 区
细砂	6 区
中砂	6 区

定测站位静力触探孔深 70 m，在其附近再布设一个全岩芯取样孔，将多功能 CPTU 成果与钻孔岩芯结果进行对比验证。如图 9 所示，静力触探 70 m 土层从上至下依次划分为：①粉砂层（间夹粉土）；②淤泥质粉质黏土层（间夹粉砂薄层）；③粉土层（间夹粉砂薄层）；④粉砂层；⑤细砂层以及⑥中砂层。

定义绝对误差为每一土层 CPTU 土层划分底层深度与钻探岩芯编录底层深度差值的绝对值, 相对误差为绝对误差与相应土层厚度的比值。由表 4 可知, 各土层相对误差均控制在 3% 以内, 说明静力触探土层划分准确, 与实际地层相吻合。

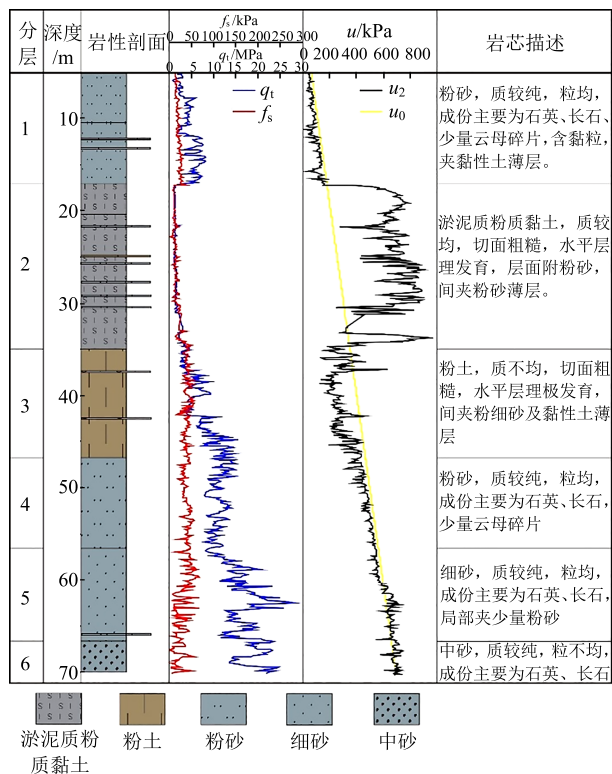


图 9 钻孔岩芯编录与 CPTU 土层划分结果对比分析
Fig.9 Comparative analysis between borehole core logging and CPTU soil division results

表 4 钻孔岩芯编录与 CPTU 土层划分结果误差分析
Table 4 Analysis of error between borehole core logging and CPTU soil division results

层数	岩性	CPTU 国标土分类 底层深度/m	钻孔岩芯编录 底层深度/m	绝对误差 /m	相对误差 /%
1	粉砂	17.0	17.3	0.3	1.76
2	淤泥质粉质黏土	34.6	35.0	0.4	2.27
3	粉土	46.8	47.0	0.2	1.64
4	粉砂	56.4	56.7	0.3	3.13
5	细砂	66.8	66.5	0.3	2.88
6	中砂	70.0	70.0	—	—

5.2 疑似含气层识别

采用 CPTU 的国标土类砂土 (粉砂、细砂) 辨识标准以及超孔压非负值构成的“双控”指标进行初判: 结合 CPTU 土层分类结果与超孔压沿深度分布曲线, 二者对应同一深度处, 必须同时满足粉细砂土类以及超孔压非负值两项指标, 才可判断为疑似含气层。由图 9 初步判断疑似含气层为②淤泥质

粉质黏土层以及③粉土层中的夹粉砂薄层, 层位分别位于 21.65~21.85、25~25.2、27.5~27.6、29.6~29.7、30.7~30.8、38.2~38.3、42.1~42.2 m。由此可见, 疑似含气层位沿深度范围分布较多, 基本覆盖了整个黏土层, 但厚度较薄, 均小于 20 cm, 常规钻探和静探方法很容易漏判、误判。相比之下, 本文提出的利用粉砂、细砂的土类辨识和对应超孔压非负值构成“双控”指标进行含气层识别, 对于浅层气这种多层位赋存特征具有较好的适应性。

5.3 含气层校验

Archie^[40]建立了土体电阻率与饱和度的定量关系:

$$\rho = \rho_w n^{-m} S^{-a} \quad (5)$$

式中: ρ 为土壤电阻率; ρ_w 为水电阻率; n 为孔隙率; S 为饱和度; m 、 a 为系数。

由式 (5) 可看出, 电阻率随土体饱和度减小呈指数递增。由于导电性较差的含烃类浅层气存在, 含气土的电阻率将高于饱和态土体。若疑似含气层的电阻率值异常, 显著高于本土类饱和土的电阻率, 则可将该疑似层位确定为含气层, 从而沿地层深度最终划分出含浅层气地层的具体位置与层厚。

由于本次现场试验采用 RCPTU 探头, 因此现场获得了地层电阻率-深度曲线, 结果如图 10 所示。

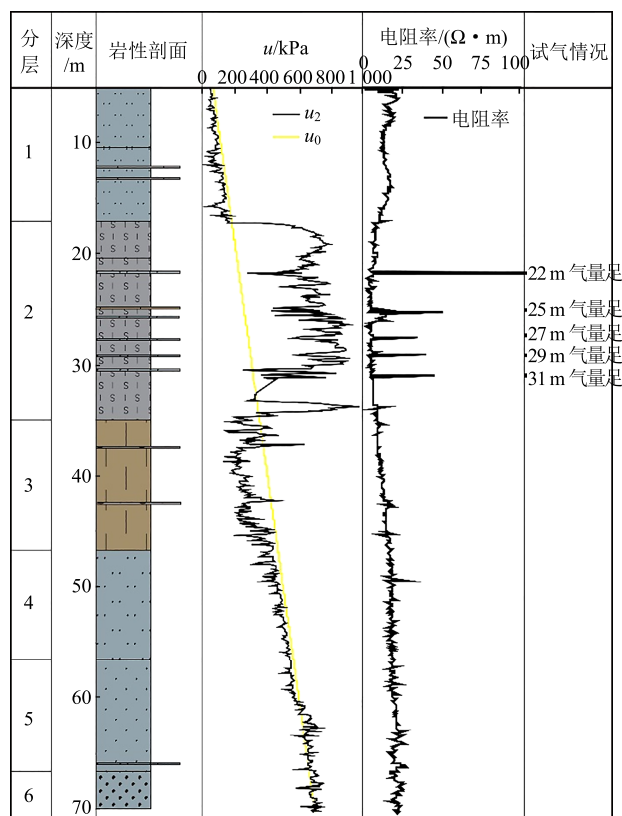


图 10 电阻率曲线校验结果
Fig.10 Verification results of resistivity curves

由图可知,饱和态砂层(包括①粉砂层、④粉砂层以及⑤中砂层)的平均电阻率为 $18 \Omega \cdot \text{m}$,其中 $21.65 \sim 21.85$ 、 $25 \sim 25.2$ 、 $27.5 \sim 27.6$ 、 $29.6 \sim 29.7 \text{ m}$ 以及 $30.7 \sim 30.8 \text{ m}$ 深度范围的粉细砂薄层电阻率分别达 100 、 50 、 36 、 40 、 $45 \Omega \cdot \text{m}$,均超过平均电阻率 1 倍以上,故进一步确认其为含浅层气层位;而 $38.2 \sim 38.3$ 、 $42.1 \sim 42.2 \text{ m}$ 层位因电阻率不存在较明显异常,排除其含有工程危害性浅层气的可能性。

为了进一步检验前述基于多功能 CPTU 探测的含气层识别方法的可靠性,在定测孔位临近 0.5 m 处开展了浓度探头的静探试验,试验结果见图 10 (试气情况),在上述确认为含浅层气的层位均出现了气体喷发的现象。对定测站位 $19 \sim 26 \text{ m}$ 深度钻孔全岩芯样品取剖面,如图 11 所示,黏土层与细砂、粉砂薄层交互,呈现千层饼状的多层结构特征,提取图 11 中虚线框范围 $21.7 \sim 21.8 \text{ m}$ 深度定测站位钻孔全岩芯样品,土样剖面如图 12 所示。图中,黑色淤泥质黏土层所夹的灰色细砂薄层即为含气层,再次验证了前述基于多功能 CPTU 探测识别含气层方法的可靠性。

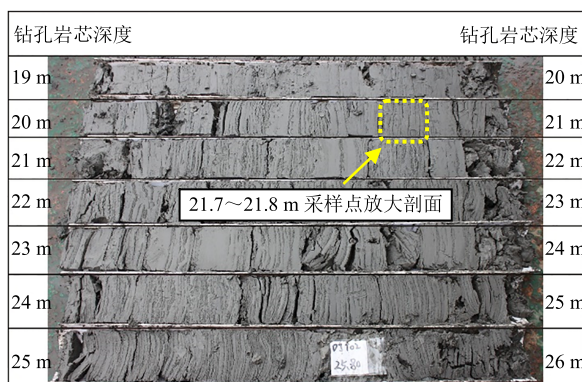


图 11 $19 \sim 26 \text{ m}$ 钻孔土样剖面
Fig.11 Borehole core profile from 19 to 26 meters

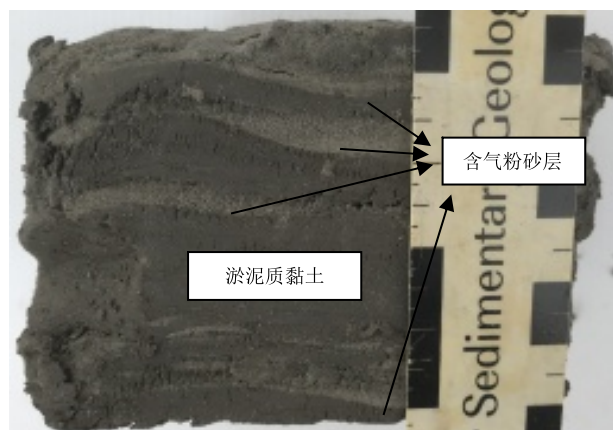


图 12 $21.7 \sim 21.8 \text{ m}$ 钻孔土样剖面
Fig.12 Borehole core profile from 21.7 to 21.8 meters

6 结 论

本文针对分布于我国江浙沿海平原浅层气地质的典型多层赋存结构和现有技术探测识别能力的不足,根据含气状态下密砂 CU 试验结果,提出了基于原位多功能孔压静力触探的含浅层气地层精细识别方法,结合实际工程应用,初步验证了方法的适宜性和有效性,主要结论如下:

(1) 贯入过程中 CPTU 探头锥肩区土体的剪切位移特征符合球孔扩张理论,中、密砂层中表现出大应变体胀特征,土体变形将显著影响锥肩处的孔压响应规律。

(2) 含气密砂在 CU 条件下,土中气体显著降低了孔压响应的敏感性,改变砂土的剪切体变规律;随着含气量的增多,砂土体变量增大,但超孔压幅值却减弱,且超孔压始终呈现非负的典型特征。

(3) 利用多功能 CPTU 的土类(粉、细砂)辨识和超孔压非负构成“双控”指标初步识别疑似含气层的层位和层厚,再依据辅助多功能参数做进一步检验校正,有效应用于千层饼状浅层气多层赋存结构地层,提高了浅层气地质区的岩土工程勘察精度。

参 考 文 献

- [1] SILLS G C, GONZALEZ R. Consolidation of naturally gassy soft soil[J]. *Geotechnique*, 2001, 51(7): 629-639.
- [2] WANG Y, KONG L, WANG Y, et al. Deformation analysis of shallow gas-bearing ground from controlled gas release in Hangzhou Bay of China[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2018, 18(1): 04017122.
- [3] HONG Y, ZHANG J F, WANG L Z, et al. On evolving size and shape of gas bubble in marine clay under multi-stage loadings: microcomputed tomography (μ CT) characterization and cavity contraction analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, 57(7): 1072-1091.
- [4] 黄家晟, 王路君, 刘燕晶, 等. 含气土地基热水气力耦合时变行为分析[J]. *岩土力学*, 2021, 42(9): 2507-2517. HUANG Jia-sheng, WANG Lu-jun, LIU Yan-jing, et al. Time-dependent behaviour of thermal-hydro-mechanical coupling of gassy soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(9): 2507-2517.
- [5] LIN C M, GU L X, LI G Y, et al. Geology and formation mechanism of late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China[J]. *Aapg Bulletin*, 2004, 88(5): 613-625.
- [6] 郭爱国, 孔令伟, 沈林冲, 等. 地铁建设中浅层气危害

- 防治对策研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 769-775.
- GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, SHEN Lin-chong, et al. Study of disaster countermeasures of shallow gas in metro construction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 769-775.
- [7] TJELTA T I, SVANO G, STROUT J M, et al. Shallow gas and its multiple impact on a north sea production platform[C]//6th International Offshore Site Investigation and Geotechnics Conference: Confronting New Challenges and Sharing Knowledge. [S. l.]: [s. n.], 2007: 205-220.
- [8] MABROUK A, ROWE R K. Effect of gassy sand lenses on a deep excavation in a clayey soil[J]. **Engineering Geology**, 2011, 122(3-4): 292-302.
- [9] 王勇, 孔令伟, 郭爱国. 有控放气措施下含浅层气地层的一维变形分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 241-246.
- WANG Yong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Analysis of one-dimensional deformation of shallow gassy stratum caused by controlling gas release[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Suppl.1): 241-246.
- [10] LI Y L, LIN C M. Exploration methods for late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China[J]. **Aapg Bulletin**, 2010, 94(11): 1741-1759.
- [11] 林春明, 李广月, 李艳丽, 等. 杭州湾地区晚第四纪浅层生物气藏勘探方法研究[J]. 石油物探, 2006, 45(2): 202-208.
- LIN Chun-ming, LI Guang-yue, LI Yan-li, et al. The exploration method of late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in Hangzhou Bay area[J]. **Geophysical Prospecting for Petroleum**, 2006, 45(2): 202-208.
- [12] 刘松玉, 吴燕开. 论我国静力触探技术(CPT)现状与发展[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 553-556.
- LIU Song-yu, WU Yan-lai. On the state-of-art and development of CPT in China[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(4): 553-556.
- [13] 蔡国军, 刘松玉, 童立元, 等. 现代数字式多功能 CPTU 与中国 CPT 对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 914-928.
- CAI Guo-jun, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Comparative study of modern digital multifunctional CPTU and China's CPT tests[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(5): 914-928.
- [14] 刘松玉, 蔡国军, 童立元. 现代多功能 CPTU 技术理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- LIU Song-yu, CAI Guo-jun, TONG Li-yuan. Theory and engineering application of modern multifunctional piezocone penetration test (CPTU)[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [15] 蒋维三, 叶舟, 郑华平, 等. 杭州湾地区第四系浅层天然气特征及勘探方法[J]. 天然气工业, 1997, 17(3): 20-23.
- JIANG Wei-san, YE Zhou, ZHENG Hua-ping, et al. The characteristic and exploration methods of quaternary shallow gas in Hangzhou Bay area[J]. **Natural Gas Industry**, 1997, 17(3): 20-23.
- [16] 李粮纲, 赵永刚, 余雷. 采用密闭取心和改装静力触探仪勘察第四系有害气体[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(5): 72-76.
- LI Liang-gang, ZHAO Yong-gang, YU Lei. Exploration for Quaternary shallow biogenic gas by sealed core drilling and modified CPT[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2009, 37(5): 72-76.
- [17] 陶灵法, 潘永坚, 蔡国成. 沿海平原海相沉积土中浅层气的探查[J]. 铁道勘察, 2014, 40(4): 47-50.
- TAO Ling-fa, PAN Yong-jian, CAI Guo-cheng. The exploratin of shallow gas in marine sedimentary soil of the coastal plain[J]. **Railway Investigation and Surveying**, 2014, 40(4): 47-50.
- [18] 郭爱国, 孔令伟, 陈建斌, 等. 孔压静力触探用于含浅层生物气砂土工程特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1539-1543.
- GUO Ai-guo, KONG Ling-wei, CHEN Jian-bin, et al. On engineering characteristics of sallow biogenetic gassy sand by piezocone test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1539-1543.
- [19] ARSHAD M I, TEHRANI F S, PREZZI M, et al. Experimental study of cone penetration in silica sand using digital image correlation[J]. **Géotechnique**, 2014, 64(7): 551-569.
- [20] LIU C, TANG X, WEI H, et al. Model tests of jacked-pile penetration into sand using transparent soil and incremental particle image velocimetry[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2020, 24(4): 1128-1145.
- [21] RANDOLPH M F. Science and empiricism in pile foundation design[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(10): 847-874.
- [22] 李林, 李镜培, 孙德安, 等. 天然饱和黏土地基静压桩承载力时效性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2515-2522.
- LI Lin, LI Jing-pei, SUN De-an, et al. Time-dependence of bearing capacity of jacked piles in natural saturated clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(9): 2515-2522.
- [23] 李林, 李镜培, 孙德安, 等. 剪胀性砂土中球孔扩张弹塑性解[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(8): 1453-1460.
- LI Lin, LI Jing-pei, SUN De-an, et al. Elasto-plastic solution to expansion of a spherical cavity in dilatant sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**,

- 2017, 39(8): 1453-1460.
- [24] YAO Y P, SUN D A, MATSUOKA H. A unified constitutive model for both clay and sand with hardening parameter independent on stress path[J]. **Computers and Geotechnics**, 2007, 35(2): 210-222.
- [25] 刘影, 史赜. 天然气水合物勘探技术综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(6): 984-992.
- LIU Ying, SHI Ge. A review of the exploration of gas hydrate[J]. **Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis**, 2004, 40(6): 984-992.
- [26] 谷团, 任强, 陈淑凤, 等. 辽河油田浅层气测井识别技术[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2): 276-281.
- GU Tuan, REN Qiang, CHEN Shu-feng, et al. Logging recognition technology for shallow gas in Liaohe oilfield[J]. **Natural Gas Geoscience**, 2006, 17(2): 276-281.
- [27] 陈中轩, 来向华, 廖林燕, 等. 基于 MIP-CPT 技术的海底浅层气探测方法——以东海舟山海域为例[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 207-213, 229.
- CHEN Zhong-xuan, LAI Xiang-hua, LIAO Lin-yan, et al. Submarine shallow gas detection method based on MIP-CPT technology—Taking Zhoushan sea area in the East China Sea as an example[J]. **Journal of Petroleum**, 2016, 37(2): 207-213, 229.
- [28] SAMOULIAN A, COUSIN I, TABBAGH A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: a review[J]. **Soil and Tillage Research**, 2005, 83(2): 173-193.
- [29] 林春明, 张霞. 江浙沿海平原晚第四纪地层沉积与天然气地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- LIN Chun-ming, ZHANG Xia. Late quaternary stratigraphy, sedimentology and natural gas geology in the Jiangsu-Zhejiang Coastal Plain[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [30] 卢文忠. 中国东南沿海、长江中下游地区第四系浅层天然气分布及勘探前景[J]. 天然气工业, 1998, 18(3): 25-29.
- LU Wen-zhong. Quaternary shallow gas distribution and quaternary exploration prospects in southeast coastal and Yangtze River regions of China[J]. **Nature Gas Industry**, 1998, 18(3): 25-29.
- [31] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [32] 孟高头. 土体原位测试机理方法及其工程应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- MENG Gao-tou. In-situ test on soils mechanism method and its engineering application[M]. Beijing: Geosciences Press, 1997.
- [33] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [34] 中华人民共和国国家能源局. NB/T 10107—2018 海上风电场工程岩土试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- National Energy Administration of the People's Republic of China. NB/T 10107—2018 Specification for geotechnical tests of offshore wind power projects[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2019.
- [35] WANG Y, KONG L, WANG M, et al. An improved specimen preparation method for marine shallow gas-bearing sand sediments and its validations[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2021, 13(3): 682-693.
- [36] 杨志勇, 王勇, 孔令伟, 等. 基于剪切波速的海底含气沉积物卸荷扰动与样品质量评价方法[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3687-3694.
- YANG Zhi-yong, WANG Yong, KONG Ling-wei, et al. A method for evaluating the unloading disturbance and sample quality of marine gas-bearing sediments based on shear wave velocity[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(11): 3687-3694.
- [37] 中华人民共和国铁道部. TBJ 37—93 静力触探技术规范[S]. 北京: 铁道部建设司标准科情所, 1993.
- Ministry of Railways of the People's Republic of China. TBJ 37—93 Technical specifications for cone penetration[S]. Beijing: The Ministry of Railways Construction Division, 1993.
- [38] ROBERTSON P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, 27(1): 151-158.
- [39] 刘松玉, 蔡国军, 邹海峰. 基于 CPTU 的中国实用土分类方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1765-1776.
- LIU Song-yu, CAI Guo-jun, ZOU Hai-feng. Practical soil classification methods in China based on piezocone penetration tests[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1765-1776.
- [40] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. **Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers**, 1942, 146(1): 54-61.