

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.0140

基于电阻率孔压静力触探的浅层气可靠度识别

武 猛¹, 蔡国军^{1,2}, 王才进¹, 段 伟^{1,3}, 刘松玉¹, 乔欢欢¹, 洪 义⁴

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 2. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;
3. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024; 4. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310030)

摘 要: 地下浅层气的存在会对地铁项目的勘察、施工以及后期正常运营构成安全隐患。采用基于地质统计学和可靠性分析的概率方法, 对杭州某地铁站场地的电阻率静力触探测试数据进行分析。通过回归分析移除电阻率数据的趋势项, 以变差函数为工具, 描述电阻率残差在竖向和水平向上的各向异性, 采用克里格插值对未采样点参数值进行最优线性无偏估计, 采用一阶可靠度方法获取基于电阻率的地下浅层气分布三维概率图。分析表明: 电阻率残差具有显著的各向异性, 在竖直和水平方向的自相关距离分别为 5.1 m 和 55.6 m。在考虑不同土体电阻率背景值不同的前提下, 采用一阶可靠度方法建立了浅层气三维概率分布图。该场地竖直方向上浅层气分布于 25 m 附近及 30~35 m 深度区间内, 水平方向上则集中分布于 RCPTU1 点位附近。可基于该结果提出针对性的防治对策, 为布设排气孔、浅层气监测等治理措施提供依据。

关 键 词: 浅层气; 电阻率静力触探; 地质统计学; 可靠性分析

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 12-3463-11

Reliability identification of subsurface shallow gas based on resistivity piezocone penetration tests

WU Meng¹, CAI Guo-jun^{1,2}, WANG Cai-jin¹, DUAN Wei^{1,3}, LIU Song-yu¹, QIAO Huan-huan¹, HONG Yi⁴

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China; 2. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, Anhui 230601, China; 3. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
4. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310030, China)

Abstract: The existence of underground shallow gas will pose significant hazard and risk to the investigation, construction, and subsequent operation of subway projects. In this study, the probabilistic method based on geostatistics and reliability analysis is used to analyze the resistivity piezocone penetration test data of the Tangxinlin station site of Hangzhou Metro Line 7. Regression analysis is performed to remove the trend term of resistivity data, and the variogram function is used to describe the anisotropy of the resistivity residuals in the vertical and horizontal directions. Kriging interpolation is used to obtain the optimal linear unbiased estimation of non-sampling points. By considering the resistivity background values of different soil types, three-dimensional probability maps of the subsurface shallow gas are obtained using the first-order reliability method. The results show that the resistivity residual has significant anisotropy, and the autocorrelation distances in vertical and horizontal directions are 5.1 m and 55.6 m, respectively. In the vertical direction, the shallow gas is distributed in the vicinity of 25 m and the depth interval of 30–35 m, and in the horizontal direction, it is mainly distributed around RCPTU1 point. The results of this paper can provide basis for shallow gas monitoring plan, exhaust hole layout and other treatment measures.

Keywords: shallow gas; resistivity piezocone penetration test; geostatistics; reliability-based analysis

1 引 言

地下浅层气在世界范围内被广泛发现, 多积聚在地下深度约 10~100 m 范围内^[1-3]。浅层气的成分

为 CH₄、N₂ 和 CO₂, 主要在地下微生物或地热的作用下产生。一般来说, 浅层气被认为是潜在的地质灾害, 而不是作为一种油气资源^[4]。3 种主要气体成分中, CH₄ 的体积分数通常超过 90%, 对隧道施

收稿日期: 2022-02-08

修回日期: 2022-05-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No.42072299, No.42225206)。

This work was supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (42072299, 42225206).

第一作者简介: 武猛, 男, 1993 年生, 博士研究生, 主要从事现代原位测试技术等方面的研究。E-mail: 230208335@seu.edu.cn

通讯作者: 蔡国军, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事原位测试和环境岩土方面的研究。E-mail: focuscai@163.com

工等地下工程的建设造成重大风险。土层中的气体压力和隧道中的空气压力之间的较大差异会导致 CH_4 气体释放到隧道中。Guan 等^[5]指出当由浅层气体喷冒导致隧道空气中 CH_4 含量超过 5% 时, 则可能造成土层失稳和爆炸, 对已建好的构筑物 and 隧道掘进装备造成破坏。例如我国地铁早期建设过程中, 发生过多起由浅层气引发的隧道火灾和爆炸事故^[6]。同时, 地下浅层气的赋存还会显著地改变土体的物理力学性质^[7]。因此, 对于富含浅层气区域的地铁工程建设, 准确探究地下浅层气的空间变化规律, 确定 CH_4 释放钻孔位置, 对保证后续隧道施工的安全至关重要。

电阻率通常被认为是探测土体潜在污染的敏感指标^[8-9]。高浓度的重金属离子会增加土体的导电性, 从而降低土壤的电阻率, 而高浓度的有机物则会导致土体电阻率的提高^[10]。鉴于地下浅层气的主要成分 CH_4 可被视为土体中的污染物, 因而可通过电阻率对其进行表征。众多学者开展了通过电阻率识别地下浅层气的研究并证明了其有效性^[11-13]。Kang 等^[11]采用随钻测井 (logging-while-drilling) 方法, 通过采集的电阻率数据对南海神湖地区的天然气水合物赋存模式进行了分析。Cary^[12]采用电阻率层析成像 (ERT) 技术, 对加拿大西部某能源井的逃逸甲烷进行长期监测, 研究了甲烷气体的迁移规律。Sun 等^[13]采用电阻率测井技术, 研究了钻探过程中泥浆入侵对电阻率天然气水合物识别的影响。近年来电阻率孔压静力触探 (resistivity piezocone penetration test, RCPTU) 技术被广泛地应用于污染场地调查中。Fukue 等^[8]将 RCPTU 应用于划分污染和未污染土层。Ahn 等^[14]使用微型电阻率探针检测重金属和碳氢化合物污染。Mondelli 等^[15]使用 RCPTU 对巴西某城市固体废物处理场进行了地质环境现场调查。Mondelli 等^[10]提出了考虑土体行为类型指数 (soil behavior index) 的 RCPTU 固体废物处置场地评价方法。国内学者刘松玉和蔡国军教授课题组针对 RCPTU 污染场地调查方法及影响因素开展了相关研究^[16-19]。上述研究表明, RCPTU 可有效地应用于调查以 CH_4 为主要成分的地下浅层气。

在岩土工程场地调查中, 地质统计学方法通常被用来评价未采样区域并获得场地岩土工程参数的空间分布。近年来在农业、工业和环境等领域的场地调查研究中得到了广泛的应用。Markus 等^[20]对铅在农业、城市和工业用地土壤中的空间分布和风险评估的研究现状进行了详细的文献综述。Imperato 等^[21]应用地质统计学方法得到了意大利那不勒斯

市城市土体中重金属的空间分布。Hooker 等^[22]利用地质统计学研究了英国伍尔弗汉普顿城市土体中铅的空间分布。Vacha 等^[23]利用地质统计学获得了捷克共和国北部农业土壤中持久性有机污染物和有毒元素的空间分布图。Bednarova 等^[24]研究了捷克共和国农业土壤中金属的空间分布并进行了风险评估。上述研究表明, 地质统计学可以作为一个强有力的工具, 直接根据观测数据评估土体中污染物的空间分布。然而, 上述研究缺乏针对预测结果的不确定性问题的讨论, 忽略了对场地预测结果的概率密度分布研究。

在利用地质统计学表征岩土参数的空间变异性时, 通常采用弱平稳性 (或称二阶平稳性) 假定。然而, 众所周知, 岩土参数往往表现出非平稳性。Lumb^[25]指出了土体参数的两种典型非平稳类型: ①土体参数的平均值随深度线性增加, 而其标准偏差保持不变; ②土壤参数的均值和标准差均随深度的增加而增加, 而协方差保持不变。近年来众多学者对非平稳随机场的表征方法进行了探索。Wu 等^[26]采用非平稳随机场模拟了不排水抗剪强度的空间变异性对深基坑开挖稳定可靠度的影响。蒋水华等^[27]提出了不排水抗剪强度的非平稳随机场模型, 讨论了不排水抗剪强度的非均匀分布特性对边坡稳定可靠度的影响规律。Griffiths 等^[28]在考虑不排水抗剪强度均值和标准差沿深度线性增加的前提下, 采用随机有限元法分析了边坡可靠度问题。祁小辉等^[29]探讨了不排水抗剪强度非均匀分布特性对条形地基极限承载力的影响。以上学者的研究均采用趋势分量和随机波动分量来表征土性参数的非平稳性。考虑到土体电阻率受多种影响因素, 同样具有非平稳性, 本文也采用了该方法进行研究。

本文通过对杭州某地铁站场地进行 RCPTU 测试, 结合地质统计学和一阶可靠度方法 (first-order reliability method, FORM) 评估预测值的不确定性, 在考虑浅层气分布各向异性的情况下, 描绘了该场地地下浅层气的三维 (3D) 分布图。并对 RCPTU 的电阻率测量结果进行了分析讨论。图 1 为本文基于 RCPTU 的地下浅层气识别方法流程图。

2 试验场地概况

本次勘察场地为杭州某地铁站区间, 该区间为地下盾构区间。拟建区间线路下穿新塘线路, 而后继续由南向北沿横一路建设, 拟建场地属钱塘江冲海积沉积平原, 沿线地形地貌简单。地下浅层气是该场地地下空间开发所面临的主要地质灾害。由于

该场地地质环境在第四纪的几次海进海退中交替沉积了数套富含有机质的淤泥质土层和（粉）砂层。淤泥质土层中的有机质在厌氧菌的生物化学作用下分解发酵，伴随着一定的温度和压力，变成了气态产物。生成的有害气体不能向大气中扩散，便在周围地层中运移、积聚、储集，形成了浅层气。

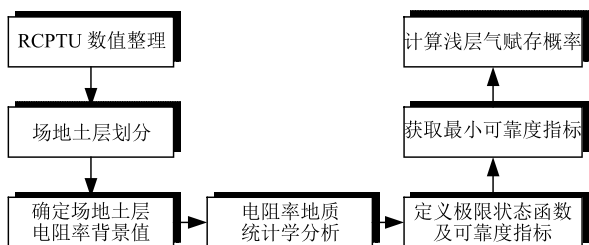


图 1 RCPTU 地下浅层气识别方法流程图

Fig.1 Flow chart of shallow gas identification based on RCPTU

初期浅层气探测孔调查结果表明，浅层有害气体主要为甲烷型，即浅层天然气， CH_4 含量多在 90% 以上，并含少量 N_2 和 CO_2 ，而乙烷以上的烃类含量甚微，不含硫化氢等有毒或腐蚀金属的成分。前期沼气探测结果表明，塘新线站区间勘察区域广泛分布浅层气，且气体均可点燃，点火后火焰高度以 20~100 cm 为主，局部超过 100 cm。气压实测峰值在 0.378~0.600 MPa 之间，最大流量为 14 m^3/h 。浅层气整体储量较小并无开采价值，但对于工程而言，却存在着很大的危害。特别是对于盾构施工，浅层气体的喷冒可能造成土层失稳和爆炸，破坏已建好的构筑物，造成无可挽回的重大经济损失，因而施工前须对浅层气分布区域进行探明，并加强防治和监测措施。

3 RCPTU 现场测试

本研究场地共进行了 8 次 RCPTU 测试，6 次 RCPTU 测试位于浅层气勘察区域内。2 次 RCPTU 测试位于勘察区域外，前期勘察结果表明，该区域土体几乎不含有 CH_4 或 CH_4 含量低且满足施工要求，因而用于确定电阻率背景值。勘察区域内地下浅层气水平方向连续分布，6 个测试点位根据前期勘察结果确定，在场地内部均匀布设。RCPTU 测点布设如图 2 所示。

试验采用 RCPTU 探头结构图如图 3 所示。RCPTU 的电阻率测试部分主要由 4 个不锈钢电极和内部电路系统组成。电极之间用绝缘塑料隔开，形成 O 型密封圈系统。相邻两不锈钢电极间距 5 cm，

电阻率测量采用内电极，电流通过外电极施加，因此每次测试的有效电阻率范围为 5 cm。采用 Wenner 法测量土体电阻率并以 5 cm 的间隔进行连续记录。可精确测试的电阻率量程为 0~10 000 $\Omega \cdot \text{m}$ ，工作频率为 1 kHz。增强型现场计算机软件 4.0 (E4FCS) 用于现场数据采集。然后利用 CONELOT 和 CLEANUP 软件得到测试锥尖阻力 q_t 、侧壁摩阻力 f_s 、孔隙水压力 u_2 和电阻率 R 数据。本研究中所使用的 RCPTU 探头构造及测试流程符合国际标准^[30]。

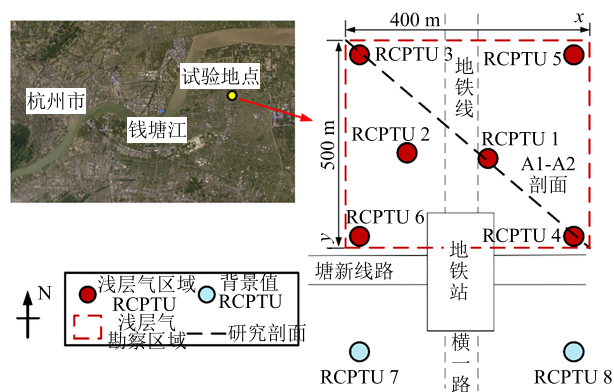


图 2 试验场地位置与 RCPTU 孔位布设

Fig.2 Description of testing site and RCPTU layout

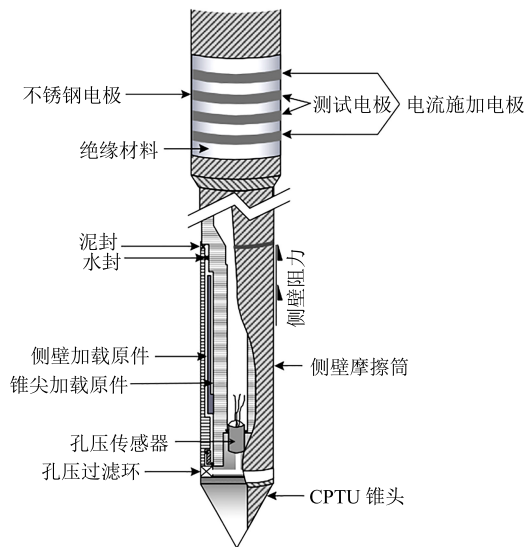


图 3 RCPTU 探头结构图

Fig.3 Structure diagram of RCPTU probe

图 4 显示了本场地的典型 RCPTU 剖面 (RCPTU4)。RCPTU 基本参数包括 q_t 、 f_s 、 u_2 、摩阻比 ($R_f = f_s/q_t$) 和土体电阻率 R 。此外，为获取场地土层分布并确定土层电阻率背景值，通过计算土体行为类型指数 I_c ，并投影 Robertson^[31]提出的土分类图进行土层划分。 I_c 的定义如式 (1)~(3) 所示，场地研究区域的土层分布剖面如图 5 所示。

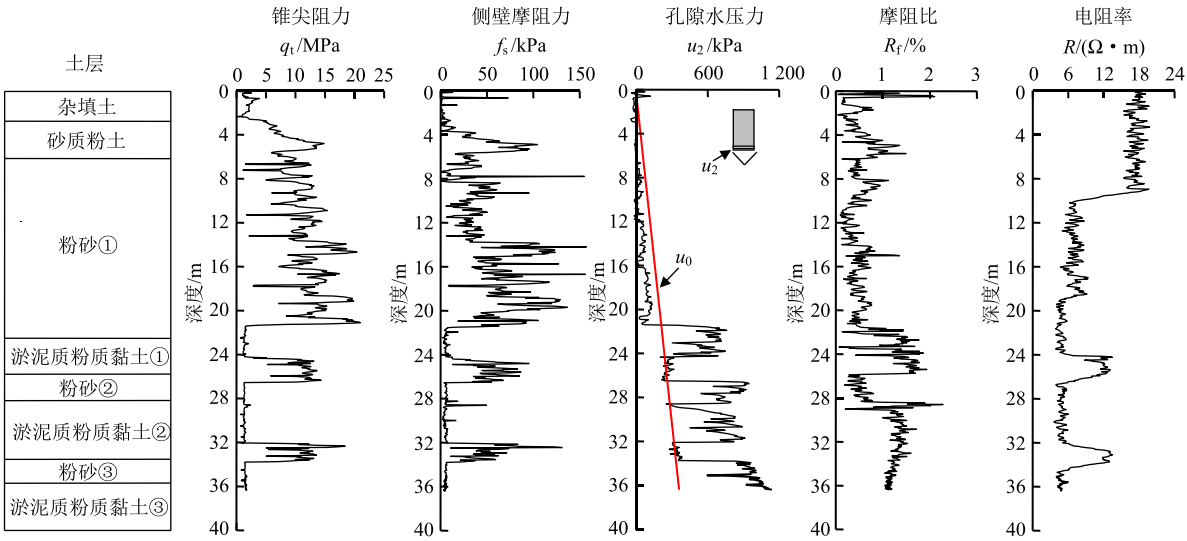


图 4 场地典型 RCPTU 数据剖面 (RCPTU4)

Fig.4 Typical RCPTU data profile (RCPTU4)

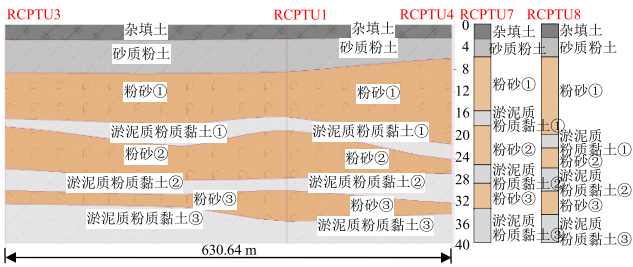


图 5 场地 A1-A2, RCPTU7、8 土层剖面图

Fig.5 Soil profile of A1-A2 and RCPTU7, 8 section of the testing site

$$I_c = \sqrt{(3.47 - \lg Q_{tn})^2 + (1.22 + \lg F_r)^2} \tag{1}$$

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right) \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \tag{2}$$

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma_{v0}) \times 100\% \tag{3}$$

式中： Q_{tn} 和 F_r 分别为归一化锥尖阻力和归一化摩阻比； p_a 为标准大气压； σ_{v0} 和 σ'_{v0} 分别为总竖向应力和有效竖向应力，其值根据表 1 所示的前期钻孔取样的土工试验重度结果，以及 u_2 数据确定的地下水水位进行计算； n 为应力指数，对黏土通常取 1，

表 1 场地钻孔取样土工试验结果
Table 1 Geotechnical test results of field borehole sampling

土层	浅层气勘察区域					电阻率背景值测试区域				
	重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	含水率/%	液限/%	塑限/%	重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	含水率/%	液限/%	塑限/%
砂质粉土	19.1	0.70	27.6	—	—	19.3	0.82	27.9	—	—
粉砂①	19.6	0.69	24.5	—	—	19.4	0.71	24.7	—	—
淤泥质粉质黏土①	18.0	1.21	38.0	35.1	21.3	18.3	0.87	38.5	34.1	20.8
粉砂②	19.7	0.63	36.5	—	—	19.4	0.67	36.1	—	—
淤泥质粉质黏土②	18.3	1.15	37.7	35.3	21.6	18.4	0.95	37.3	34.2	22.1
粉砂③	19.9	0.62	37.3	—	—	19.9	0.60	37.5	—	—
淤泥质粉质黏土③	18.8	1.18	38.3	36.5	22.5	19.1	0.75	37.7	36.1	21.9

砂土取 0.5。

由图 5 可知，该研究场地 0~40 m 深度范围内土层至上而下为：砂质粉土、粉砂、淤泥质粉质黏土与粉砂互层。由于不同土体类型的电阻率差异较大，进行浅层气识别前需根据土层划分结果确定各土层的电阻率背景值。为避免浅层气的存在对土体电阻率背景值的影响，根据前期勘探结果，于勘察场地之外无明显浅层气赋存的区域进行 2 组

RCPTU 测试并进行统计。表 1 中展示了浅层气勘察区域和电阻率背景值测试区域的钻孔取样土工试验结果。对比表明，两区域各土层具有较高的相似性，因而将该处的电阻率值作为背景值是合理的。鉴于该场地浅层气研究仅涉及粉砂层和淤泥质粉质黏土层，因而对 RCPTU7、RCPTU8 通过计算 I_c 进行土层划分后，对电阻率数据分别进行统计分析，确定土层电阻率背景值。图 6 中展示了沿深度的

RCPTU7、RCPTU8 的电阻率测量统计结果, 其中还展示出了包括电阻率平均值和 95% 置信区间的样本统计。95% 置信区间描述了 95% 电阻率数据观测值所处的区间。

统计结果表明, 粉砂层电阻率最大值为 $8.63 \Omega \cdot \text{m}$, 最小值为 $3.64 \Omega \cdot \text{m}$, 均值为 $6.20 \Omega \cdot \text{m}$, 方差为 $0.46 (\Omega \cdot \text{m})^2$ 。淤泥质粉质黏土层的电阻率最大值为 $5.46 \Omega \cdot \text{m}$, 最小值为 $2.97 \Omega \cdot \text{m}$, 均值为 $4.24 \Omega \cdot \text{m}$, 方差为 $0.18 (\Omega \cdot \text{m})^2$ 。采用 Kolmogorov-Smirnov (KS) 方法对电阻率数据进行正态性检验。KS 检验通过设置拒绝正态分布假设的显著性水平 α , 返回根据样本估计的 p 值。当 p 值大于 α 时则说明可以接受样本数据服从正态分布的假设。图 6(c) 和 6(d) 为设置 α 为 5% 条件下的 KS 检验结果, 检验 p 值均大于显著性水平 α 。因而该场地粉砂和淤泥质粉质黏土的电阻率背景值可分别视为均值为 6.20 、 $4.24 \Omega \cdot \text{m}$, 方差为 0.46 、 $0.18 (\Omega \cdot \text{m})^2$ 的正态分布随机变量。

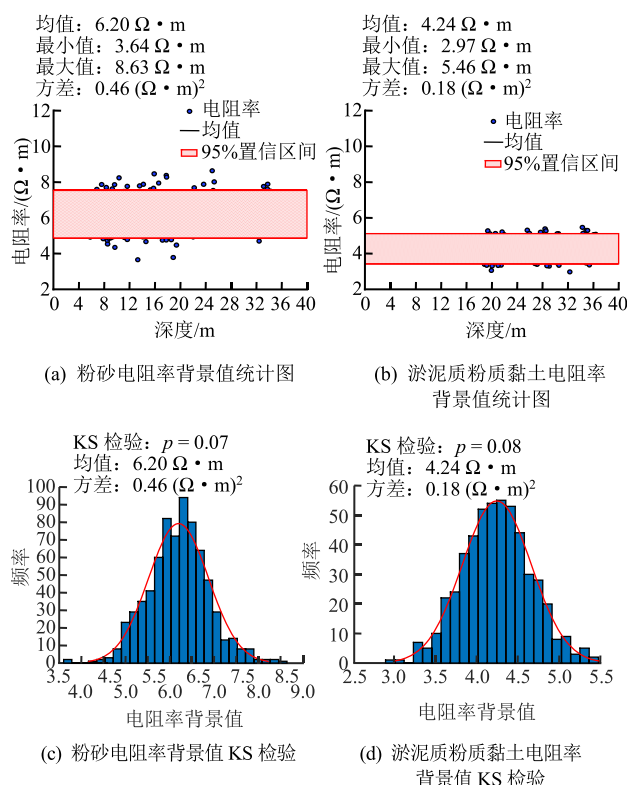


图 6 土层电阻率背景值统计图
Fig.6 Statistics of soil resistivity background value

4 电阻率地质统计分析

地质统计学技术在场调查中是避免误差、提高计算精度的有效方法。经典统计方法中, 从总体中抽取的样本缺乏空间属性, 因此, 某一抽样的参数值不包括另一个样本中同一参数的任何信息。而

地质统计学方法则考虑了样本的数值和位置的关系并进行分析^[32]。地质统计分析通过建立空间相关结构的数学模型来关联不同样本的空间特性 (距离、方向), 拟合变差函数进行空间相关性的定量度量。在二阶平稳性假设基础上, 假定区域内未采样处参数值可以表述为相关范围内所有采样参数值的线性加权平均。通过插值技术 (例如: 克里格插值), 可在无采样位置处提供基于最小二乘法的区域化变量的最优线性无偏估计^[33]。其中, 各采样参数值的权重大小仅取决于变差函数和距离预测点的距离。地质统计学技术在过去的十几年中已成为岩土工程参数估计分析中常用的方法之一^[34]。

4.1 地质统计分析基本原理及流程

地质统计学分析中, 将样本参数视为变量, 变量间的相关性通过线性关系式表示, 即未采样点参数 X_0 可表示为采样点观测值 X_i 的线性加权平均, 可表示为

$$X_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_i X_i \quad (4)$$

式中: X 代表未采样点岩土参数, 可以为 RCPTU 电阻率等; X_i 表示第 i 个空间位置处的参数观测值; N 为观测值的数量; λ_i 为 X_i 对应的权重系数。

通过建立变差函数定义参数 X 空间自相关性的变化规律, 结合对待估计点进行最优 (即方差最小)、无偏 (即估计方差期望为 0) 估计的条件, 对权重系数进行求解。变差函数的计算公式为

$$\gamma(\tau) = \frac{1}{2N(\tau)} \sum_{i=1}^{N(\tau)} [X_i - X_{i+\tau}]^2 \quad (5)$$

式中: $\gamma(\tau)$ 为变差函数; τ 为间距; $N(\tau)$ 为间距为 τ 的数据对数。

本文的地质统计学分析步骤包括移除趋势项、变差函数分析、克里格插值, 其流程如图 7 所示。通过估计测试数据中的潜在趋势, 移除趋势项并生成残差剖面。通过变差函数分析、评估残差剖面的

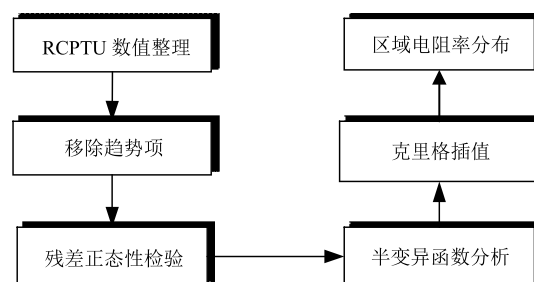


图 7 地质统计学分析流程图
Fig.7 Flowchart of geostatistical analysis used in this study

自相关特征和变异幅度。根据变差函数分析的结果,采用克里格插值提供每个空间位置电阻率变量的平均值和标准差,从而得到电阻率的区域空间分布。

4.2 移除趋势项

图 8 展现了电阻率测量值的统计结果,结果表明直接测量值无法满足弱平稳性假定。Phoon 等^[35]指出,未去除岩土参数潜在的趋势项,通常会使得预测的空间变异性远远大于实际固有空间变异性。一方面为满足对弱平稳性假定的要求,另一方面避免由于采用总变异性分析而导致高估电阻率变异性,因而需要进一步拟合电阻率趋势项并进行移除。

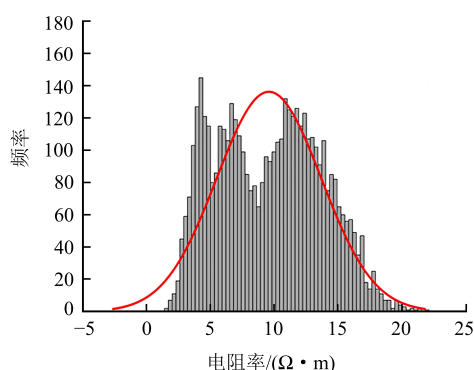


图 8 电阻率测量值统计

Fig.8 Statistics of measured resistivity values

原始电阻率测量可分解为趋势项和残差之和:

$$R_m = R_t + R_r \quad (6)$$

式中: R_m 为电阻率测量值; R_t 和 R_r 分别为电阻率趋势项和残差。

趋势项可通过回归分析进行估计。趋势项的阶数应尽可能降低,以减少曲线拟合过程中产生的统计误差^[36]。因此,为更好地反映地下浅层气的非均匀分布规律,本研究选取二次函数通过普通最小二乘 (OLS) 进行回归分析。图 9 显示了回归分析的结果,趋势项估计为

$$R_t = 3.21 + 4.97 \times 10^{-7}x + 6.44 \times 10^{-7}y + 5.09 \times 10^{-8}z - 3.44 \times 10^{-5}xy - 1.87 \times 10^{-6}xz - 1.86 \times 10^{-6}yz + 6.31 \times 10^{-5}x^2 + 4.61 \times 10^{-5}y^2 + 9.05 \times 10^{-7}z^2 \quad (7)$$

虽然二次趋势方程可以反映电阻率的非线性分布,但是电阻率数据相对趋势方程具有显著的分散性。因此,仅依靠趋势方程的简单评估不能完全描述电阻率的空间分布,对移除趋势项后的残差进行详细和合理的分析,进而对场地浅层气分布进行识别,是本研究中使用地质统计学的主要目标。

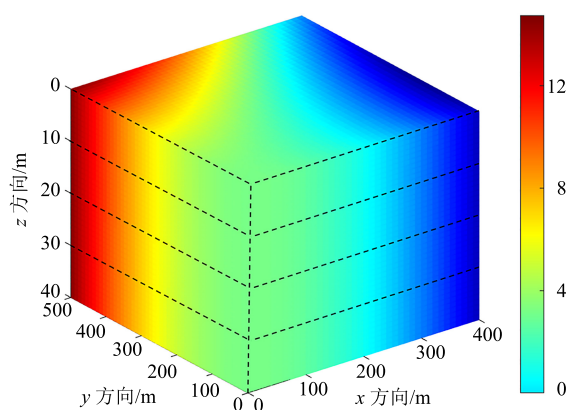


图 9 RCPTU 电阻率趋势项 (单位: $(\Omega \cdot m)$)

Fig.9 Trend item of the measured resistivity(unit: $(\Omega \cdot m)$)

下一步通过 KS 方法检验残差数据的正态性。结果如图 10 所示。检验结果 p 值为 0.12, 大于 0.05, 因而可以接受该场地电阻率残差符合弱平稳性的假设。

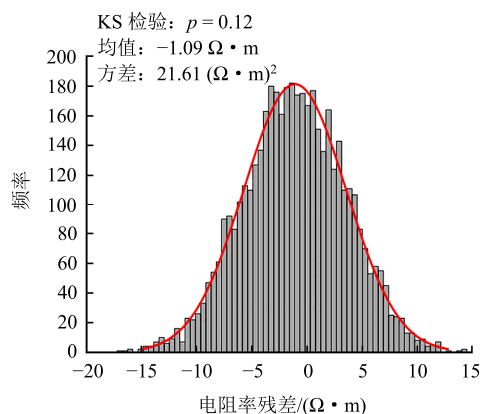


图 10 电阻率残差 KS 检验结果

Fig.10 KS test results of resistivity residuals

4.3 变差函数分析

电阻率测量值减去趋势项后,对电阻率残差进行变差函数分析,可得到不同间距条件下电阻率残差自相关强度及变化趋势。如上所述,岩土参数的各向异性一般表现为自相关距离。鉴于 x , y 方向异性较小,竖直方向和水平方向的异性最为显著。本研究中假设 x 、 y 方向上的自相关距离相同。从而将这两个方向上的电阻率数据集中分析,以减少水平方向上有限样本数据引起的潜在统计误差。因此,本节分别从竖直方向和水平方向两个方向分析变差函数。在竖直方向上,变差函数分析步骤如下:

(1) 获得每个电阻率残差剖面的统计信息,以获得单独的垂直试验变差函数。

(2) 共计 6 个 RCPTU 测试孔,因此可以得到一组由 6 个竖直方向上的变差函数组成的试验变差

函数云图。

(3) 对每个间距下的 6 组试验变差函数取平均值, 以获得平均后的试验变差函数云图。

(4) 选择合适的理论变差函数模型, 对平均后的试验变差函数进行拟合, 确定理论变差函数的模型参数常用的理论变差函数模型如表 2 所示^[37]。

表 2 常用理论变差函数模型^[38]

Table 2 Commonly used theoretical variogram models^[37]

理论变差函数模型	表达式	模型参数
球型	$\gamma(\tau) = \begin{cases} c_0 + (c_s - c_0) \left(\frac{3\tau}{2a} - \frac{\tau^3}{2a^3} \right) & 0 < \tau \leq a \\ c_s & a < \tau \end{cases}$	
指数型	$\gamma(\tau) = c_s - (c_s - c_0) \cdot \exp\left(-\frac{3\tau}{a}\right)$	c_0 为块金值; c_s 为基台值;
高斯型	$\gamma(\tau) = c_s - (c_s - c_0) \cdot \exp\left(-\frac{3\tau^2}{a^2}\right)$	a 为自相关距离
线性	$\gamma(\tau) = \begin{cases} c_0 + a\tau & 0 < \tau \leq a \\ c_0 + c_s & a < \tau \end{cases}$	

水平方向上, 类似地重复步骤 (1) ~ (4)。鉴于 RCPTU 测试技术被认为是高精度可重复的测试技术, 因而本研究中忽略随机测试误差, 在变差函数的拟合中将块金值设为 0。同时由于变差函数的各向异性表现在自相关距离的不同而非方差, 因而在竖向和水平向理论变差函数的拟合中设定基台值相同。下式所示的指数模型为最优拟合模型。

$$\gamma(h_x, h_y, h_z) = c_s \left\{ 1 - \exp \left[-3 \frac{\sqrt{(h_x a_z / a_x)^2 + (h_y a_z / a_y)^2 + (h_z)^2}}{a_z} \right] \right\} \quad (8)$$

式中: h_x 、 h_y 、 h_z 为空间两点之间在 x 、 y 、 z 方向上的距离; a_x 、 a_y 、 a_z 为 x 、 y 、 z 方向上的自相关距离。

如图 11 所示, 基台值是平稳的变差函数的值, 拟合结果为 4.7。本研究假设水平方向上的自相关距离相同 (即 $a_x = a_y$), 拟合结果为 55.6 m。竖向方向上的自相距离 a_z 拟合结果为 5.1 m。随后的克里金插值中使用各向同性而不是各向异性自相关结构来进行, 以简化计算。这种转换可以通过将 x 和 y 方向坐标分别乘以 a_z/a_x 和 a_z/a_y , 以在插值之前在 x 、 y 和 z 方向上产生相同的自相关范围, 并在插值后返回原始测量空间。

4.4 克里格插值

克里格插值方法根据权重系数的求解方法不同, 通常分为普通克里格插值、简单克里格插值和泛克里格插值等, 普通克里格具有可靠性高、计算

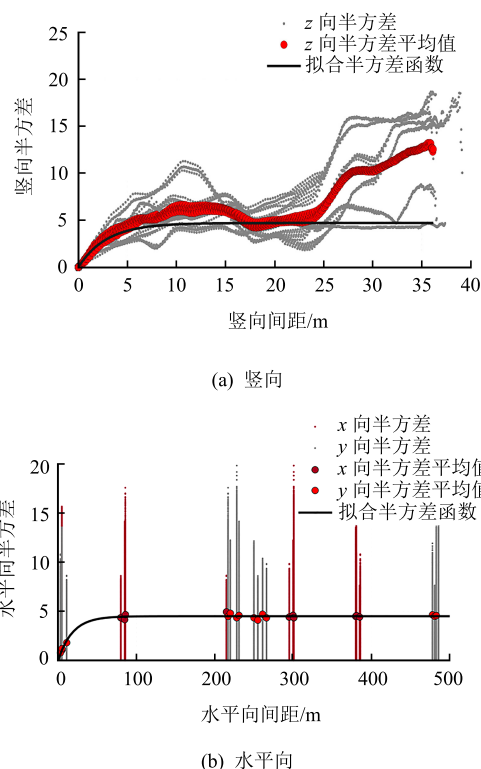


图 11 竖向和水平向变差函数拟合
Fig.11 Fitting for variogram functions in vertical and horizontal direction

简便的优点^[34], 因而应用于本研究中。在普通克里格插值中, 确定变差函数后, 可根据式 (9)、(10) 的无偏性条件和最小方差条件, 推导权重系数的求解矩阵表达式^[36]:

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^N \lambda_j \gamma(X_i, X_j) + \mu = \gamma(X_i, X_0) \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1N} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2N} & 1 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{N1} & \gamma_{N2} & \cdots & \gamma_{NN} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_N \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{N0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: μ 为拉格朗日乘数, 假定为 X_0 的数学期望值。

采用普通克里格插值预测场地未采样点的电阻率残差后, 叠加趋势项便可得到未采样点电阻率的最优线性无偏估计, 如式 (12) 所示。虽然土层中浅层气的赋存必然导致电阻率值的升高, 但是电阻率测试本身受土体类型影响较大。单纯依靠电阻率值的绝对大小难以判断浅层气赋存位置, 下文中将结合土层电阻率背景值进行可靠度分析, 对浅层气分布区域加以判定。

$$R_m = R_t + \sum_{i=1}^N \lambda_i R_{ri} \quad (12)$$

式中: R_{ri} 为第 i 处的电阻率残差。

4.5 交叉验证

为了评估地质统计学模型和克里格插值得到电阻率分布的准确性,使用交叉验证分别对地质统计学模型和克里格插值结果进行验证。交叉验证的原理是利用所有测试数据构建变差函数模型,然后移除每个测量数据,再应用克里格插值预测所移除的数据并与测试数据进行对比,进而评估预测的准确性。

本研究中由于每个深度水平的样本量有限(6个),在水平自相关距离(a_x 和 a_y)的确定上存在一定挑战性,因而进行交叉验证。采用均方误差(MSE)作为评价指标,如式(13)所示。MSE 值越低(接近 0)表示模型预测性能越好。不同水平自相关距离下的 MSE 计算结果如图 12 所示。结果表明在 $a_x = a_y = 55.6$ m 处误差值最小。从而验证了变差函数模型的合理性。

$$MSE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R'_i - R_i)^2 \quad (13)$$

式中: N 为数据总量; R'_i 为预测电阻率值; R_i 为电阻率测量值。

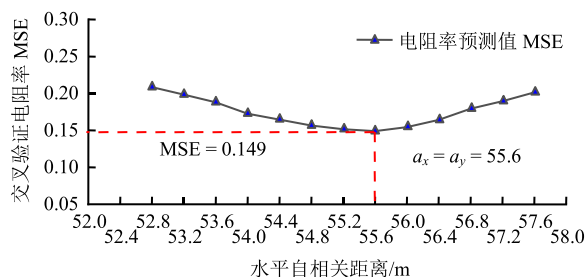


图 12 水平自相关距离交叉验证结果

Fig.12 Results of cross validation for horizontal correlation distance

采用 MSE 和决定系数 R^2 作为评价指标对预测结果和测试数据之间的差异进行交叉验证评估, R^2 定义如式(14)所示。 R^2 值越高(接近 1)表示模型预测性能越好。交叉验证的结果如图 13 所示。该场地的电阻率测量值和预测值之间的 R^2 和 MSE 分别为 0.926 和 0.149。结果表明,地质统计学方法的预测结果与实测值基本一致,具有较高的准确性。

$$R^2 = 1 - (SSE/SST) \quad (14)$$

式中: SSE 为误差平方和; SST 为总平方和。

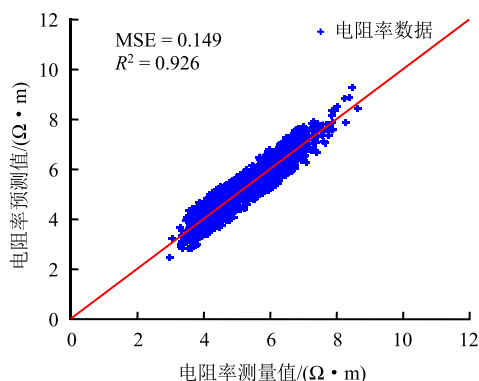


图 13 电阻率数据交叉验证结果

Fig.13 Results of cross validation for resistivity data

5 基于可靠度的浅层气识别

长期以来一直是工程可靠性分析的基本工具。通过最小化极限状态方程下的可靠性指标 β , 为基于可靠性的工程实践设计提供信息。虽然基于可靠性的分析已广泛应用于结构和岩土工程中, 但缺少对地下浅层气识别的应用案例。

在本研究中, 某一空间位置处电阻率识别浅层气的极限状态函数可写为

$$g(\mathbf{R}) = R_m - R_b = 0 \quad (15)$$

式中: $g(\mathbf{R})$ 为极限状态方程, 由于不同土体的电阻率背景值不同; R_b 为 R_m 所对应的土类的土体电阻率背景值; $\mathbf{R}$ 为包含 R_m 和 R_b 的向量。理想情况下, 即不考虑岩土参数固有的不确定性和测试误差, 当测试土体中显著含有 CH_4 时反映在极限状态函数中为 $g(\mathbf{R}) > 0$ 。

Zou 等^[19]指出, 对于污染场地的电阻率测试中, R_m 和 R_b 通常被认为是独立的服从正态分布。这一假定的合理性在于污染物迁移主要受土体的扩散系数等水力特性的影响, 而非土体的状态或结构参数, 例如孔隙比等^[19, 38]。本研究中, 浅层气的识别可等效于土体中污染物的识别, R_m 和 R_b 的相关性大小与土体浅层气的含量有关, 例如土体中浅层气含量为 0 时, $R_m \approx R_b$, 即二者相关性为 1。随着土体浅层气含量的增加, 二者之前的相关性降低, 这是因为土体中浅层气的产生、运移也主要受土体的扩散系数等水力特性因素的影响^[4], 因此当土体中明显存在浅层气时(如本文案例), R_m 和 R_b 的相关性较弱。又因目前暂无含浅层气土体的 R_m 和 R_b 相关性研究, 以证明其具有相关性并提供其相关关系, 因此本研究中 R_m 和 R_b 被视为独立的服从正态分布。

因此在 R_m 和 R_b 服从二元正态分布的前提下,

考虑岩土参数固有的不确定性，可以定义 β 来评估由 R_m 和 R_b 定义的点和二元正态分布空间中失效准则（即式（15））之间的最小距离^[39]。 $\beta=0$ 则表示该点位于极限状态函数。

$$\beta = \min \sqrt{\left[\frac{\mathbf{R} - \mathbf{m}_R}{\boldsymbol{\sigma}_R} \right]^T [\boldsymbol{\rho}]^{-1} \left[\frac{\mathbf{R} - \mathbf{m}_R}{\boldsymbol{\sigma}_R} \right]} \quad (16)$$

式中： $\mathbf{R} = [R_m, R_b]^T$ ； $\mathbf{m}_R$ 为包含 R_m 和 R_b 均值的向量； $\boldsymbol{\sigma}_R$ 为包含 R_m 和 R_b 标准差的向量； $\boldsymbol{\rho}$ 则为 R_m 和 R_b 的相关系数矩阵。由于 R_m 和 R_b 被认为相互独立，因此 $\boldsymbol{\rho}$ 为单位矩阵。

在极限状态函数的约束下，采用 MATLAB 中的 fmincon 函数求取 β 的最小值。土体中浅层气的赋存概率被定义为土体测试电阻率被赋存浅层气所主导的概率，即当 $g(R)>0$ 时。则浅层气的赋存概率为

$$P = \Phi(\beta) \quad (17)$$

式中： Φ 为标准正态累积分布函数。

图 14 为沿深度和 A1-A2 剖面的浅层气识别结

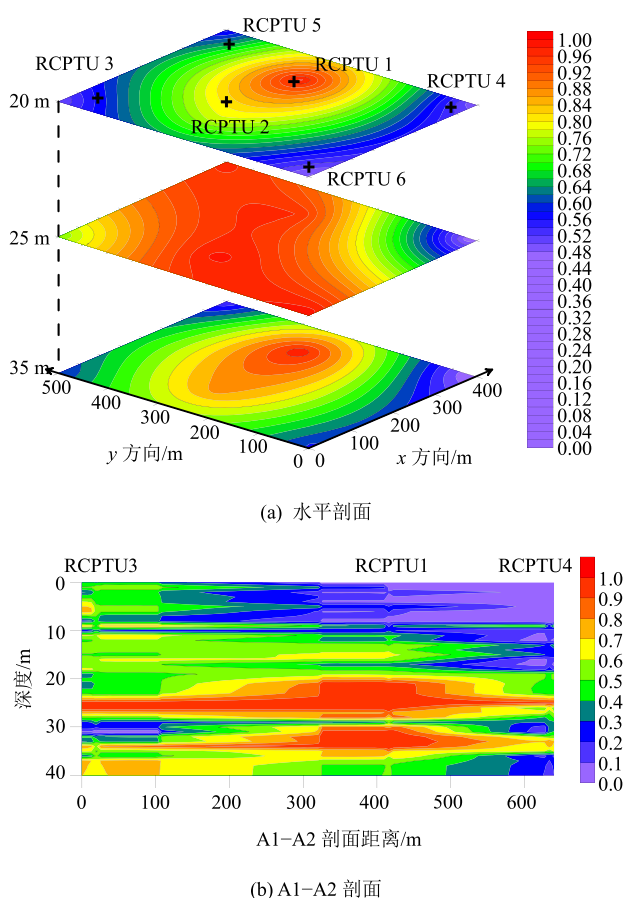


图 14 地下浅层气三维识别概率图

Fig.14 Probability map of three-dimensional identification of underground shallow gas

果。该图显示，0~20 m 深度方位内未明显地识别出浅层气，当深度超过 37 m 后也未明显地识别出浅层气。在 25 m 深度附近，红色的浅层气赋存高概率区域贯穿整个剖面。另一浅层气赋存高概率区域则位于 RCPTU1 点位的 30~35 m 之间。两个高概率区域之间的 30 m 深度处存在无浅层气的夹层。从 A1-A2 剖面水平的方向上看出，浅层气主要赋存于 RCPTU1 点位处，25 m 深度附近浅层气则贯穿分布整个剖面。

因此，综合判定该场地浅层气的赋存区域在于 25 m 深度处以及 RCPTU1 点位附近的 30~35 m 深度区间。结合图 5 中 A1-A2 土层剖面，浅层气主要赋存于粉砂层中。为防止浅层气对地铁施工造成安全隐患，因而应在进行地铁施工前重点对 RCPTU1 点位附近，以及 25 m 附近和 30~35 m 深度区间采取布设排气孔等措施进行重点防治。

6 结 论

本研究结合了地质统计学和一阶可靠度方法，分析了电阻率静力触探的电阻率测量数据，评估了杭州某地铁站场地的地下浅层气空间分布。得出如下结论：

(1) 采用指数型理论变差函数较为精确地描述了电阻率残差在竖直和水平方向上的空间变异特征。竖直方向和水平方向上的自相关距离分别为 5.1 m 和 55.6 m，表明场地电阻率具有显著的各向异性。

(2) 结合不同土体的电阻率背景值，杭州某地铁站场地地下浅层气集中分布于 25 m 和 30~35 m 深度处，水平方向上 RCPTU1 点位附近为浅层气集中分布区。结合基于 RCPTU 的土层剖面图可知，浅层气主要分布于粉砂层中。

(3) 利用基于地质统计学的一阶可靠度分析方法，合理地获得地下浅层气分布概率的三维图。该三维图可为排气孔布设点位、布设深度提供指导信息，降低地下浅层气对地铁施工带来的影响和危害。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] GENNARO V D, PUECH A, SULTAN N. Mechanical behaviour of gas-charged marine plastic sediments[J]. *Géotechnique*, 2012, 62(9): 751-766.

- [3] HONG Y, WANG L, ZHANG J, et al. 3D elastoplastic model for fine-grained gassy soil considering the gas-dependent yield surface shape and stress-dilatancy[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2020, 146(5): 04020037.
- [4] KIM Y J, CHEONG S, CHUN J H, et al. Identification of shallow gas by seismic data and AVO processing: Example from the southwestern continental shelf of the Ulleung Basin, East Sea, Korea[J]. **Marine and Petroleum Geology**, 2020, 117: 104346.
- [5] GUAN Z, Y WANG, CAO Z, et al. Smart sampling strategy for investigating spatial distribution of subsurface shallow gas pressure in Hangzhou Bay area of China[J]. **Engineering Geology**, 2020, 274(1): 105711.
- [6] TANG Y Q, YE W M, YU H. Marsh gas in shallow soils and safety measures for tunnel construction[J]. **Engineering Geology**, 2003, 67(3-4): 373-378.
- [7] MISSIAEN T, MURPHY S, LONCKE L, et al. Very high-resolution seismic mapping of shallow gas in the Belgian coastal zone[J]. **Continental Shelf Research**, 2002, 22(16): 2291-2301.
- [8] FUKUE M, MINATO T, MATSUMOTO M, et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers[J]. **Engineering Geology**, 2001, 60(1-4): 361-369.
- [9] CAMPANELLA R. Geo-environmental site characterization[C]// 2008 Proceeding of the 3rd International Conference on Site Characterization. Taibei (Taipei) CRC Press, 2008: 14-24.
- [10] MONDELLI G, GIACHETI H L, HOWIE J A. Interpretation of resistivity piezocone tests in a contaminated municipal solid waste disposal site[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2010, 33(2): 123-136.
- [11] KANG D J, LU J A, QU C W, et al. Characteristics of gas hydrate reservoir from resistivity image in the Shenhu area, China[J]. **Journal of Environmental Geotechnics**, 2020. DOI: 10.1680/jenge.19.000/6.
- [12] CARY TIMOTHY ALAN. Time-lapse electrical resistivity imaging of methane gas migration in a shallow confined aquifer[D]. Calgary: University of Calgary, 2019.
- [13] SUN J, NING F, WU N, et al. The effect of drilling mud properties on shallow lateral resistivity logging of gas hydrate bearing sediments[J]. **Journal of Petroleum Science & Engineering**, 2015, 127: 259-269.
- [14] AHN T, ALLOUCHE E N, YANFUL E K. Detection of heavy metal and hydrocarbon contamination using a miniature resistivity probe[J]. **Environmental Technology Letters**, 2007, 28(6): 701-711.
- [15] MONDELLI G, GIACHETI H L, BOSCOV M, et al. Geoenvironmental site investigation using different techniques in a municipal solid waste disposal site in Brazil[J]. **Environmental Geology**, 2007, 52(5): 871-887.
- [16] 蔡国军, 邹海峰, 刘松玉, 等. 电阻率 CPTU 在某农药厂污染场地评价中的应用[J]. **工程地质学报**, 2012, 20(5): 821-826.
- CAI Guo-jun, ZOU Hai-feng, LIU Song-yu, et al. Application of resistivity CPTU in evaluation of contamination site for pesticide factory[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2012, 20(5): 821-826.
- [17] 颜聪. 基于电阻率孔压静力触探 RCPTU 测试的染化污染场地评价研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- YAN Cong. Study on evaluation of dyeing contaminated site based on resistivity piezocone penetration test RCPTU[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [18] 边汉亮. 基于电学热学参数的有机物污染场地工程特性评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- BIAN Han-liang. Study of the engineering property evaluation method for organic contaminated sites based on the electrical and thermal parameters[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [19] ZOU H, LIU S, CAI G, et al. Probabilistic identification of contaminated soils using resistivity piezocone penetration tests[J]. **Acta Geotechnica**, 2020, 15(5): 1-19.
- [20] MARKUS J, MCBRATNEY A B. A review of the contamination of soil with lead[J]. **Environment International**, 2001, 27(5): 399-411.
- [21] IMPERATO M, ADAMO P, NAIMO D, et al. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy)[J]. **Environmental Pollution**, 2003, 124(2): 247-256.
- [22] HOOKER P J, NATHANAIL C P. Risk-based characterisation of lead in urban soils[J]. **Chemical Geology**, 2006, 226(3): 340-351.
- [23] VACHA R, SKALA J, CECHMANKOVA J, et al. Toxic elements and persistent organic pollutants derived from industrial emissions in agricultural soils of the Northern Czech Republic[J]. **Journal of Soils and Sediments**, 2015, 15(8): 1-12.
- [24] BEDNAROVA ZDENKA, KALINA J, HAJEK O, et al. Spatial distribution and risk assessment of metals in agricultural soils[J]. **Geoderma**, 2016, 284: 113-121.
- [25] LUMB PETER. The variability of natural soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1966, 3(2): 74-97.
- [26] WU S H, OU C Y, CHING J, et al. Reliability-based

- design for basal heave stability of deep excavations in spatially varying soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2012, 138(5): 594-603.
- [27] 蒋水华, 曾绍慧, 杨建华, 等. 不排水抗剪强度非平稳随机场模拟及边坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 1071-1079.
- JIANG Shui-hua, ZENG Shao-hui, YANG Jian-hua, et al. Non-stationary random field simulation of undrained shear strength and slope reliability analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(3): 1071-1079.
- [28] GRIFFITHS D V, HUANG J, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis using RFEM with non-stationary random fields[C]//5th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk. Rotterdam: [s. n.], 2015: 704-709.
- [29] 祁小辉, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑不排水抗剪强度空间变异性的条形基础极限承载力随机分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1095-1105.
- QI Xiao-hui, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, et al. Stochastic analysis of ultimate bearing capacity of strip footing considering spatial variability of undrained shear strength[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(6): 1095-1105.
- [30] ASTM. ASTM-D5778 Standard test method for performing electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils 1[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000.
- [31] ROBERTSON P K. Interpretation of cone penetration tests—a unified approach[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2009, 46(11): 1337-1355.
- [32] BABAKHANI M, ZEHTABIAN G H, KESHTKAR A M, et al. Trend of groundwater quality changes, using geo statistics (case study: ravar plain)[J]. **Pollution**, 2016, 2(2): 115-129.
- [33] WEBSTER R, OLIVER M A. Geostatistics for environmental scientists [M]. 2nd ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- [34] 邹海峰, 蔡国军, 刘松玉, 等. 基于地质统计学方法的孔压静力触探锥尖阻力固有空间变异性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 403-407.
- ZOU Hai-feng, CAI Guo-jun, LIU Song-yu, et al. Research on modeling inherent spatial variability of piezocone penetration test cone tip resistance based on geostatistics[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(Suppl.1): 403-407.
- [35] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1999, 36(4): 612-624.
- [36] ZOU H, LIU S, CAI G, et al. Mapping Probability of liquefaction using geostatistics and first order reliability method based on CPTU measurements[J]. **Engineering Geology**, 2017, 218: 197-212.
- [37] JONES A L, KRAMER S L, ARDUINO P. Estimation of uncertainty in geotechnical properties for performance-based earthquake engineering[R]. Berkeley: University of California, 2002.
- [38] RINALDI V A, CUESTAS G A. Ohmic conductivity of a compacted silty clay[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2002, 128(10): 824-835.
- [39] BAECHER G B, CHRISTIAN J T. Reliability and statistics in geotechnical engineering[D]. [S. l.]: Wiley, 2005.
- [36] 邓红卫, 刘传举, 柯波, 等. 循环动力扰动下花岗岩微观损伤特性试验研究[J]. 工程科学学报, 2017, 39(11): 1634-1639.
- DENG Hong-wei, LIU Chuan-ju, KE Bo, et al. Experimental study on microscopic damage characteristics of granite under cyclic dynamic disturbances[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2017, 39(11): 1634-1639.
- [37] 冯国瑞, 文晓泽, 郭军, 等. 含水率对煤样声发射特征和碎块分布特征影响的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(8): 2910-2918.
- FENG Guo-rui, WEN Xiao-ze, GUO Jun, et al. Study on influence of moisture content on coal sample AE properties and fragment distribution characteristics[J]. **Journal of Central South University(Science and Technology)**, 2021, 52(8): 2910-2918.
- [38] 胡少斌, 王恩元, 沈荣喜. 深部煤岩动力扰动响应特征及数值分析[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(4): 540-546.
- HU Shao-bin, WANG En-yuan, SHEN Rong-xi. Characteristics of dynamic disturbance response in deep coal and rock and its numerical analysis[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2013, 42(4): 540-546.
- [39] HINZE J O. Turbulence: an introduction to its mechanism and theory[M]. [S. l.]: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1960.

上接第 3436 页