

王德元, 彭秀钟, 杜宇琛, 等. 多源数据融合的海上风电场三维地质建模方法[J]. 海洋学报, 2025, 47(2): 85–97. doi:10.12284/hyxb2025013
Wang Deyuan, Peng Xiuzhong, Du Yuchen, et al. 3D geological modelling method of offshore wind farms based on multi-source data fusion[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(2): 85–97. doi:10.12284/hyxb2025013

多源数据融合的海上风电场三维地质建模方法

王德元¹, 彭秀钟², 杜宇琛¹, 高曜翔², 张友虎^{2*}

(1. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 三维地质模型通过利用海上勘察数据直观地展示海底地质情况, 对海上风电场的开发建设具有积极的推动作用。为提高海上风电场三维地质模型的准确性和建模效率, 提出一种基于多源数据融合的地质建模方法。该方法对岩土勘察数据和工程物探数据进行综合解释, 采用空间插值算法生成连续且平滑的地层分界面, 并利用 Python 开源库实现了三维地质模型的构建与可视化。此外, 以粤东地区某海上风电场为例, 验证了该地质建模方法的可靠性。结果表明: 该方法实现了岩土数据和物探数据的有效融合, 所构建的三维地质模型能够反映海上风电场复杂的地质特征。所提出的三维地质建模方法可以适用于不同的工程地质环境, 为海上风电场从勘察、设计、安装、运维到退役的全生命周期管理提供坚实的技术支撑。

关键词: 海上风电场; 多源数据; 岩土勘察; 工程物探; 空间插值; 三维地质模型

中图分类号: P752; TU195; TM614

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2025)02-0085-13

1 引言

海上风电以其资源丰富、供电稳定、适合大规模开发的优点, 成为推动全球能源结构转型和实现可持续发展目标的重要清洁能源。截至 2023 年底, 全球海上风电累计装机容量达到 75.2 GW, 中国以占全球总量 50% 的份额位居首位^[1]。目前, 江苏、广东、福建等沿海省份正积极规划与建设新的海上风电项目, 预计 2024 年至 2028 年间将为中国增加 72 GW 的海上风电装机容量^[1]。海上勘察能够提供海底地形、地质构造和地层分布等信息, 对于海上风电场的选址、规划和建设至关重要。三维地质模型通过将海上勘察数据转化为立体的虚拟模型, 直观地呈现了海底地质情况, 在推动海上风电资源高效开发方面具有显著的促进作用。

三维地质建模的概念最初由 Houlding^[2] 提出, 用于解决油田开发、矿产资源储量评估以及岩土工程

设计等领域的问题。随着计算机技术的进步, 三维地质模型已在地质勘探^[3-5]、城市规划^[6-7]、环境工程^[8] 等多个学科发挥重要作用, 其应用范围也逐渐从陆地地区向海洋环境扩展^[9]。传统的三维地质建模需要大量岩土勘察数据^[10], 但是海上岩土勘察成本较高, 勘察点位置通常仅布置在风机机位附近, 且数量有限。由于海底沉积环境复杂、地质条件水平差异性显著^[11], 基于有限的岩土勘察数据构建的三维地质模型在地层预测上存在较大的不确定性, 难以全面揭示海上风电场真实的地质条件。工程物探具有覆盖范围广、数据采集成本低的优点, 能捕捉连续的地下结构图像, 从而识别出地层分界、洞穴等关键特征^[12]。工程物探数据有效弥补了岩土勘察数据在空间分布上的不连续, 岩土勘察数据能为工程物探数据提供土体分类和岩土参数等信息, 两者相互补充, 能更准确地反映地下地质情况^[13]。

在过去 10 年中, 欧洲已将基于岩土勘察和工程

收稿日期: 2024-07-23; 修订日期: 2024-12-31。

作者简介: 王德元(1983—), 男, 重庆市奉节县人, 工程师, 主要从事海上风电设计技术研究。E-mail: 20759565@qq.com

* 通信作者: 张友虎, 教授, 主要从事海洋岩土工程领域研究。E-mail: youhuzhang@seu.edu.cn

物探的数据融合技术成功应用于海上风电领域。Eady等^[14]通过提升工程物探数据的垂直分辨率,揭示了Ijmuiden Ver海上风电场黏土与砂土互层的地质特征。Arlott等^[15]进一步整合岩土勘察数据和工程物探数据,推断出Triton Knoll海上风电场复杂的地层沉积历史。Sauvin等^[16]提出的数据融合技术不仅能确定海上风电场的地层分布,还可以获取任意位置的岩土设计参数。通过多源数据融合建立三维地质模型时,通常面临模型复杂度高、建模效率低等挑战。吴志春等^[17]采用分层次、分阶段建模的方法,显著降低了构建复杂三维地质模型的难度。雷传扬等^[18]运用分块建模技术,有效提升了在大面积、复杂地质条件下三维地质模型的建模效率。薛涛等^[19]将异构的岩土勘察数据和工程物探数据转换成同构的虚拟钻孔数据,进而实现了三维地质结构的自动化建模。工程实践^[14-19]表明,将工程物探数据整合到三维地质建模框架中,以实现岩土勘察数据与工程物探数据的有效融合,是提高三维地质模型精度的可靠方法。

常用的地质建模软件,如Petrel、GeoModeller和GOCAD等^[20],支持对岩土勘察数据和工程物探数据进行整合处理,通过人机交互的方式创建三维地质模型。Imam等^[21]从高分辨率工程物探数据中提取地质构造的倾向和倾角信息,并使用Petrel软件生成包含复杂断层系统的三维地质模型。罗辉等^[22]将地质体划分为沉积模式和侵入模式,运用深探地学建模软件得到了能够准确反映构造运动先后次序的三维地质模型。江汝锋等^[23]通过集成PetroMod与Petrel软件,开发出一个能够利用岩土勘察数据和工程物探数据构建盆地三维地质模型的平台。随着地质学理论、统计学方法和机器学习技术的不断发展,基于多源数据融合的三维地质建模方法呈现出多元化发展的趋

势。花卫华等^[24]在三维地质建模过程中引入断裂矢量场概念,解决了复杂接触关系下断裂网络模型的构建问题。Olierook等^[25]使用贝叶斯反演技术,得到了在统计学上可靠且在地质学上合理的三维地质模型。Jia等^[26]发现机器学习的堆叠方法能使三维地质模型在岩性分类上表现出较高的精度。

然而,采用人机交互的建模方式在很大程度上依赖于技术人员的专业知识和实践经验,而应用先进的建模技术则需要多学科专家之间的紧密合作。当面对数据规模庞大、地质条件复杂的场景时,建模过程往往需要投入大量的时间和精力。因此,需要探索一种高效的三维地质建模方法,该方法不仅能充分发挥岩土勘察数据和工程物探数据的价值,同时在建模过程中尽可能地减少人工干预,达到模型准确性与建模效率的平衡。

为了准确高效地构建海上风电场的三维地质模型,本文提出一种基于岩土勘察数据和工程物探数据的三维地质建模方法,建模过程包括数据的综合解释、空间插值和三维可视化。同时,通过构建粤东地区某海上风电场的三维地质模型,验证了该方法的可靠性。所提出的三维地质建模方法具有较好的普适性,可为海上风电场的全生命周期管理提供技术支持。

2 三维地质建模的技术路线

2.1 海上勘察数据

多源数据融合涉及两种类型的海上勘察数据,包括岩土勘察数据和工程物探数据,如图1所示。图1a中,岩土勘察数据分为钻孔数据和静力触探(CPT)数据^[27-28]。钻孔数据是通过钻机向地下钻孔得到的土样信息,而CPT数据是利用圆锥形探头,按一定速率压入土中,测得随贯入深度变化的锥尖阻力、

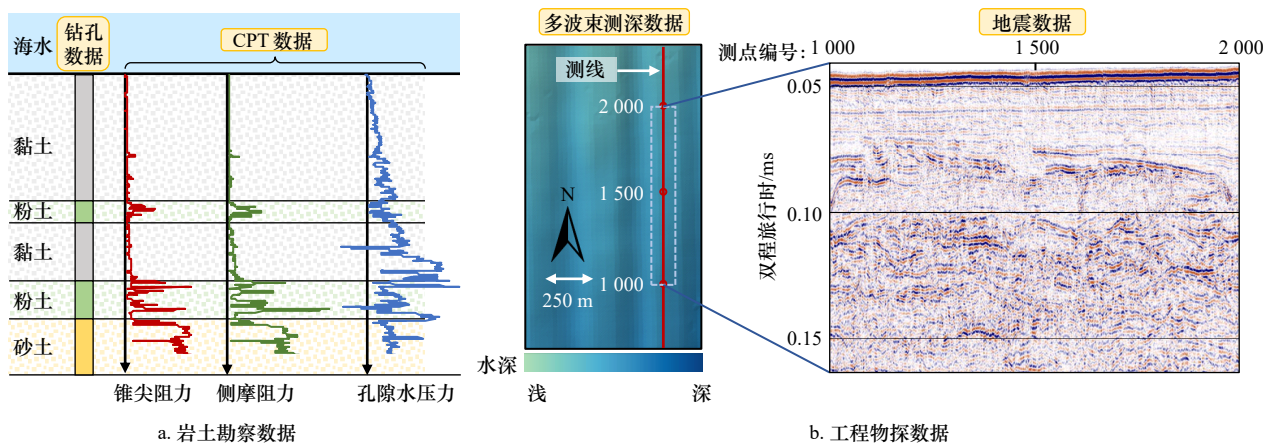


图1 岩土勘察数据(a)和工程物探数据(b)的示例

Fig. 1 Examples of geotechnical investigation data (a) and engineering geophysical data (b)

侧摩阻力和孔隙水压力曲线。图 1b 中,工程物探数据主要有多波束测深数据和地震数据。多波束测深数据是由高密度网格点组成的海底地形图像,每个网格点都记录着对应位置的水深值。地震数据通过海洋地震勘探技术获取,其中地震信号的振幅变化可以采用红蓝渐变的形式呈现,从而形成具有连续条纹特征的地震图像^[29]。地震图像的纵坐标为双程旅行时,表示地震纵波从震源传播到反射点,再折返至接收点所需的总时间。

在海上风电场三维地质建模过程中,岩土勘察数据和工程物探数据相辅相成。岩土勘察数据具有空间分布离散、竖向精度高的特点,能直接提供勘察点处地层的分界面高程、各层土的类别以及土的物理力学参数等信息。工程物探数据覆盖面积大、空间连续,当地震测线经过岩土勘察点附近时,可为岩土勘察成果的内插、外推提供依据。通过对这两种数据进行对比验证,能够有效降低三维地质模型的不确定性。

2.2 三维地质模型的构建流程

与传统的应用于城市、矿山等三维地质模型相比,海上风电场三维地质建模对模型精细化程度的要求更高,需要准确地反映出淤泥、黏土等软弱土层的空间分布特征,从而科学指导海上风机单桩基础的安装,减少在施工过程中可能出现的溜桩、桩靴穿刺等工程风险。另一方面,由于海洋岩土勘察成本高、技术难度大,海上岩土勘察点的数量和分布密度普遍低于陆上工程。因此,在构建海上风电场的三维地质模型时,会更加注重利用工程物探数据,从中提取出海底地质构造、地层分布以及沉积环境等关键信息,从而克服岩土勘察数据不足的挑战。

基于多源数据融合的三维地质模型构建流程如图 2 所示。海上勘察通过采集岩土勘察数据和工程物探数据为三维地质模型提供可靠的输入信息。地

质建模方法是一种将多源异构数据进行系统地分析和整合的技术,通过综合解释、空间插值和三维可视化的步骤,将海底地形、地质构造和地层分布等信息转化为复杂的三维地质模型,以可视化的方式直观展示海上风电场的地质状况。三维地质模型能应用于海上风电场全生命周期管理,协同勘察、设计、安装、运维到退役各阶段的设计需求,做到海上勘察工作有的放矢。

在三维地质建模中,多源数据融合方法可以实现以数据为驱动力的模型优化。通过对三维地质模型进行不确定性评价,识别出需要重点勘察的区域,从而合理布置新增勘察点位置和数量,优化勘察方案。随着新增勘察数据的输入,三维地质模型将得到不断更新。这种动态的过程确保了三维地质模型能尽可能地反映最真实的地质情况,为海上风电场的地质评估和风险管理提供可靠的决策依据^[30]。

3 三维地质建模方法

3.1 海上勘察数据的综合解释

在海上勘察数据的分析过程中,岩土工程专业负责岩土勘察数据的解释,地球物理专业专注于工程物探数据的解释,这两个过程通常是独立进行的,导致岩土勘察数据与工程物探数据之间缺乏相互印证。为确保岩土勘察与工程物探数据解释结果的一致性,需要开展海上勘察数据的综合解释工作。

海上勘察数据的综合解释是指将岩土勘察数据与工程物探数据进行整合,结合区域地质背景,在地震图像上识别出地层界面及各层的土体类型。海上勘察数据综合解释的内容包括以下几个方面:

(1) 统一坐标投影系统和建立速度模型。统一坐标投影系统是为了确保岩土勘察点、多波束测深数据和地震测线在平面图上的相对位置能得到正确显示。此外,通过建立合理的速度模型^[31],可以将地

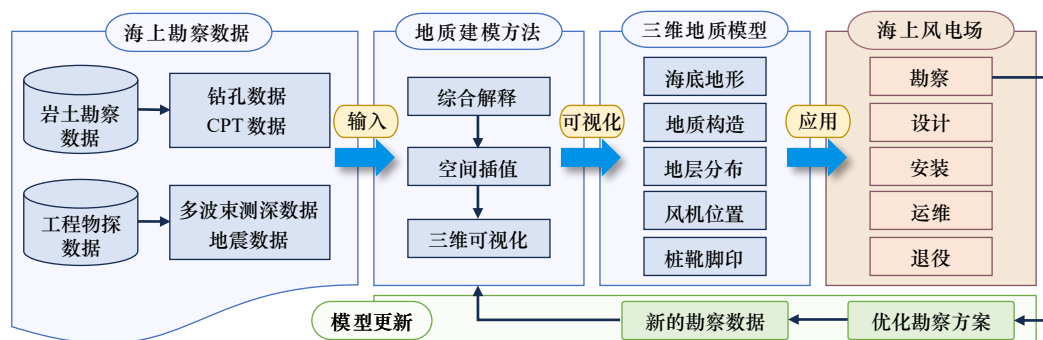


图 2 基于多源数据融合的三维地质模型构建流程

Fig. 2 Flow chart of constructing three-dimensional (3D) geological models based on multi-source data fusion

震图像的纵坐标从双程旅行时转变为深度值,这一过程被称作地震数据的“时深转换”,用于岩土勘察数据与地震图像在深度方向上实现准确对应。时深转换公式如下式:

$$Z = \frac{Tv_{av}}{2000}, \quad (1)$$

$$v_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i v_i}{\sum_{i=1}^n t_i}, \quad (2)$$

式中: Z 和 T 分别为地震纵波在穿过 n 个地层后到达的深度(m)和双程旅行时(ms), v_{av} 为地震纵波在 n 个地层中传播的平均速度(m/s), t_i 和 v_i 分别为地震纵波在第 i 个地层中的双程旅行时(ms)和传播速度(m/s)。

(2) 构建地层框架并提取地层界面。通过对岩土勘察数据和地震图像进行比较分析,同时考虑地质历史的影响,识别出岩土性质差异显著、地震振幅明显增强的地层界面,从而构建一个能够反映该区域宏观地质特征的地层框架。基于地层框架,将地震图像上的振幅反射特性与岩土勘察数据中获得的土层信息相关联,确定主地层及相应的地层属性。在主地层内,寻找清晰的地震反射信号,将其与岩土勘察数据解析出的地层分布进行详细对比,以评估这些反射信号是否代表夹层分界,同时鉴定夹层的组成。

(3) 检查地震解释结果的闭合性。如果各测线在交汇点处的解释结果能够相互验证,具有良好的一致性,则表明该综合解释是准确可信的。反之,若观察到显著的解释差异,需要对主地层或夹层的分界进行重新分析和解释,通过反复迭代来不断完善解释结果。

3.2 空间插值

空间插值的基本原理是利用从综合解释中得到的测线处地层信息,补充测线间空白区域的地层分布情况,从而预测未勘察位置的各地层分界深度值^[32]。在地震图像上,地层分界可以被离散成一系列排列紧密的数据点。通过空间插值,由这些数据点可以生成连续且平滑的网格面,网格面上的节点被称为插值点。空间插值的原理如图3所示,其中插值点的位置用空间坐标 (x, y, z) 表示,数据点的位置由空间坐标 (x_i, y_i, z_i) 描述, i 的取值范围从 1 到 N , N 代表插值点周围属于同一地层分界的数据点总数。

从图3可以看出,数据点数量众多,沿测线方向上分布密集。为了高效处理这些数据,确保插值结果在空间上的连续性和平滑性,可以假设插值点的深度

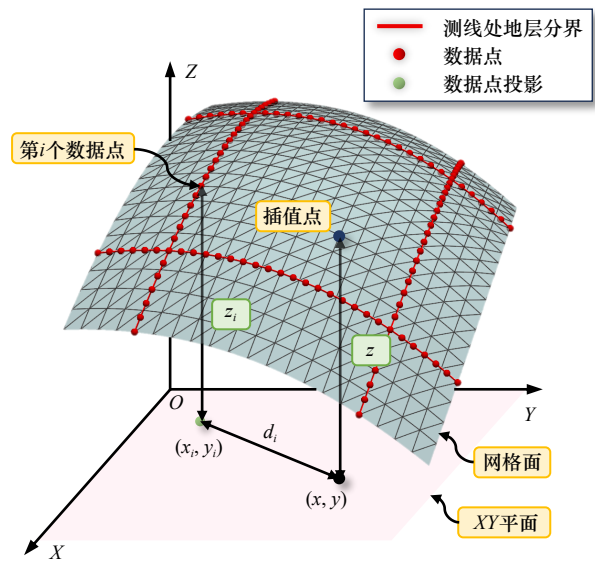


图3 空间插值原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spatial interpolation principles

值 z 是已知数据点深度值 z_i 的加权线性组合,如下式:

$$z = \sum_{i=1}^N \omega_i z_i, \quad (3)$$

式中: ω_i 表示第 i 个数据点的权重系数。

根据权重系数计算方式的不同,常用的空间插值方法包括反比距离加权法^[33]和普通克里金法^[34]。这两种方法具有原理清晰、操作简便和灵活性强的特点,在地理信息系统和地质统计学领域得到广泛应用。

3.2.1 反比距离加权法

反比距离加权法的核心思想是,距离插值点越近的数据点对插值点深度值的影响越大,相应的权重系数也越高。因此,这种方法中权重系数的计算仅与距离有关,如下式^[33]:

$$\omega_i = \frac{d_i^{-2}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-2}}, \quad (4)$$

$$d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}, \quad (5)$$

式中: d_i 为第 i 个数据点相对于插值点在 XY 平面上的距离,如图3所示。

3.2.2 普通克里金法

在普通克里金法中,地层的深度被视作一个随机变量场,其中点 (x, y) 处的深度值用随机变量 $Z(x, y)$ 表示。半变异函数 $\gamma(d)$ 可以用来描述两个点之间距离为 d 时深度值的空间相关性,其数学表达式为^[34]:

$$\gamma(d) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x, y, d) - Z(x, y)], \quad (6)$$

式中: $Z(x, y, d)$ 表示从点 (x, y) 沿任意方向移动距离 d 后深度值的随机变量。已知数据点的坐标 (x_i, y_i) 和

相应的深度值 z_i , 通过计算两点间不同距离 d 下深度差值的半方差, 可以拟合得到半变异函数 $\gamma(d)$ 的解析式^[34]。在此基础上, 各数据点的权重系数计算方法如下^[34]:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(d_{11}) & \gamma(d_{12}) & \cdots & \gamma(d_{1N}) & 1 \\ \gamma(d_{21}) & \gamma(d_{22}) & \cdots & \gamma(d_{2N}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma(d_{N1}) & \gamma(d_{N2}) & \cdots & \gamma(d_{NN}) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma(d_1) \\ \gamma(d_2) \\ \vdots \\ \gamma(d_N) \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: d_{ij} 为两个数据点 (x_i, y_i) 和 (x_j, y_j) 之间的距离, d_i 为插值点 (x, y) 和数据点 (x_i, y_i) 之间的距离, b 为拉格朗日乘子。

3.3 三维可视化

三维可视化^[35-37]通过借助海上勘察数据和空间插值结果, 创建海上风电场的三维地质模型, 将海底地形地貌和地层分布特征形象地展示出来。在三维地质模型的构建过程中, 模型可以被划分为两个部分, 即主地层和夹层。这两部分在空间形态上具有相似的特征, 都能用上表面、下表面和侧面构成的封闭边界曲面来表示。因此, 主地层和夹层的建模可以采用标准化的流程进行处理。

本文采用开源的 Python 库 PyVista^[38]进行三维地质模型的构建。图 4 展示了三维可视化的基本原理, 实现流程如下:

(1) 网格生成。对于主地层和夹层, 从所有测线的综合解释结果中提取对应的地层分界数据, 这些数据在 XY 平面上的投影能勾勒出主地层或夹层的平面轮廓。在平面轮廓内, 可以生成一系列六面体网格和楔形体网格, 网格的平面尺寸与插值点间距相匹配, 网格高度应略大于主地层或夹层的最大厚度。

(2) 边界引入。通过空间插值, 可以得到建模对象的上表面和下表面的插值点。应用 Delaunay 三角

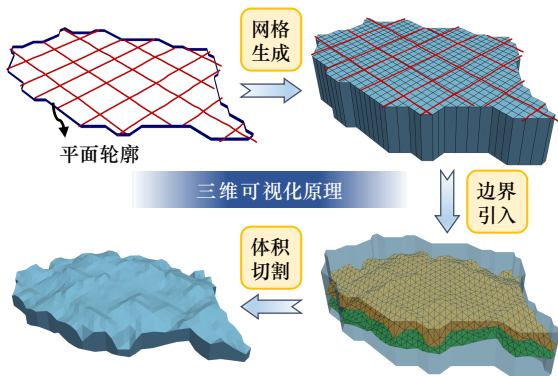


图 4 三维可视化原理

Fig. 4 The principle of 3D visualization

剖分算法, 这些插值点能被转化为上、下网格面。所生成的网格面能作为主地层或夹层的边界, 被引入到由六面体网格和楔形体网格组成的三维网格体系中。

(3) 体积切割。将上、下边界定义为切割面, 对三维网格体系执行体积切割操作, 分离出相应的主地层或夹层。随后, 提取所有主地层和夹层的边界曲面, 并按照实际的地层层序进行有序组装。通过这些步骤, 最终构建出完整的海上风电场三维地质模型。

4 海上风电场三维地质建模实例

本文以粤东某海上风电场为例, 按照图 2 所示的建模流程, 构建了该海上风电场的三维地质模型。

4.1 区域概况

该海上风电场位于南海北部大陆架、珠江口以东的海域, 覆盖面积达到 41 km², 风电场中心距离最近的海岸约 22 km, 具体位置如图 5 所示。该地区风能资源丰富, 冬季盛行东北风, 夏季盛行西南风。在第四纪地质时期, 受到海平面周期性变化和陆源沉积物堆积的影响, 该区域的海底地层形成了粉质黏土与粉质砂土互层的复杂地质结构^[39-40]。

该海上风电场共有 25 个风机机位, 总装机容量为 300 MW。每个风机机位附近布置有两个岩土勘察点, 两者相距 20~40 m。图 5 展示了岩土勘察点的分布情况, 包括 40 个钻孔和 10 个 CPT, 岩土勘察的深度范围从海床面开始向下延伸至 90 m 深度处。多波束测深数据和地震测线平面布置如图 5 所示, 其中多波束测深数据采用 1985 年国家高程基准面作为计算零点, 垂直向下为正方向。测深数据表明, 该区域水深大致 30~40 m, 海底地形从西北向东南方向倾斜,

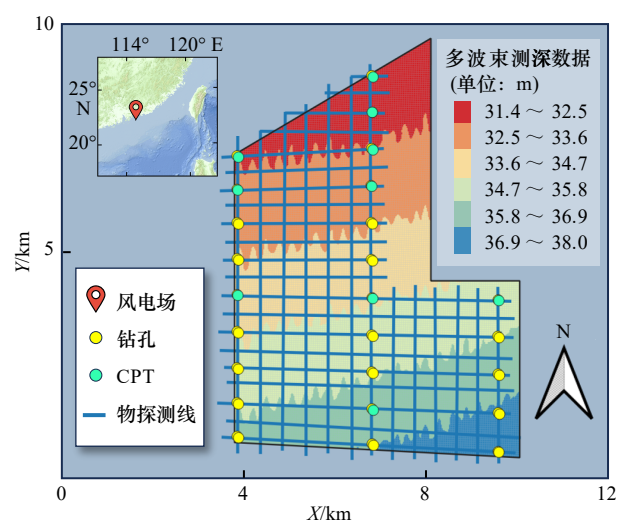


图 5 粤东某海上风电场的位置及其海上勘察数据

Fig. 5 The location and marine survey data of an offshore wind farm in eastern Guangdong

倾斜角约 0.04° 。地震测线总长约 170 km, 其中包括 13 条南北向测线(间距约 500 m)和 21 条东西向测线(间距约 300 m)。每条测线对应的地震图像双程旅行时范围为 0~300 ms。

4.2 综合解释结果与分析

该海上风电场项目主要关注海床面以下约 90 m 深度范围内的地层分布情况。表 1 列出了该海上风电场区域各土层的纵波速度。分析表明, 尽管该区域的地质特征表现为复杂的粉质黏土与粉质砂土互层现象, 但不同地层的纵波速度彼此相近, 变化幅度为 3% 左右。为了降低计算的复杂性, 地震图像在时深转化过程中采用恒定速度模型, 使得式 (1) 中的平均速度 v_{av} 沿深度方向上保持不变, 取值为 1 600 m/s。以测线 H09 地震图像为例, 海上勘察数据的综合解释结果如图 6a 所示。其中, 横坐标为地震图像上各测点相对于起始测点的偏移距离, 纵坐标表示以 1985 年国家高程基准面为零点计算的深度值。从图中可以观察到, CPT 中锥尖阻力较大的区域, 地震信号的振幅也相应较强, 两者之间存在显著的相关性, 这表明岩土勘察数据与地震图像在深度方向上匹配良好。因此, 在时深转换过程中, 将平均速度 v_{av} 设为恒定值 1 600 m/s 能够确保深度计算结果的准确性。

表 1 该海上风电场区域各土层的纵波速度
Table 1 The P-wave velocities of various soil layers in the offshore wind farm area

土层类型	淤泥质土	粉砂、砂土	粉土、黏土、粉质黏土
纵波速度/(m·s ⁻¹)	1 550	1 600	1 650

该海上风电场区域的海底地质结构被划分为 5 个主地层, 各地层的详细分析如下: (1) 地层 A、地层 B 和地层 C 分别对应淤泥质土、粉土和黏土, 这些地层的力学强度较低, 地震信号振幅也相对较弱。地震图像普遍呈现出近似水平的条纹分布, 表明这些地层在地质历史上具有相对稳定的沉积环境。其中, 地层 A 和地层 B 均属于全新世海相沉积层, 地层 C 为全新世海陆过渡相沉积层。(2) 地层 D 由粉质黏土和粉质砂土组成。粉质黏土强度中等, 粉质砂土较为密实。在地质历史上, 该地层的沉积环境发生显著变化, 从晚更新世海陆交互沉积向全新世海陆过渡相沉积转变, 导致沉积物表现出高度不均匀性。在地震数据中, 局部区域可以观察到水平和倾斜的条纹图像, 通过与岩土勘察数据进行比对分析, 能够识别出粉质黏土夹层和粉砂夹层。(3) 地层 E 的主要成分

为密实的砂土, 在局部区域夹杂有强度较高的粉质黏土, 其沉积环境为晚更新世海陆交互沉积。地震图像表现为一系列密集且不连续的高振幅反射波, 反映出该地层内部结构的复杂性。地层 E 的上部区域由粉质黏土与粉砂混合土构成, 下部区域则以砂土为主, 其中不均匀地分布着粉质黏土夹层。

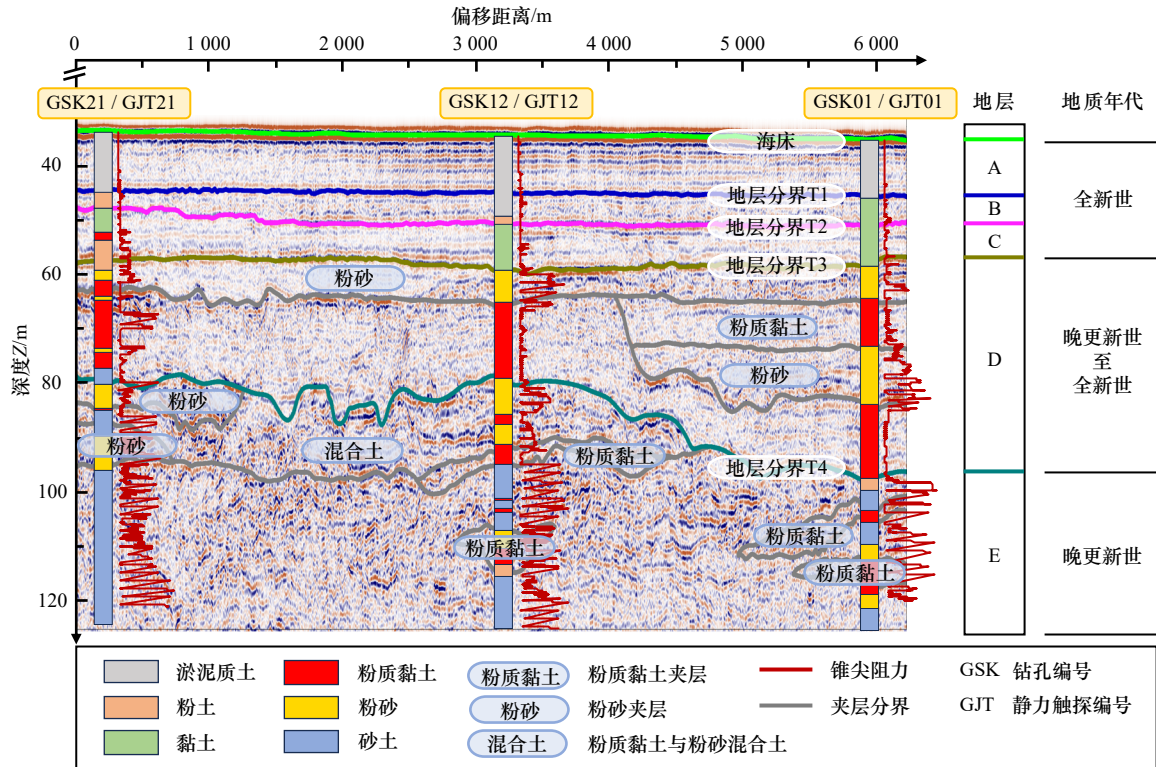
地震图像的综合解释结果汇总如图 6b 所示。通过地震解释工具, 可以从地震图像中提取各地层分界, 进而构建一个地层界面数据集, 如图 6c 所示。这一数据集为后续执行空间插值算法提供了必要的输入数据, 确保地层界面能够准确重建。

4.3 空间插值结果与比较

地层分界 T4 的地形起伏明显, 图 7 呈现了该地层分界在不同插值间距下使用反比距离加权法和普通克里金法的空间插值结果。当插值间距为 200 m 或 100 m 时, 两种插值算法生成的网格表面平滑, 但在落差较大的区域, 网格面与地层分界数据的贴合度较差。当插值间距减小至 50 m 或 25 m 时, 虽然两种算法的计算时间增加, 但网格面与地层分界数据的贴合度明显改善, 能更好地反映地层的细节特征。另一方面, 随着插值间距的减小, 反比距离加权法和普通克里金法在插值效果上的差异愈发显著。在反比距离加权法中, 测线位置上的地层细节得到充分展现, 而在测线间的空白区域, 网格表面则较为平缓, 插值结果趋向于周围数据点的平均值, 精度较低。相比之下, 普通克里金法在计算中考虑了深度值的空间变异性, 提供线性无偏估计并实现最小方差^[34], 从而能够更精确地捕捉测线间空白区域的地层起伏细节。然而, 由于普通克里金法在计算权重系数时涉及矩阵求逆运算, 计算复杂度增加, 导致其处理时间较反比距离加权法更长。

图 7 中, 未布置测线的区域在插值后出现阶梯状的网格表面, 这种现象在插值间距较小时尤为明显。这是因为未布置测线区域的插值结果主要受附近测线上数据点的影响, 当插值点从一条测线附近移动到另一条测线附近时, 由于邻近数据点的变化, 插值结果可能会产生突变, 导致阶梯状网格的出现, 此时插值精度较低。

在建立海上风电场三维地质模型时, 为平衡计算精度和效率, 本文采用普通克里金法进行空间插值, 插值间距设为 50 m。图 8 为该插值间距下使用普通克里金法对地层分界 T1~T4 进行空间插值的结果。图 8a 展示了各地层分界的空间分布形态, 其中“基准面”根据 1985 年国家高程基准面确定, 海床则基于多



a. 测线H09地震图像上钻孔数据、CPT数据和地震数据的综合解释

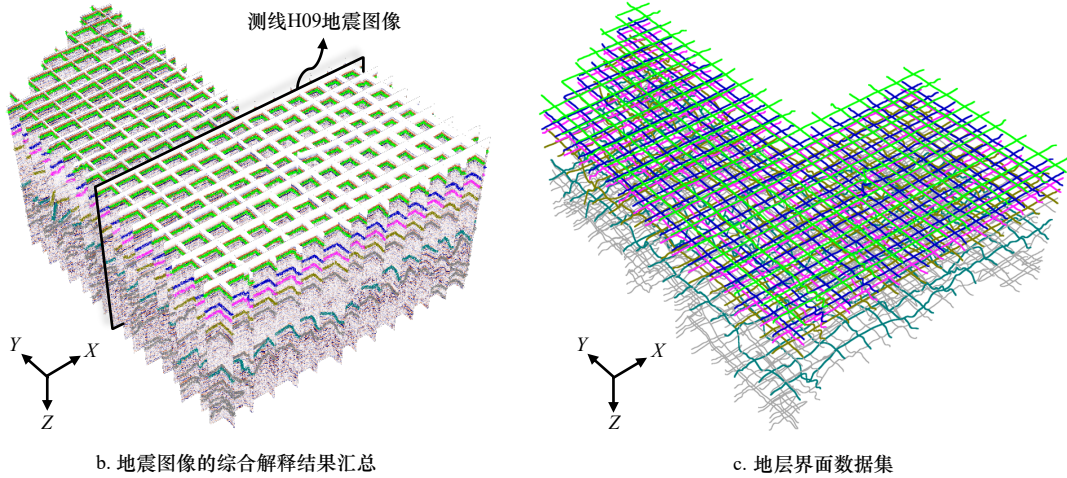


图6 海上勘察数据的综合解释结果

Fig. 6 Integrated interpretation results of marine survey data

波束测深数据进行建模。在图 8b 和图 8c 中, 地层分界 T1 和 T2 的地形变化与海床的倾斜特征相似, 呈现出从东南向西北逐渐升高的趋势。在地层分界 T3 的北部区域, 可以观察到一条东西走向的凹陷带, 宽度介于 800 m 至 1 000 m 之间, 最大凹陷深度约 15 m, 如图 8d 所示。该凹陷带的边缘陡峭, 底部狭窄, 剖面呈漏斗状, 内部主要填充黏土沉积物。在地层分界 T4 中, 存在一条东北-西南走向的广阔凹陷区, 宽度有 2000~3 000 m, 最大凹陷深度在 20 m 上下, 如图 8e 所示。该凹陷区的边缘较为平缓, 底部宽阔, 主要沉

积物为粉质黏土、粉砂等粉质土。地层分界 T3 和 T4 中的凹陷构造可能由水流冲刷作用形成, 表明这些区域在地质历史上可能存在古河道, 为该地区古水文地质条件的研究提供了重要线索。

4.4 三维地质模型的可视化结果与验证

粤东某海上风电场的三维地质模型如图 9 所示。图 9a 为该海上风电场的主地层三维地质模型。在稳定的沉积环境下, 地层 A 和地层 B 展现出较为均匀的厚度分布。在地层 C 的北部地区, 由于受到下伏地层中凹陷构造的影响, 导致了较厚的黏土沉积物累

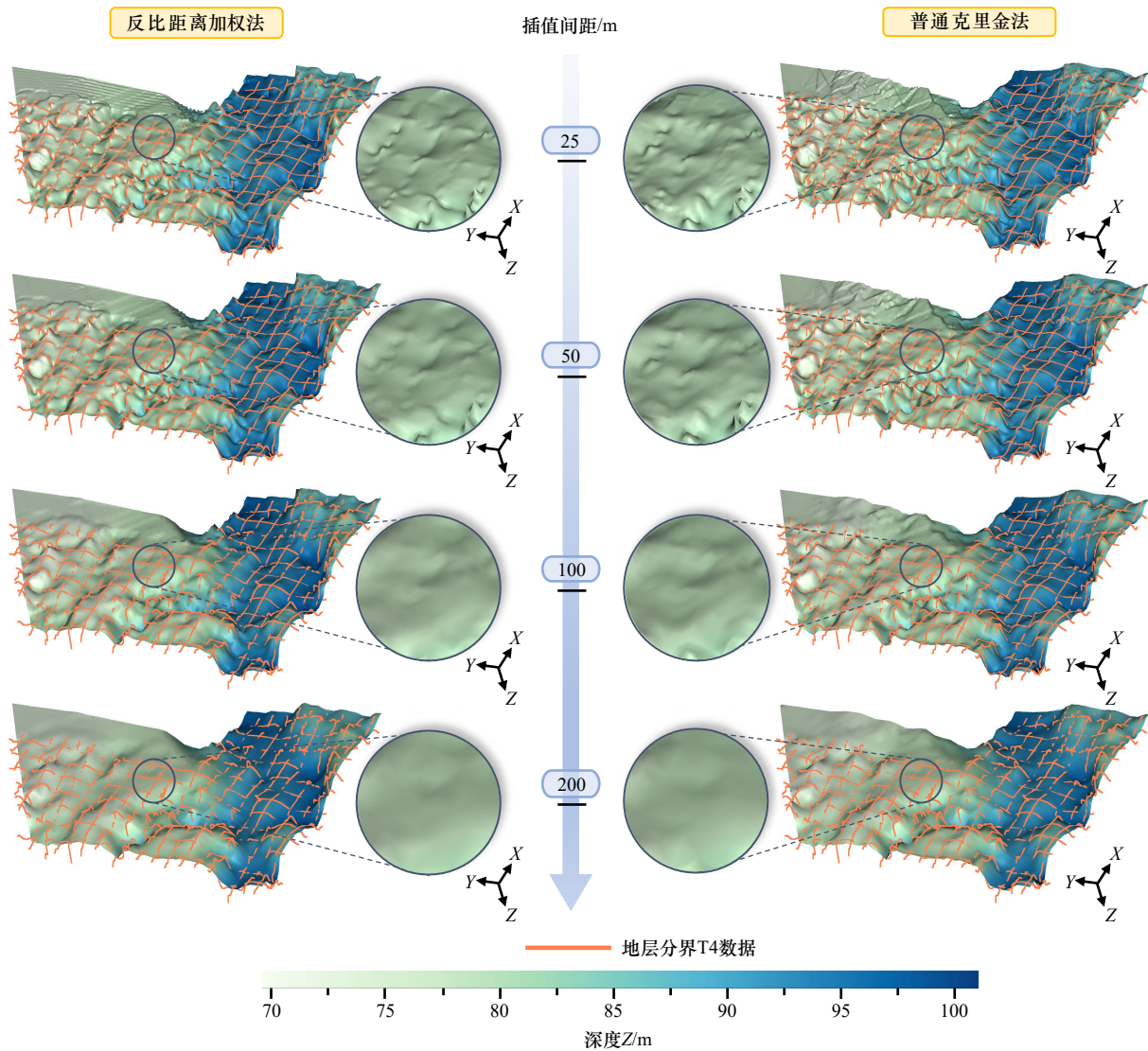


图7 不同插值间距下反比距离加权法和普通克里金法的空间插值结果比较(以地层分界 T4 为例)

Fig. 7 Comparison of spatial interpolation results between inverse distance weighting method and ordinary Kriging method under different interpolation spacings (taking the layer interface T4 as an example)

积。地层 D 的内部可以观察到粉质黏土夹层和粉砂夹层, 这些夹层的形态特征及其分布情况如图 9b 所示。图 9c 揭示了地层 E 复杂的内部结构, 其中上部区域与下部区域的地质特征具有显著差异。在上部区域, 粉质黏土夹层、粉砂夹层和混合土夹层紧密交叠, 形成了复杂的互层结构。而下部区域以砂土为主, 中间分布着近似椭圆形的粉质黏土透镜体。这些透镜体的平面尺寸可达数千米, 厚度在 3 m 至 6 m 之间。由于大多数透镜体的规模超出了本次建模的范围, 其完整形态未能在三维地质模型中得到展现。

为确保该海上风电场三维地质模型的可靠性, 基于地质规律分析和静态数据分析^[18], 对模型进行质量评估。地质规律分析用于验证三维地质模型表达的沉积构造是否与该地区的地质历史条件相符合。分

析表明, 该模型的地层沉积特征与中国南海北部不同地质历史时期的海平面变化情况^[41]能够对应。在晚更新世, 海平面的波动导致该地区沉积环境在陆地和海洋之间不断转换, 在相应的地层 E 中形成了粗粒土中夹杂细粒土的沉积特征。晚更新世至全新世期间, 海平面持续上升, 该地区可能处于滨海或浅海环境, 使得相应的地层 D 由成分多样、空间分布不均匀的粉质土组成。自全新世以来, 海平面趋于稳定, 该地区保持在浅海环境, 相应的地层 A、B 和 C 为相对均质的细粒土。静态数据分析是将三维地质模型中的土体分层情况与源头数据进行比较。图 9d 展现了从三维地质模型中提取的 8 个模型钻孔与相应实际钻孔之间的对比结果。可以发现, 模型钻孔中的土体分层情况总体上与实际钻孔一致。然而, 在某些土体分

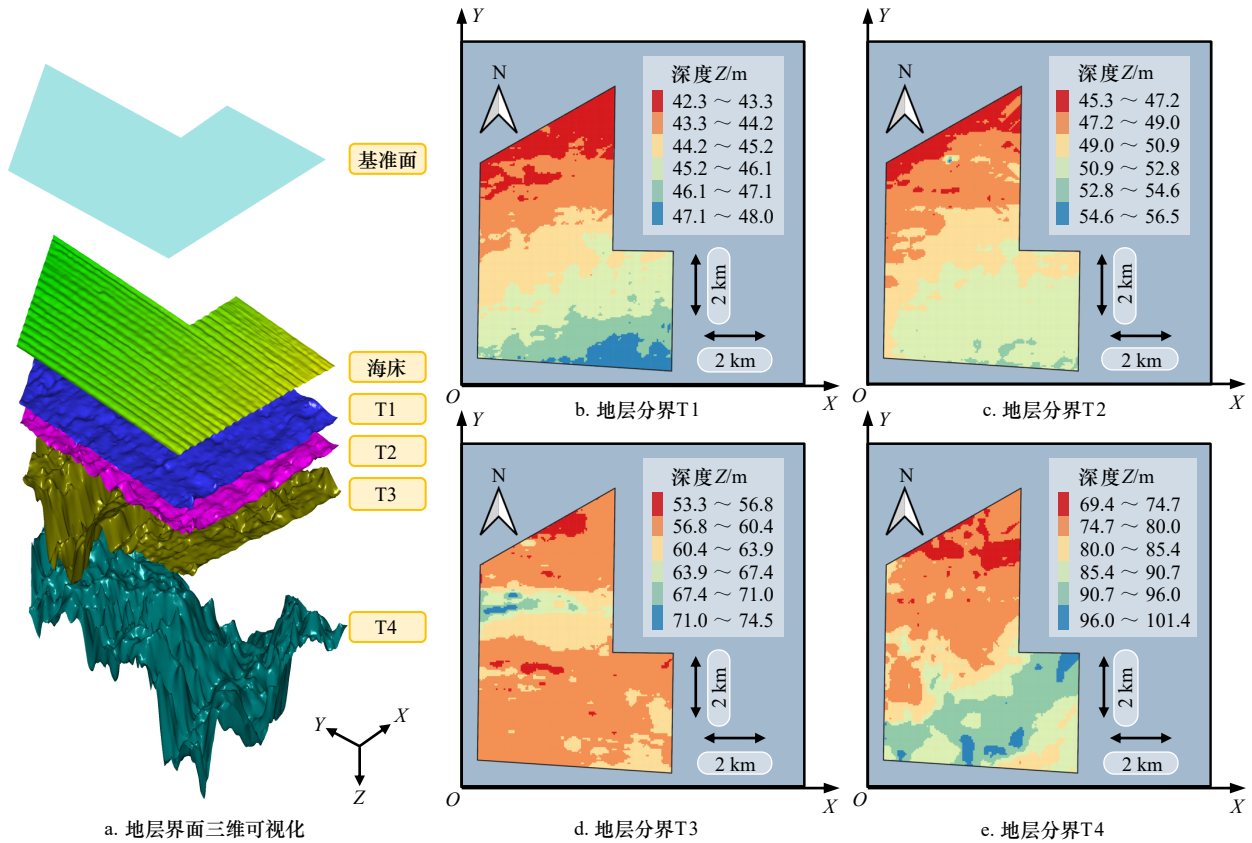


图 8 使用普通克里金法的空间插值结果

Fig. 8 Spatial interpolation results using ordinary Kriging method

界面的对应上仍存在显著偏差,主要有如下两个原因:(1)在海上勘察数据的综合解释过程中,根据CPT数据和地震数据提供的信息,对钻孔数据进行了修正处理,确保岩土勘察数据与工程物探数据在解释结果上具有良好的一致性;(2)模型精度受到插值间距和插值方法的影响,存在一定误差。

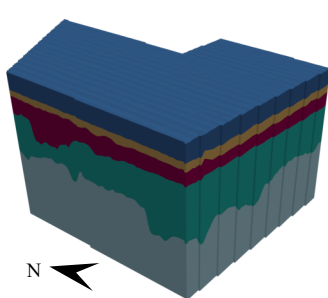
因此,所构建的三维地质模型能够准确反映该海上风电场区域复杂的地质特征,展示了本文所提出的地质建模方法在有效性和可靠性方面的优势。该三维地质模型不仅能成为深化理解场地地质条件的重

要工具,还能为海上风电场的长期运营维护以及最终退役阶段提供坚实的地质信息支持。

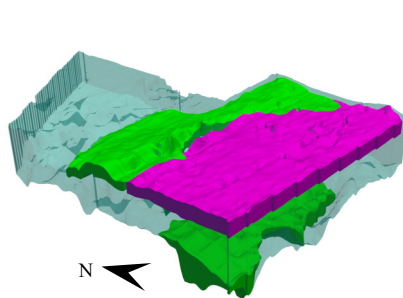
5 结论

(1) 三维地质模型将海上勘察数据进行直观的可视化展示,为海上风电场的勘察、设计、安装、运维乃至退役等全生命周期管理提供有力的支持。通过不断整合新的勘察数据,三维地质模型将持续得到更新和优化。

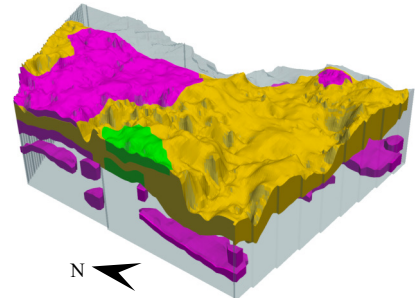
(2) 在海上风电场的三维地质模型构建过程中,



a. 地层A-E



b. 地层D夹层细节



c. 地层E夹层细节

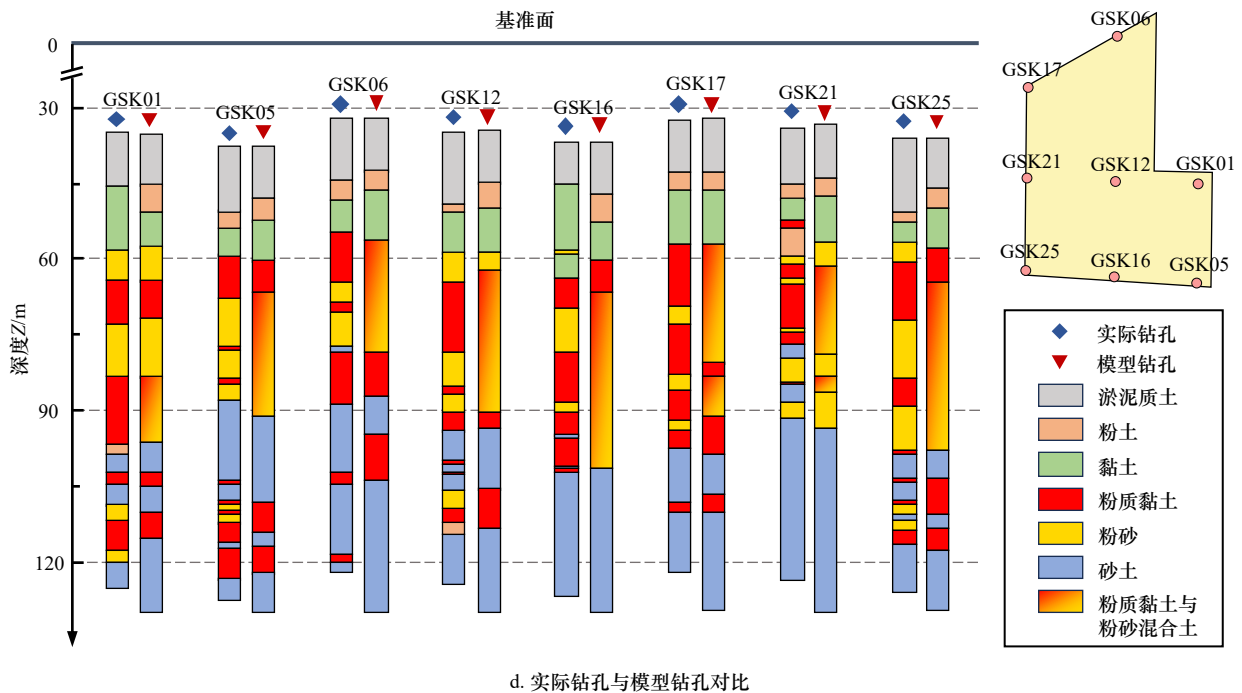


图 9 海上风电场三维地质模型与验证

Fig. 9 3D geological models and validation for the offshore wind farm

岩土勘察数据能提供土层类型和土的物理力学参数等信息, 工程物探数据有助于揭示海底地形、地质构造、地层分布以及沉积环境等地质特征, 这两种数据类型相互结合, 能提高地质模型的准确性。

(3) 三维地质建模方法包括海上勘察数据的综合解释、空间插值和三维可视化。综合解释确定了地震图像中的地层分界和土体类型, 空间插值有效填补了测线间空白区域的地层分界, 三维可视化能直观地呈现海底地形和地层分布等地质特征。

(4) 当插值间距在 50 m 以下时, 由插值算法生成的网格面能较好地贴合地层分界数据。普通克里金法在计算效率上不及反比距离加权法, 但其能够精准地捕捉测线间空白区域的地层起伏细节, 从而提供精度更高的插值结果。

(5) 粤东某海上风电场的三维地质模型包含 5 个主地层, 并精细地呈现了夹层的形态特征及其分布情况, 能够准确地捕捉海上风电场所在区域复杂的地质条件, 验证了所采用地质建模方法的有效性和可靠性。

参考文献:

- [1] Global Wind Energy Council. Global offshore wind report 2024[R]. Belgium: Global Wind Energy Council, 2024.
- [2] Houlding S W. 3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterization[M]. Heidelberg: Springer, 1994.
- [3] Rey-Moral C, Motis K, Fernández-Viejo G, et al. A 3D geological model for a potential CO₂ reservoir in the El Bierzo Basin (Carboniferous, NW Spain)[J]. *Near Surface Geophysics*, 2020, 18(2): 189–201.
- [4] Ramajo J, Orellana-Macías J M, Galé C, et al. A 3D geological model of the Gallocanta Basin (Spain). The basis to update the hydrogeological model[J]. *Earth Science Informatics*, 2023, 16(2): 1797–1809.
- [5] 周邓, 曾广亮, 王洪荣, 等. 江西桃山罗布利南部地区三维地质建模与成矿预测[J]. *地质通报*, 2022, 41(12): 2256–2264. Zhou Deng, Zeng Guangliang, Wang Hongrong, et al. Three dimensional geological modeling and metallogenic prediction in the south of Luobuli, Taoshan, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2256–2264.
- [6] Dou Fanfan, Li Xiaohui, Xing Huaixue, et al. 3D geological suitability evaluation for urban underground space development: a case study of Qianjiang Newtown in Hangzhou, Eastern China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 115: 104052.
- [7] 张永旺, 庞世龙, 花卫华, 等. 基于地层尖灭的三维地质建模方法——以广西北海市为例[J/OL]. *地质通报*, (2024-03-25)[2024-07-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20240322.1859.006.html>. Zhang Yongwang, Pang Shilong, Hua Weihua, et al. Three-dimensional geological modelling method based on strata pinch-out: a case study of Beihai in Guangxi[J/OL]. *Geological Bulletin of China*, (2024-03-25)[2024-07-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20240322.1859.006.html>.
- [8] Liu Baoshun, Liu Yingnan, Zhang Zijing. Prediction of heavy metal pollution in soil based on SSA-XGBoost model and 3D geological

- model[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2024, 33(8): 1421–1439.
- [9] 张立安,李超,张岚,等.渤海湾盆地黄河口凹陷A油田火成岩发育区储层特征及三维地质建模[J].*海洋地质前沿*, 2023, 39(1): 31–39.
Zhang Li'an, Li Chao, Zhang Lan, et al. Reservoir characteristics and 3D geological modeling of igneous rock area in Huanghekou Sag A Oilfield, Bohai Bay Basin[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(1): 31–39.
- [10] Falsetta E, Bullejos M, Critelli S, et al. 3D modeling of the stratigraphic and structural architecture of the Croton basin (southern Italy) using machine learning with Python[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 164: 106825.
- [11] 徐加宝,张泽超,张璐璐,等.基于贝叶斯理论和条件协同模拟的海上风电场土体参数空间变异性表征[J].*岩土工程学报*, 2024, 46(8): 1644–1654.
Xu Jiabao, Zhang Zechao, Zhang Lulu, et al. Spatial variability characterization of soil properties in offshore wind farms based on Bayesian theory and conditional co-simulation method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(8): 1644–1654.
- [12] Vardy M E. Deriving shallow-water sediment properties using post-stack acoustic impedance inversion[J]. *Near Surface Geophysics*, 2015, 13(2): 143–154.
- [13] Putri S A, Panggeleng I, Nauw M, et al. Unlocking the shallow overburden understanding of Ubadari Gas Field in Indonesia using high-resolution shallow datasets[C]//Offshore Site Investigation Geotechnics 9th International Conference Proceeding. London: Society for Underwater Technology, 2023: 2129–2136.
- [14] Eady H, Bloore C, Gerritsma D. IJmuiden Ver Windfarm Zone: increasing the resolution of the southern North Sea stratigraphy using iterative ground modelling techniques[C]//Offshore Site Investigation Geotechnics 9th International Conference Proceeding. London: Society for Underwater Technology, 2023: 2072–2079.
- [15] Arlott L, James L, Christopher N, et al. The sand hole formation-winding back the clock to support ground modelling at Triton Knoll Offshore Wind Farm[C]//Offshore Site Investigation Geotechnics 9th International Conference Proceeding. London: Society for Underwater Technology, 2023: 827–835.
- [16] Sauvin G, Vanneste M, Vardy M, et al. Integration of geoscience data-the TNW Offshore Wind Farm case study[C]//Offshore Technology Conference Proceeding. Houston: Offshore Technology Conference, 2024: OTC-35476-MS.
- [17] 吴志春,郭福生,张万良,等.江西乐安相山火山盆地多源数据融合三维地质建模[J].*桂林理工大学学报*, 2020, 40(2): 310–322.
Wu Zhichun, Guo Fusheng, Zhang Wanliang, et al. 3D geological modeling based on multi-source data merging of Xiangshan volcanic basin in Le'an of Jiangxi[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2020, 40(2): 310–322.
- [18] 雷传扬,刘兆鑫,文辉,等.基于多源数据和先验知识约束的复杂地质体三维建模研究[J].*地质论评*, 2022, 68(4): 1393–1411.
Lei Chuanyang, Liu Zhaoxin, Wen Hui, et al. Research on 3D geological modeling of complex geological body based on multi-source data and prior geological knowledge[J]. *Geological Review*, 2022, 68(4): 1393–1411.
- [19] 薛涛,包训栓,朱小弟,等.多源数据三维地质结构模型约束的属性建模方法:以北京市通州城市副中心为例[J].*地学前缘*, 2023, 30(3): 529–536.
Xue Tao, Bao Xunshuan, Zhu Xiaodi, et al. Attribute modeling constrained by multi-source data-based 3D geological structural model: a case study in Tongzhou District, Beijing[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(3): 529–536.
- [20] 盛世强,戴黎明,李法坤,等.基于GOCAD软件的渤中凹陷428构造带三维地质建模[J].*海洋地质前沿*, 2023, 39(3): 91–100.
Sheng Shiqiang, Dai Liming, Li Fakun, et al. 3D geological modeling of the 428 Tectonic Zone in Bozhong Depression using GOCAD software[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(3): 91–100.
- [21] Imam T S, Abdel-Fattah M I, Tsuji T, et al. Mapping the geological structures in the Ras El Ush field (Gulf of Suez, Egypt), based on seismic interpretation and 3D modeling techniques[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2022, 193: 104596.
- [22] 罗辉,蒋实,赵宏刚,等.三维地质建模在高放废物地质处置预选地段筛选中的应用——以新疆预选区天湖预选地段为例[J].*物探与化探*, 2021, 45(6): 1488–1496.
Luo Hui, Jiang Shi, Zhao Honggang, et al. Application of 3D geological modeling in screening of sites preselected for geological disposal of high-level radioactive wastes: a case study of Tianhu preselected site, Xinjiang[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(6): 1488–1496.
- [23] 江汝锋,张迎朝,杨希冰,等.空间地质建模技术在宝岛凹陷深水成藏研究中的应用[J].*海洋学报*, 2018, 40(3): 74–85.
Jiang Rufeng, Zhang Yingchao, Yang Xibing, et al. Application of spacial geologic modeling in deepwater accumulation in the Baodao Sag[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(3): 74–85.
- [24] 花卫华,曾新灵,郭丹阳,等.基于构造恢复理论的含复杂断层三维地质建模方法[J].*地球科学*, 2024, 49(4): 1411–1420.
Hua Weihua, Zeng Xinling, Guo Danyang, et al. 3D geological modeling method based on Tectonic Restoration theory[J]. *Earth Science*, 2024, 49(4): 1411–1420.
- [25] Olierook H K O, Scalzo R, Kohn D, et al. Bayesian geological and geophysical data fusion for the construction and uncertainty quantification of 3D geological models[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(1): 479–493.
- [26] Jia Ran, Lv Yikai, Wang Gongwen, et al. A stacking methodology of machine learning for 3D geological modeling with geological-geophysical datasets, Laochang Sn camp, Gejiu (China)[J]. *Computers & Geosciences*, 2021, 151: 104754.
- [27] Robertson P K. Soil classification using the cone penetration test[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27(1): 151–158.

- [28] 陈亮, 徐春喆, 郭鹏, 等. 基于 CPTU 解释黏性土不排水抗剪强度方法研究[J]. 海洋工程, 2024, 42(1): 147–157.
Chen Liang, Xu Chunzhe, Guo Peng, et al. Estimation of the undrained shear strength of cohesive soil using CPTU interpretation[J]. The Ocean Engineering, 2024, 42(1): 147–157.
- [29] O'Neill M P, Osuchowski A L, Cai Yongmin, et al. Integrated and data Science-informed seabed characterisation for optimised foundation design[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 284: 115095.
- [30] 牛海峰, 李向辉, 梁峰, 等. 面向海上风电开发建设的工程地质模型及应用研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(4): 57–70.
Niu Haifeng, Li Xianghui, Liang Feng, et al. Research on the engineering geological model and its application for offshore wind power development and construction[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(4): 57–70.
- [31] 赵斌, 张宝金, 张如伟, 等. 基于二维地震数据的宏观三维速度建模——以南海西北部海域为例[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(7): 18–24.
Zhao Bin, Zhang Baojin, Zhang Ruwei, et al. Macroscopic 3D velocity modeling with 2D seismic data: taking the northwestern South China Sea as a case[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(7): 18–24.
- [32] 廖舟, 李梅. 基于开源 GemPy 的城市地下空间三维隐式势场建模方法研究[J]. 地学前缘, 2024, 31(3): 482–497.
Liao Zhou, Li Mei. Research on the 3D implicit potential field modeling method for urban underground space based on the open-source GemPy[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(3): 482–497.
- [33] De Mesnard L. Pollution models and inverse distance weighting: some critical remarks[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 459–469.
- [34] Olea R A. Geostatistics for Engineers and Earth Scientists[M]. New York: Springer, 1999.
- [35] 姜逢宇, 黄牧, 熊自明, 等. 基于平面网格求交算法的三维地质模型界面重构方法[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1724–1732.
Jiang Fengyu, Huang Mu, Xiong Ziming, et al. Method of boundary reconstruction of 3D geological model based on the algorithm for intersection of planar meshes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(6): 1724–1732.
- [36] 牛露佳, 石成岳, 王占刚, 等. 三维复杂地质结构模型的 InterfaceGrid 表达方法[J]. 地学前缘, 2024, 31(4): 129–138.
Niu Lujia, Shi Chengyue, Wang Zhangang, et al. InterfaceGrid: gridding representation of 3D geological models for complex geological structures[J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(4): 129–138.
- [37] 孙记红, 魏合龙, 刘展, 等. 海洋地质三维可视化数据模型的设计方法[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(3): 56–61.
Sun Jihong, Wei Helong, Liu Zhan, et al. Design of 3-dimensional visualization data model for marine geology[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(3): 56–61.
- [38] Bane Sullivan C, Kaszynski A A. PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the Visualization Toolkit (VTK)[J]. *Journal of Open Source Software*, 2019, 4(37): 1450.
- [39] Ge Jiawang, Zhao Xiaoming, Tan Mingxuan, et al. Sequence stratigraphy and depositional evolution of the north-eastern shelf (33.9–10.5 Ma) of the Pearl River Mouth basin, South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 141: 105697.
- [40] 黎鹏飞, 毕乾, 张友虎, 等. 粤东海域粉质土的循环加载特性研究[J]. 海洋通报, 2024, 43(4): 497–509.
Li Pengfei, Bi Qian, Zhang Youhu, et al. Study on cyclic loading characteristics of silty soils offshore eastern Guangdong[J]. Marine Science Bulletin, 2024, 43(4): 497–509.
- [41] 吴自银, 温珍河, 付军, 等. 中国近海海洋地质[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Wu Ziyin, Wen Zhenhe, Fu Jun, et al. Marine Geology of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2021.

3D geological modelling method of offshore wind farms based on multi-source data fusion

Wang Deyuan¹, Peng Xiuzhong², Du Yuchen¹, Gao Yaoxiang², Zhang Youhu²

(1. China Nuclear Power Design Co., Ltd. (Shenzhen), Shenzhen 518000, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Three-dimensional (3D) geological models enable the intuitive representation of seabed geological conditions through using marine survey data, which actively promotes the development and construction of offshore wind farms. To enhance the accuracy and modelling efficiency of 3D geological models for offshore wind farms, a geological modelling method is proposed based on multi-source data fusion. This method conducts an integrated interpretation of geotechnical investigation data and engineering geophysical data, employs spatial interpolation al-

gorithms to generate continuous and smooth layer interfaces, and utilizes Python open-source libraries to construct and visualize the 3D geological models. Furthermore, taking an offshore wind farm in eastern Guangdong as an example, the reliability of the geological modelling method is validated. The results demonstrate that the method achieves the effective integration of geotechnical and geophysical data, and the constructed 3D geological model could reflect the complex geological characteristics of the offshore wind farm. The proposed 3D geological modelling method is applicable to a diverse range of engineering geological conditions, providing solid technical support for the full lifecycle management of offshore wind farms, from exploration, design, installation, operation and maintenance to decommissioning.

Key words: offshore wind farm; multi-source data; geotechnical investigation; engineering geophysical exploration; spatial interpolation; 3D geological model