doi: 10.11720/wtyht.2026.2354
王晓明,刘博,赵彧,等. 基于 em3d 的复杂地电模型瞬变电磁三维正演及响应规律分析[J]. 物探与化探,2026,50(1):86-98. http://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2354
Wang X M, Liu B, Zhao Y, et al. 3D TEM forward modeling of complex geoelectric model based on em3d software[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 86-98. http://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2354

基于 em3d 的复杂地电模型瞬变电磁三维正演及响应规律分析

王晓明[1],刘博[2,3],赵彧[1],刘东[2,3],柳尚斌[2,3],杨光[1],胡杉杉[2,3],周永兴[1],孙怀凤[2,3]
(1. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 3. 山东大学 地球电磁探测研究所, 山东 济南 250061)

摘 要: 瞬变电磁三维正演是研究不同场景和目标响应规律的有效手段,正演研究的关键问题之一是模型与实际地质情况接近。本文基于 em3d 软件对复杂地形模型和复杂岩溶地质模型进行建模和三维正演分析,研究了复杂地电模型下的瞬变电磁响应规律。通过对复杂地形模型进行三维正演模拟,发现复杂地形导致瞬变电磁响应发生畸变,如果不考虑地形影响,则会导致假异常。通过对复杂岩溶地质模型进行三维正演模拟,发现起伏的地层、复杂岩溶异常体边界均导致瞬变电磁响应发生畸变,对异常体识别造成较大干扰。通过对两个复杂地电模型的瞬变电磁响应分析可得,垂直感应电动势 dB_z/dt 对低电阻率异常体有良好的反映,平行于源的电场 E_y 能够很好地刻画低电阻率异常体的边界,垂直于源的电场 E_x 在异常体内部呈现正值,负值与正值相伴存在于异常体外部。

关键词: 瞬变电磁; 起伏地形; 复杂模型; 正演模拟; BEDS-FDTD; em3d
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)01-0086-13

0 引言

瞬变电磁(transient electromagnetic, TEM)是一种常用电磁勘探方法,已经在金属矿勘探[1-2]、煤矿采空区探测[3]、水文地质监测[4]、城市管道探测[5]以及岩溶隧道探测[6-7]等领域得到了广泛的应用。正演模拟是研究瞬变电磁响应规律的重要手段和反演的基础[8-10]。随着科技的不断发展,软件和计算机硬件的快速升级,瞬变电磁正演研究也由一维发展到三维,由简单到复杂,由粗糙到精细不断进步[11]。模型是研究正演响应的关键,接近真实的正演模型可以提供准确的地下结构的电磁响应[12],通过模拟不同地质结构的电磁场响应,可以为实际的勘探工作提供一定指导[13],更好地服务于实际工程。

关于正演模型中贴近真实模型的模拟研究,前人已经进行大量的关于地形方面的研究。电磁地形效应首先在 1969 年 Whittles 在山区采集的 VLF 数据中被注意到。1992 年,Liu 等[14]评估了在一些简单的情况下使用传统的 HEM 系统所观察到的地形效应。1995 年,Newman[15]基于交错网格有限差分方法模拟了简单倾斜模型的 HEM 响应。1998 年,Chen 等[16]基于有限差分方法模拟了大地电磁测深法在山峰和山脊地形的地形效应。2003 年,Sasaki 等[17]采用交错网格有限差分方法模拟了频率域航空电磁简单倾斜地形的正演响应。2015 年,Commer 等[18]基于改进的有限差分方法研究了水平起伏储气层模型的三维瞬变电磁响应。2006 年,肖怀宇[19]使用有限差分方法对简单的地堑、地垒地形模型进行了三维正演模拟。2007 年,强建科等[20]基于有限元法进行了直流电阻率法山脊、山谷地形模

收稿日期: 2024-08-22; **修回日期**: 2024-12-23
基金项目: 广西重点研发项目(桂科 AB22080010);泰山学者工程资助项目
第一作者: 王晓明(1987-),男,高级工程师,长期长事隧道工程施工工作。
通讯作者: 孙怀凤(1982-),男,教授,博士生导师,长期从事电磁地球物理算法与工程软件开发工作。Email: sunhuaifeng@email.sdu.edu.cn

型的三维模拟。2013 年,邱稚鹏等[21]采用非正交时间域有限差分方法进行了高斯地形模型的正演模拟。2015 年,王卫平等[22]基于交错网格有限差分法对频率域航空电磁起伏地形模型进行了三维正演模拟。2015 年,韩波等[23]实现了复杂场源形态的海洋 CSEM 三维有限差分/有限体积法正演模拟,并通过三维理论模型分析了场源形态对正演响应的影响。2016 年,嵇艳鞠等[24]基于无网格法进行了 2D 地堑、地垒地形模型的大地电磁模拟。2016 年,张博等[25]基于矢量有限元法使用非结构网格模拟了山峰、山谷地形模型的三维航空电磁响应。2017 年,赵越等[26]基于时间域有限差分法对山峰、山谷等典型地形模型进行了航空瞬变电磁三维正演模拟。2018 年,Li 等[27]提出了一种复杂场源的有限元时间域电磁求解器,结合加拿大拉布拉多省沃西湾硫化物矿床的实际地形模拟了起伏地表条件下磁性源地面瞬变电磁响应。2022 年,周峰等[28]推导了在复杂场源及各向异性条件下三维可控源电磁法所满足的控制微分方程,并对不同形态场源及起伏地形的电磁场响应进行了有限元正演模拟。2022 年,齐彦福等[29]基于非结构时间域有限元法模拟了大量典型起伏地表模型的三维电磁响应并分析了起伏地形对短偏移距瞬变电磁观测响应的影响规律。2022 年,王新宇[30]基于非结构矢量有限元方法模拟了起伏地表模型的三维正演响应特征。2023 年,周钟航等[31]基于有限元法采用四面体网格分析了山峰的地形效应并对多个地形模型进行三维正演模拟。2024 年,屈少波等[13]基于矢量有限元法使用非结构网格结合山西榆树坡煤矿实测地形对地形效应进行了分析。国内外的专家大多聚焦于地形效应的分析,大量分析了山峰、山谷等简单起伏地形的响应研究,少数通过非结构网格与实际地形结合对地形效应分析。Newman,Chen,王卫平,嵇艳鞠,张博,赵越等通过数值模拟研究,得到了地形变化对频率域电磁响应有较大影响,频率越高或时间道越早,电磁响应受地形影响越大的结论。邱志鹏,肖怀宇,Li,齐彦福,王新宇,屈少波,周钟航等通过数值模拟研究发现无论是磁性源还是电性源系统,地形对瞬变电磁法勘探的影响均较大,尤其是早期信号。通过前人研究可以得知,无论频域电磁法还是时域电磁法,地形对正演响应均有较大影响,在进行正演模拟与反演的过程中需要进行考虑。研究中的异常体模型大多为形状规则的几何体模型,地层多为均匀半空间或水平地层。对于采用有限差分方法对瞬变电磁正演模拟开展的研究中,由于该类方法缺少复杂模型的建模手段[32-33],大多对高斯地形、山峰、山谷等简单地形进行了相关研究,而对实际地形、地层起伏与异常体复杂等更接近实际地层的复杂地电模型的相关研究较少。

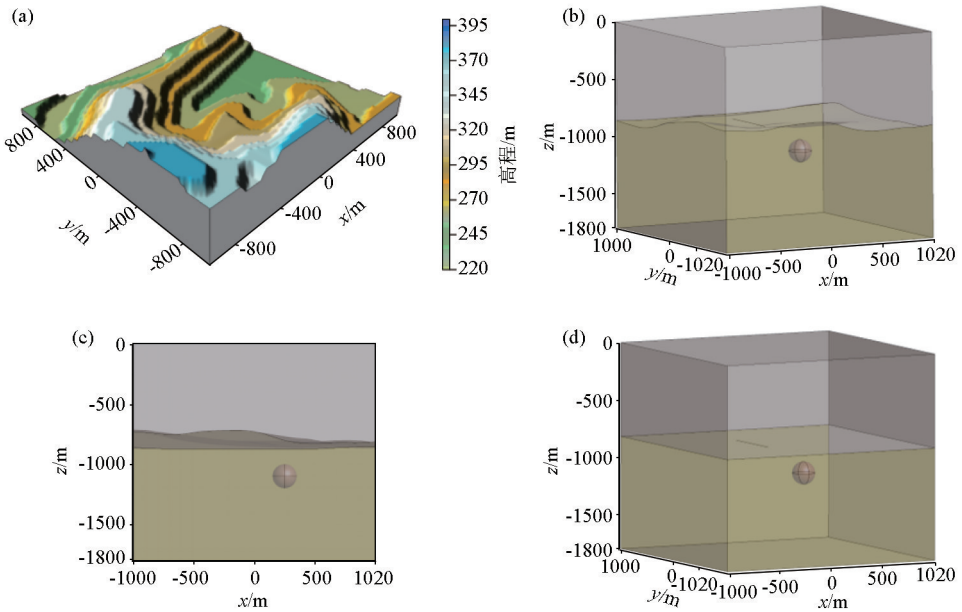
本文采用课题组开发的 em3d 软件[34],基于实际地形数据,分别建立了复杂地形模型和地层起伏复杂异常体岩溶模型,分析两者的正演响应规律,并对复杂岩溶模型的正演响应进行可视化展示。

1　正演建模软件

em3d[34]是由山东大学开发的电磁地球物理三维可视化正演软件。其具有强大的前处理功能,支持交互,可导入常见 CAD/CAE 软件模型,支持均匀、非均匀网格剖分,具有独创的线单元识别,实现发射线圈灵活建模和剖分,还可以实现回线源、接地源布设,支持航空、半航空、地面、隧道、地井等多场景装置。在计算方面,em3d 支持本地计算和远程计算,计算程序正演算法来自柳尚斌[8]在 2022 年提出的 backward euler direct splitting FDTD (BEDS-FDTD)算法,该算法使用 BE 差分格式离散 Maxwell 方程,并将 direct splitting 策略引入 BE-FDTD 方程中提升求解速度,而且该算法在非均匀时间步长下是无条件稳定的。在计算效率方面,无需长时间等待,该软件可以实现秒级、分钟级三维正演、同时支持瞬变电磁的激电效应三维正演,计算精度高。此外,该软件还具有多功能后处理展示功能,可实现全空间扩散动画以及批量多测道图的显示等,本文中模型、剖分、电磁响应等图件均由 em3d 软件生成。

2　三维复杂地形模型正演响应分析

为研究复杂地形对电性源瞬变电磁响应的影响,基于陕西某矿区真实地形数据(如图 1a 所示),采用 em3d 软件建立了如图 1b 所示的起伏地形异常体模型。起伏地形数据如图 1a 所示,区域内最大高度差为 280 m。同时设置相同尺寸起伏地形半空间模型与均匀半空间异常体模型(图 1d)作为对比,均匀半空间含异常体模型地层表面距地形最高处为 140 m。3 个模型在笛卡尔坐标系 3 个方向尺寸为 2 020 m×2 020 m×1 800 m,主要包含空气层与地层两部分,取地层距离边界的 200 m 作为 PML 吸收边界。空气层与地层完全耦合,空气电阻率为 10^6 Ω · m,地层为均匀地层,电阻率为 100 Ω · m。发射源均平



a—模型三维地形;b—起伏地形异常体模型;c—异常体位置;d—均匀半空间异常体模型

a—3D terrain; b—undulating terrain model with anomalous body; c—location of the anomalous body; d—uniform half-space model with anomalous body

图 1　复杂地形模型

Fig. 1　Complex terrain model

行于 y 轴设置,长度为 600 m,发射源中心坐标为(−240 m,0 m,−820 m),发射电流为 10 A。异常体设置为球形,中心点坐标为(260 m,0 m,−1 000 m),半径为 100 m,电阻率设置为 1 Ω·m(图 1c)。对所有模型采用 20 m 均匀网格进行剖分,剖分后起伏地形模型与异常体形态如图 2 所示,xyz 这 3 个方向网格数量分别为 101×101×90,六面体单元数为 918 090,节点总数为 946 764。对各个模型地表的垂直感应电动势、E_x 与 E_y 的扩散规律进行观测,分析复杂地形对瞬变电磁响应规律的影响。

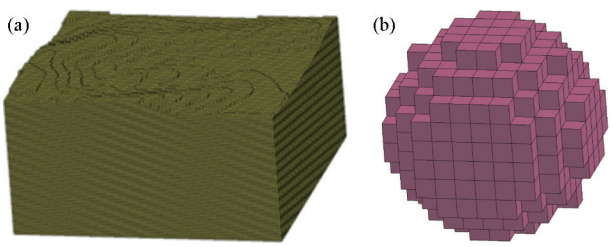
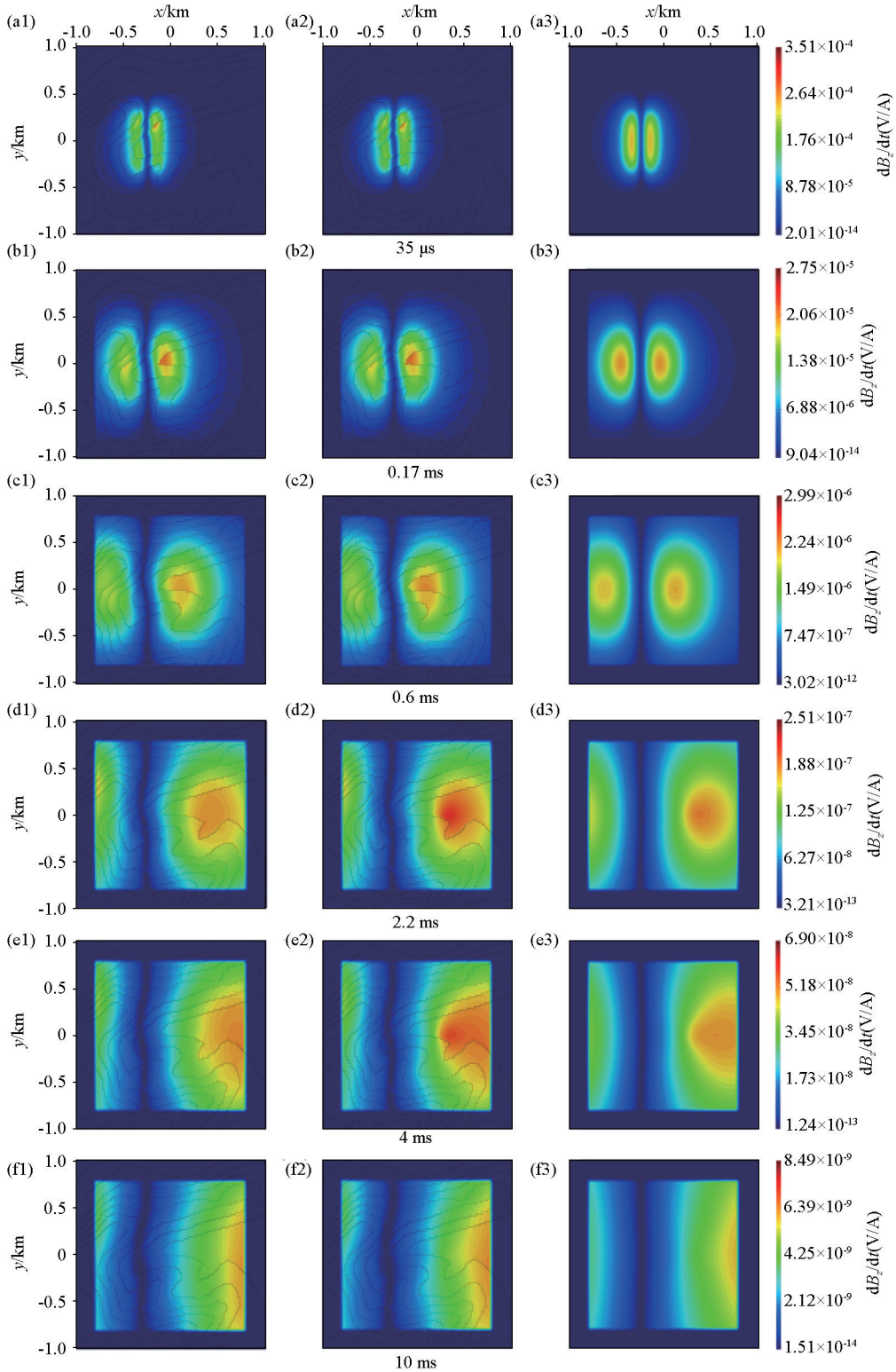


图 2　剖分后计算区域地形(a)与异常体形态(b)

Fig. 2　Terrain(a) and abnormal body shape(b) after subdivision

图 3 给出了起伏地形异常体模型(a1~f1)、起伏地形半空间模型(a2~f2)与均匀半空间异常体模型(a3~f3)在不同时间道的垂直感应电动势地表分布。总体来看,相对于均匀半空间异常体模型,起伏地形均匀半空间模型与起伏地形异常体模型的垂直感应电动势在地形变化处均发生严重畸变。在垂直感应电动势传播过程中,地形变化处对其具有一定的“聚集”作用,地形变化处垂直感应电动势场值明显高于地形未改变处。在 0.6 ms 时,起伏地形异常体模型在异常体位置处垂直感应电动势响应要略大于起伏地形均匀半空间模型,异常体响应开始显现,在 10 ms 时响应消失。图 3d2~e2 与图 3d3~e3 对比可以明显看出,在异常体水平位置处,起伏地形异常体模型的异常体垂直感应电动势响应要明显高于均匀半空间异常体模型,推测原因为起伏地形条件下异常体处地表高程更低,更接近异常体,响应也更加明显。在 35 μs 时,起伏地形异常体模型的垂直感应电动势基本“聚集”在地形起伏处。随着观测时间的增加,地形起伏处对垂直感应电动势的“聚集”作用不再明显,在 10 ms 时,起伏地形异常体模型与均匀半空间异常体模型垂直感应电动势响应趋于一致。

图 4 给出了起伏地形异常体模型(a1~f1)、起伏地形半空间模型(a2~f2)与均匀半空间异常体模型(a3~f3)在不同时间道的平行于源 y 方向电场 E_y 的地表分布。总体来看,E_y 在地形变化处同样发生了严重畸变,且随着 E_y 的传播,地形变化处对 E_y 也具有同样的“聚集”作用。随着观测时间的增加,对比起伏地形异常体模型与均匀半空间异常体模型,无论早期还是晚期,地形起伏处对 E_y 的“聚集”作用均非常明显。同一位置,地形起伏处的 E_y 响应值远远大于水平地表的 E_y 响应值。通过图 3 与图 4(d3~f3)对比可以看出,相比于垂直感应电动势



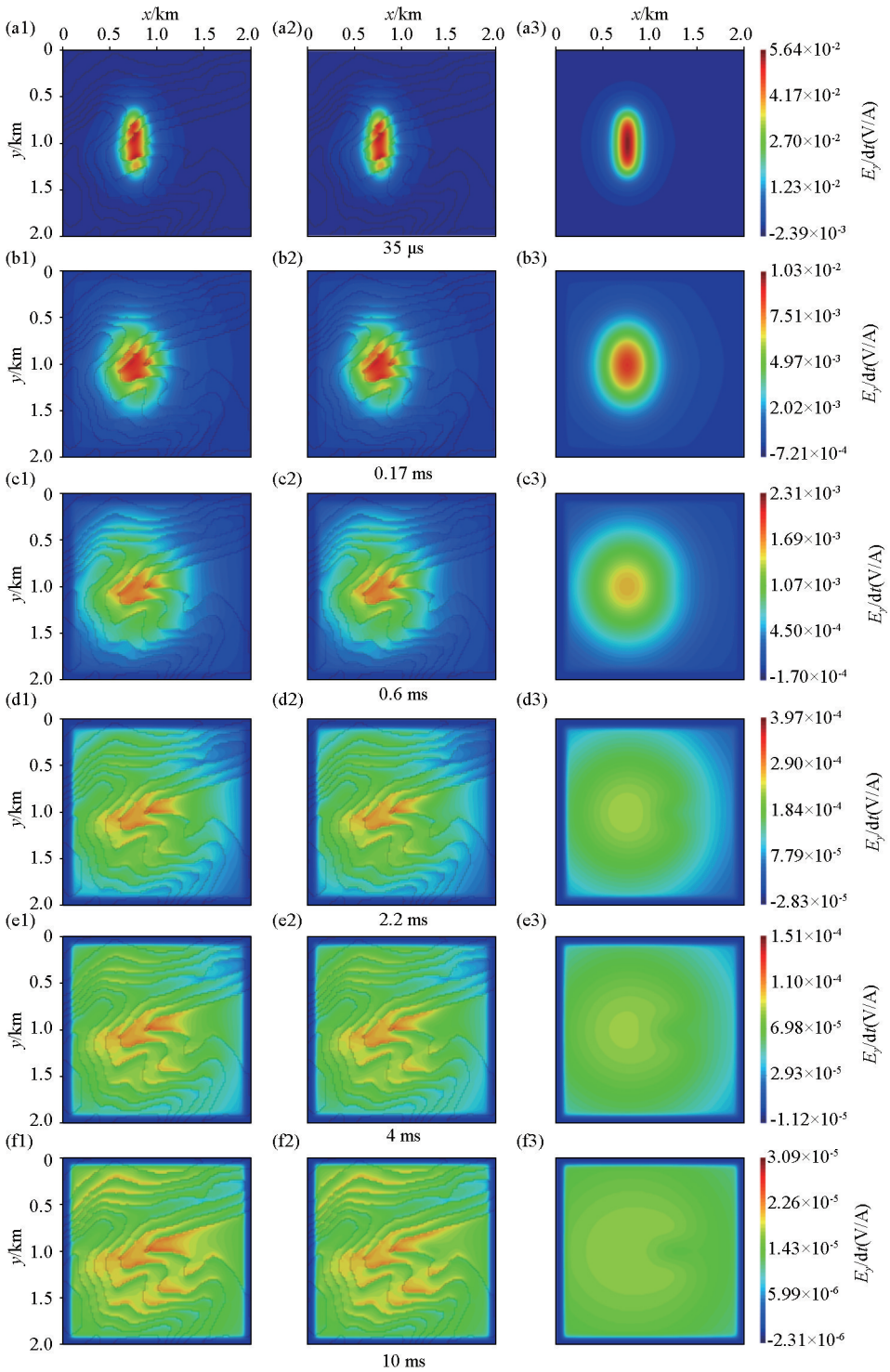
a1~f1—起伏地形半空间模型;a2~f2—起伏地形异常体模型;a3~f3—均匀半空间异常体模型

a1~f1—uniform half-space model with terrain; a2~f2—terrain model with anomalous body; a3~f3—uniform half-space model with anomalous body

图 3　复杂起伏地表模型不同时刻 dB_z/dt 响应

Fig. 3　The dB_z/dt response of complex undulating surface model at different times

在异常体位置响应明显增强,均匀半空间异常体模型在异常体位置 E_y 场值明显减弱且电场线弯曲变化,在 10 ms 时异常体响应依然存在。通过对比图 4(d1~f1)与图 4(d2~f2),起伏地形异常体模型在异常体位置处的 E_y 场值更小,但由于异常体引起的场值变化较小,且地形变化对 E_y 场值的聚集作用使得



a1～f1—起伏地形半空间模型；a2～f2—起伏地形异常体模型；a3～f3—均匀半空间异常体模型

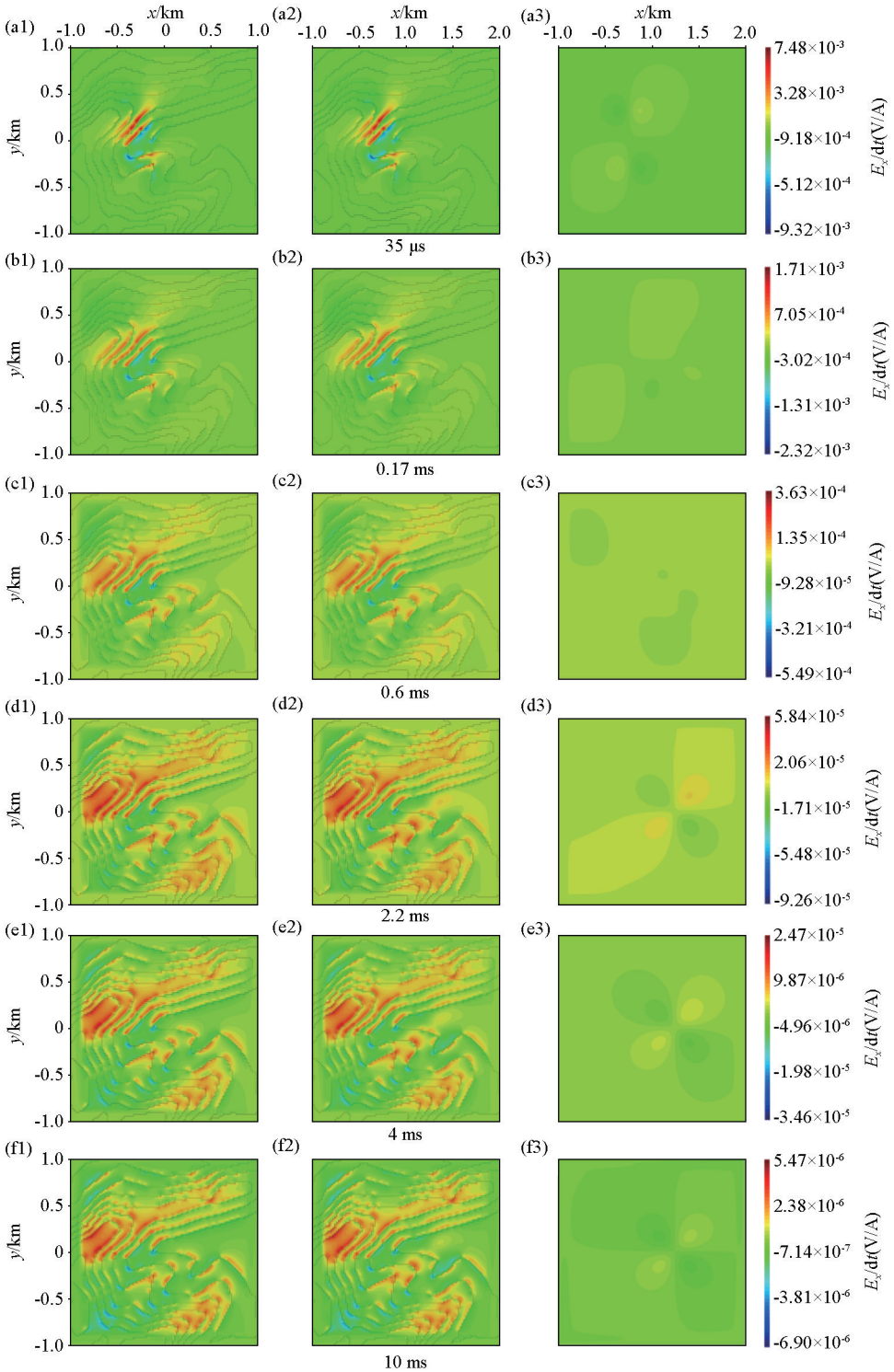
a1～f1—uniform half-space model with terrain; a2～f2—terrain model with anomalous body; a3～f3—uniform half-space model with anomalous body

图 4　复杂起伏地表模型不同时刻 E_y 响应

Fig. 4　The E_y response of complex undulating surface model at different times

地形变化处场值增大，导致异常体的 E_y 响应难以分辨。

图 5 给出了起伏地形异常体模型（a1～f1）、起伏地形半空间模型（a2～f2）与均匀半空间异常体模型（a3～f3）在不同时间道的垂直于源 x 方向电场 E_x 的地表分布。总体来看，E_x 在地形变化处也发生了严重畸变，随着 E_x 的传播，地形变化处对 E_x 也具有明显的“聚集”作用，场值多为正负值相伴且明显大于均匀半空间异常体模型场值。通过对比图 4（c1～f1）与（c2～f2）可以看出，在 0.6 ms 时异常体响应逐



a1～f1—起伏地形半空间模型;a2～f2—起伏地形异常体模型;a3～f3—均匀半空间异常体模型

a1～f1—uniform half-space model with terrain; a2～f2—terrain model with anomalous body; a3～f3—uniform half-space model with anomalous body

图 5　复杂起伏地表模型不同时刻 E_x 响应

Fig. 5　The E_x response of complex undulating surface model at different times

渐显现,相比于起伏地形无异常体模型,起伏地形异常体模型地表异常体位置处有明显响应。通过观察图 4(c3～f3)可以看出,在 2.2 ms 之后,均匀半空间异常体模型中地表 E_x 一次场响应基本消失,异常体 E_x 响应开始传播并逐渐衰减,并在 10 ms 时仍然可以观测到。通过对比图 4(d2～f2)与(d3～f3)可以看出,随着观测时间的增加,无论早期还是晚期,地形起伏处对 E_x 的“聚集”作用均非常明显,同一位置,地形起伏处的 E_x 响应值远大于水平地表的 E_x 响应值。在 2.2 ms 之后,相对于均匀半空间异常体

模型中地表 E_x 一次场响应基本消失,起伏地形异常体模型地形变化处仍有一次场聚集且场值大小占据主导地位,并一直持续到 10 ms,这为异常体响应的辨别增加了困难。

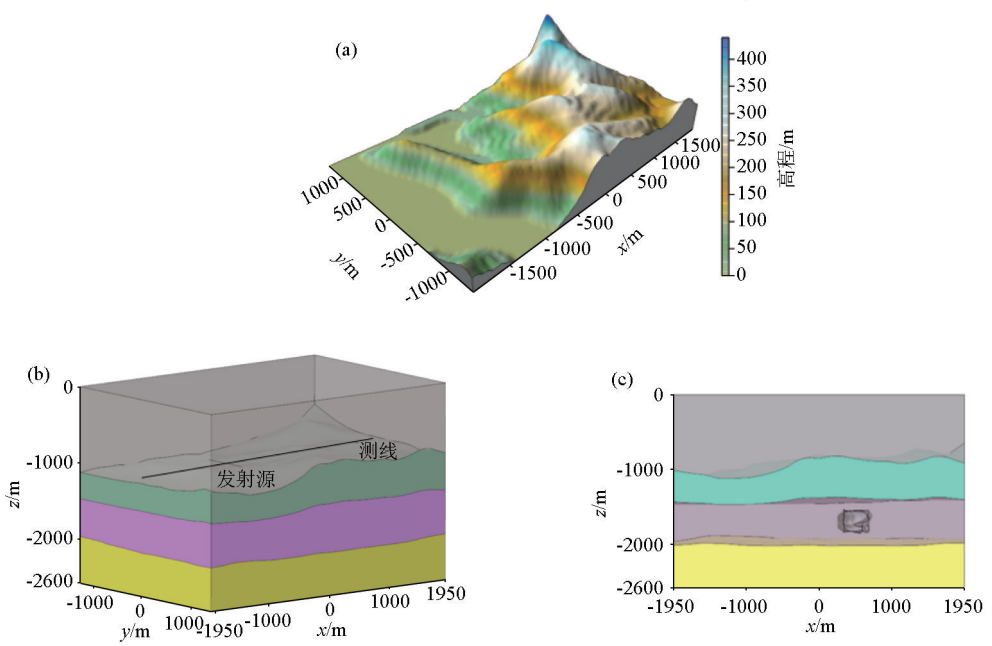
总体来看,复杂地形对磁场主要影响在早期,晚期影响较小,而对电场的影响贯穿整个观测周期。复杂地形对电场的"聚集"作用引起的响应值的变化程度要大于复杂地形引起的磁场响应值的变化程度。综上所述,复杂地形均使垂直感应电动势、平行于源方向的电场分量、垂直于源的电场分量在地形变化处出现严重畸变,复杂地形与异常体的耦合作用使三者在传播过程中也表现出了不同规律,但复杂地形均为瞬变电磁法地面观测对异常体分辨增加了难度。

3　复杂岩溶模型

岩溶发育区在充水后表现为低阻特征,瞬变电磁法对其具有良好探测效果,复杂地形岩溶模型基于广西某隧道实际地形数据,并设计起伏地层界面与复杂岩溶异常体,采用相同的 FDTD 问题计算接口对其进行三维正演模拟,对其正演响应过程进行可视化展示,并研究其瞬变电磁响应特征。

复杂地形岩溶模型地形数据为如图 6a 所示,区域内最大高度差为 400 m。尺寸为 3 900 m × 2 700 m×2 600 m,主要包含空气层与地层两部分,取地层距离边界的 200 m 作为 PML 吸收边界。空气层与地层完全耦合,空气电阻率为 10^6 Ω · m,地层设计为 3 层:第一层上表面为地表,电阻率为 400 Ω · m,且底部两层均设计为起伏地层,上下高差约为 50 m,第二层电阻率为 1 000 Ω · m,第三层电阻率为 100 Ω · m。发射源均平行于 y 轴设置,长度为 1 000 m,发射源中心坐标为(-500 m,0 m,100 m),发射电流为 1 A。设置岩溶异常体水平距离源 900 m,垂直距离 700 m。岩溶异常体形态非常复杂,在 3 个方向上形态如图 7 所示,其在 xyz 3 个方向的最大尺寸分别约为 390 m、400 m 和 340 m。岩溶异常体在模型中的空间位置如图 6c 所示,在岩溶异常体上方设置 1 条测线,如图 6b 所示。岩溶异常体电阻率根据经验设置为 10 Ω · m。对模型采用 20 m 均匀网格进行剖分,剖分后模型与异常体形态如图 8、图 9 所示,xyz 3 个方向网格数量分别为 195×135×130,六面体单元数为 918 090,六面体单元数为 3 422 250,线单元总数为 100,节点总数为 3 491 936。

图 10 给出了复杂地形岩溶模型在 y = 0 m 时,xOz 截面在不同时间道的垂直感应电动势分布,图 11 为不同时间道垂直感应电动势三维分布。从图 10 可以看出,垂直感应电动势在地形变化处、地层起伏处与岩溶异常体边缘处均发生一定的畸变。对比发射源两侧可以看到,随着感应电动势在地下的传播,在有异常体时,感应电动势会逐渐向异常体内汇聚,0.45 ms 时可以明显看到异常体内感应电动势出现了正值,发生了极性反转现象,在 1.2 ms

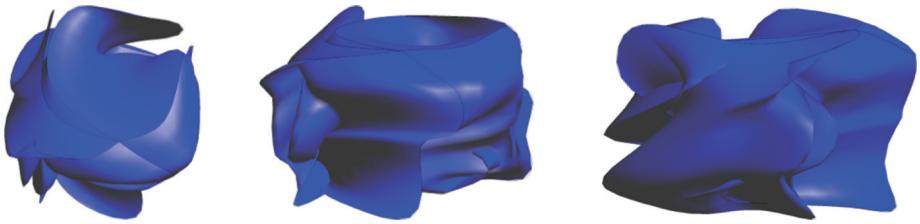


a—模型三维地形;b—复杂地形地层岩溶异常体模型;c—岩溶异常体位置

a—3D terrain; b—complex model with karst anomaly; c—location of the anomalous body

图 6　复杂地形地层岩溶模型示意

Fig. 6　Complex terrain and stratums model with karst anomaly



(a) *xOy* 平面岩溶形态　　(b) *xOz* 平面岩溶形态　　(c) *yOz* 平面岩溶形态

图 7　复杂岩溶异常体三维形态

Fig. 7　Three-dimensional morphology of complex karst anomaly body

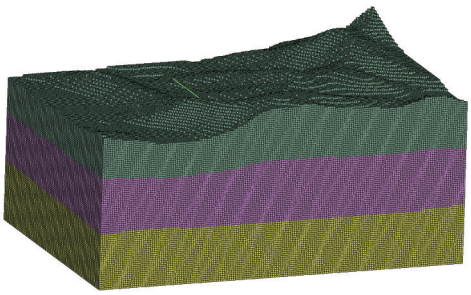
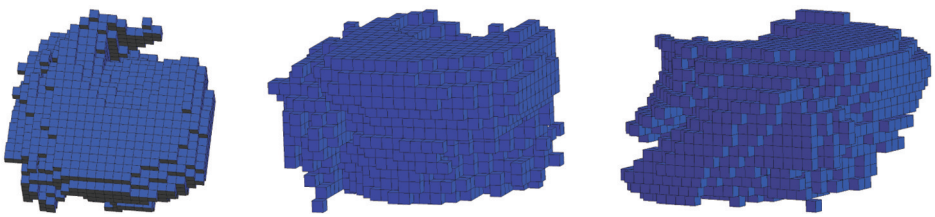


图 8　剖分后模型示意

Fig. 8　The model diagram after subdivision

时已经完全反转并且异常体内的垂直感应电动势开始向周围传播,最后在 7.9 ms 时可以看到异常体内部感应产生的垂直感应电动势扩散完成,离开异常体。从图 11 三维感应电动势不同时间道分布可以清晰直观地看到垂直感应电动势在地下的传播过程,异常体内垂直感应电动势发极性偏转,达到峰值后向外扩散过程。

图 12 给出了复杂地形岩溶模型在 $y=0$ m 时,*xOz* 截面在不同时间道的平行于源的电场 E_y 分布,



(a) *xOy* 平面岩溶形态　　(b) *xOz* 平面岩溶形态　　(c) *yOz* 平面岩溶形态

图 9　岩溶异常体剖分后形态

Fig. 9　The shape of karst abnormal body after division

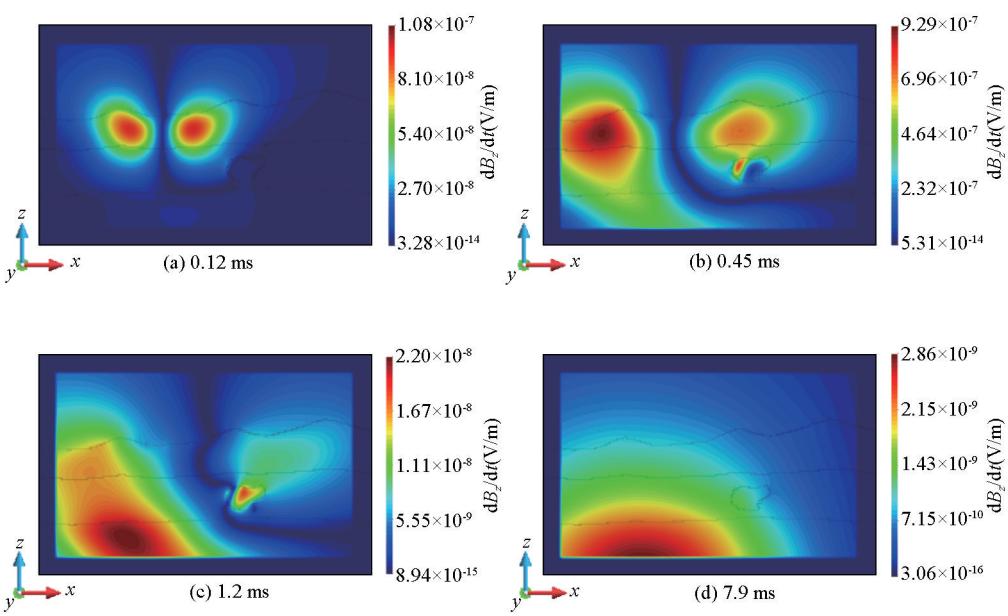


图 10　*xOz* 截面垂直感应电动势分布

Fig. 10　Vertical induced electromotive force distribution of *xOz* section

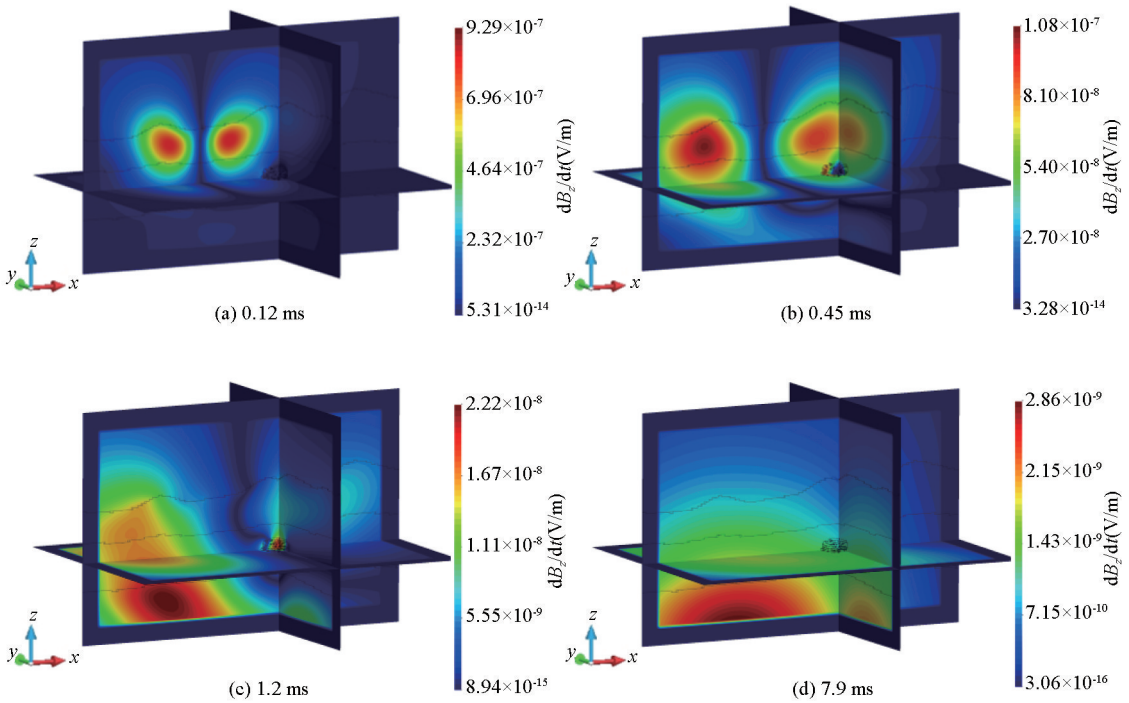


图 11　垂直感应电动势三维分布

Fig. 11　Three-dimensional distribution of vertical induced electromotive force

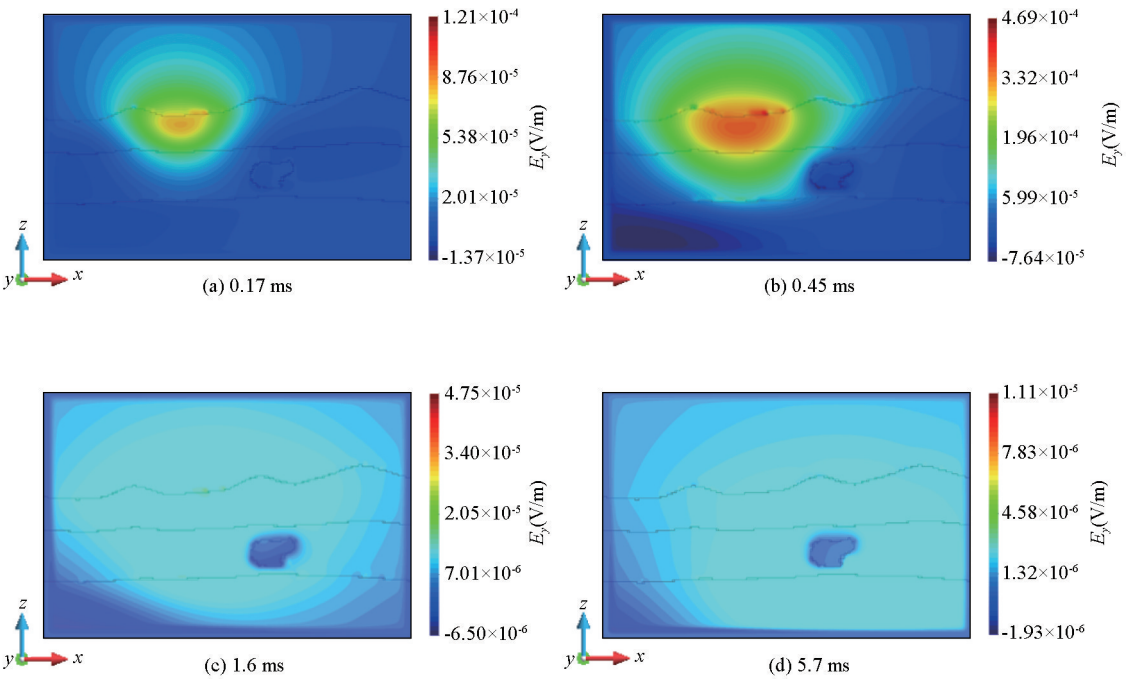


图 12　*xOz* 截面位置 E_y 地下分布

Fig. 12　The *xOz* section E_y underground distribution

图 13 为不同时间道 E_y 三维分布。从图 12(a~d)可以看出，E_y 在地形变化处、地层起伏处与岩溶异常体边缘处均发生一定的畸变，且地形变化处对 E_y 有一定“聚集”作用。随着 E_y 在地下的传播，在扩散到低阻异常体时，可以明显看到低阻异常体对 E_y 的汇聚。随着时间的增加，E_y 响应在有耗介质内快速扩散并衰减，其对低阻异常体的轮廓刻画也更加清晰，在 1.6 ms 与 5.7 ms 时均能清晰看到其轮廓形状。从图 13 三维 E_y 不同时间道分布图中可以清晰直观地看到 E_y 在地下传播过程与其对异常体轮廓三维刻画能力。

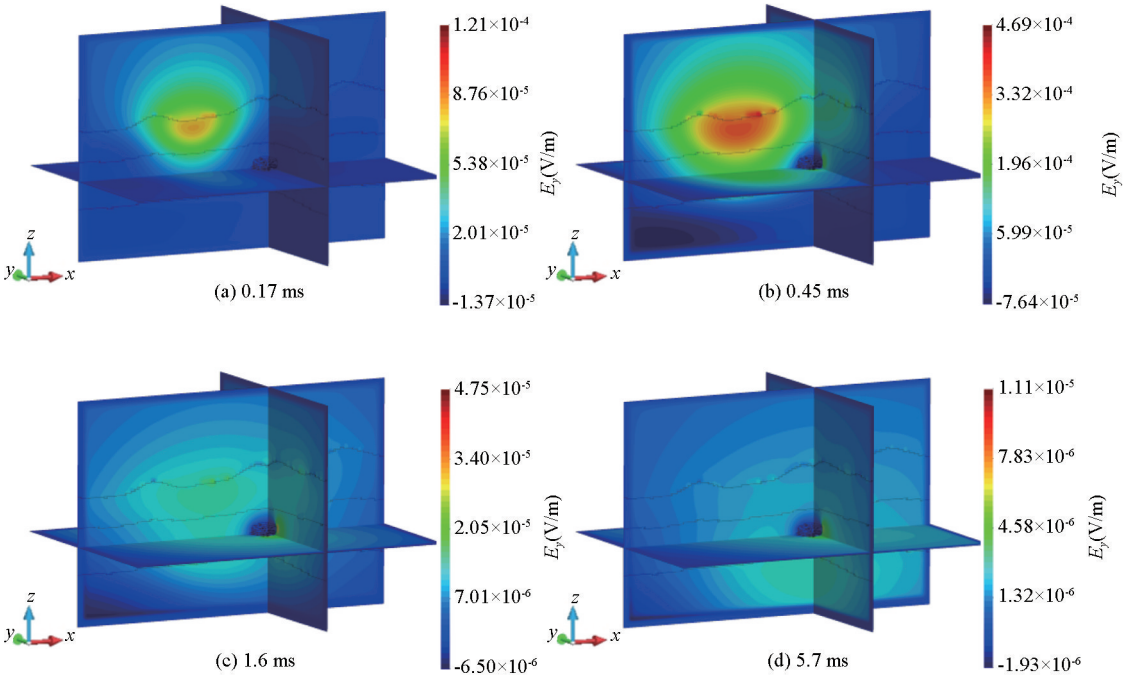


图 13　E_y 不同时间步三维分布

Fig. 13　E_y three-dimensional distribution of different time steps

图 14 给出了复杂地形岩溶模型在 $y=0$ m 时，xOz 截面在不同时间道的平行于源的电场 E_x 分布，图 15 为不同时间道 E_x 三维分布。从图 14 可以看出，E_x 在地形变化处、地层起伏处与岩溶异常体边缘处均发生一定的畸变，地形变化处对 E_x 有一定“聚集”作用，且一般为正负值相对应。随着 E_x 在地下的传播，在 0.45 ms 时，异常体边缘处汇聚了两组正负 E_x 响应，随着时间增长，在 1.6 ms 时正值聚集在异常体内部，异常体边缘汇聚负值，并保持这个特征逐渐衰减。从图 15 三维 E_x 不同时间道分布中可以清晰直观地看到 E_x 在地下传播过程与异常体对 E_x 电场的汇聚规律。

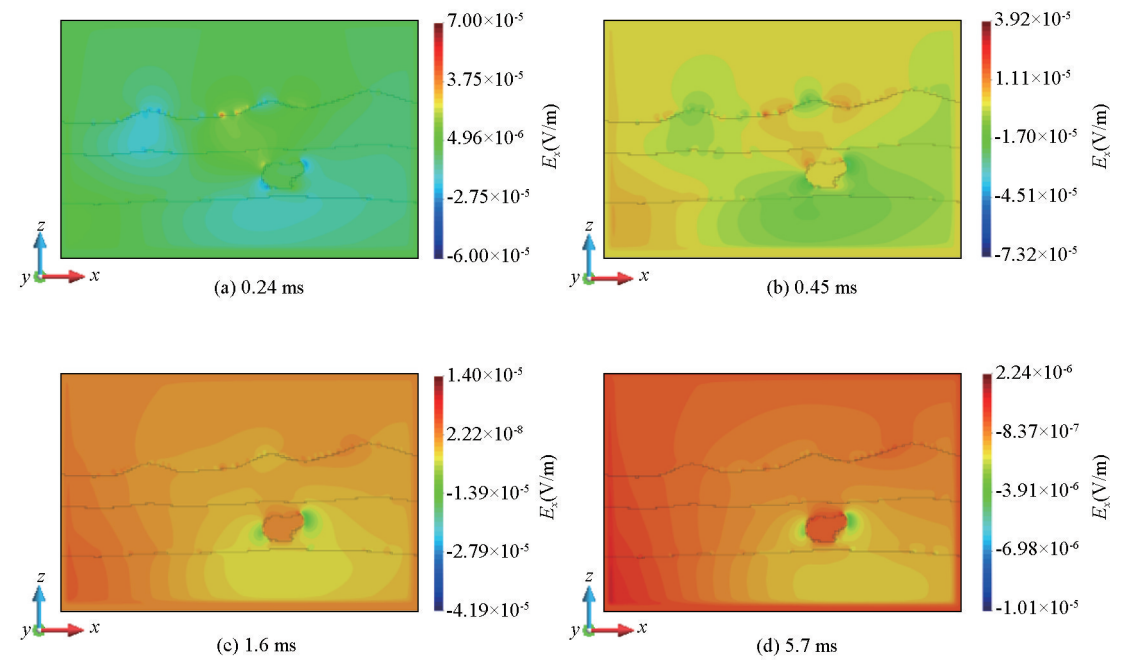


图 14　xOz 截面位置 E_x 地下分布

Fig. 14　The xOz section E_x underground distribution

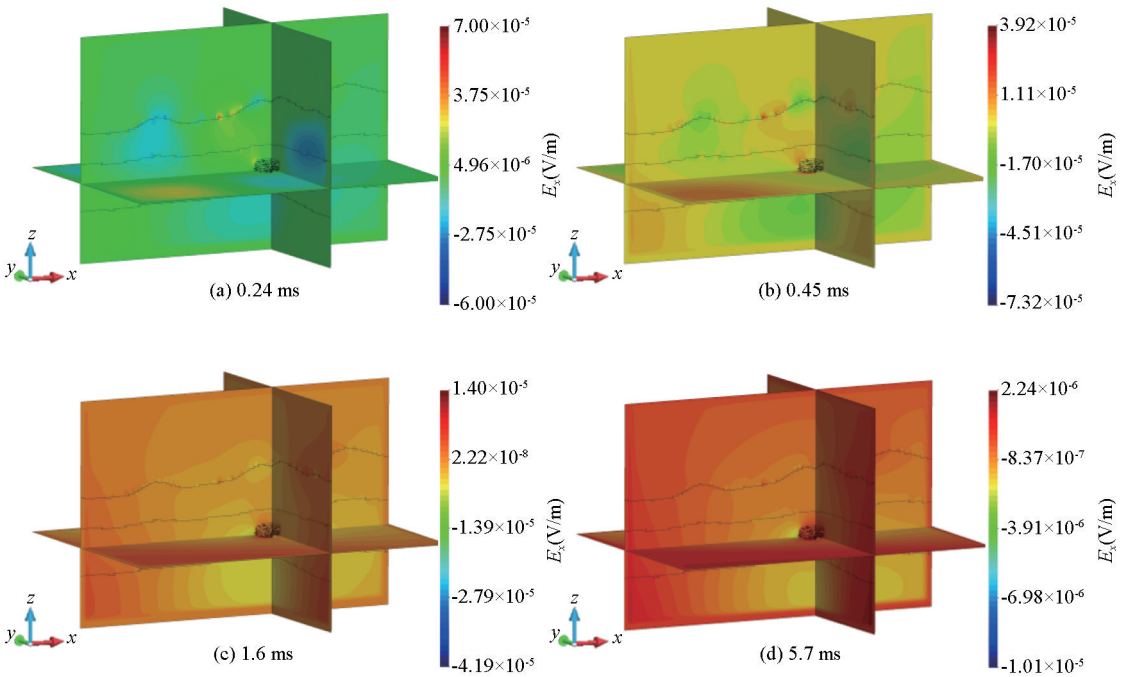


图 15 E_x 不同时间步三维分布

Fig. 15 E_x three-dimensional distribution of different time steps

4 结论

本文基于课题组开发的 em3d 建模软件结合实际地形数据,完成复杂地形模型与复杂地形、三层起伏地层、复杂异常体形态的复杂岩溶模型的建模,并对其三维正演响应规律与特征进行研究。

首先,建立了三维复杂地形模型及相关对比模型并进行正演模拟。对地表电磁响应结果对比分析得,复杂地形使得 dB_z/dt、E_y 与 E_x 的响应在地形变化处均出现严重畸变,复杂地形与低电阻率异常体的耦合效应为地下低阻异常体响应的识别大大增加了难度。

其次,为模拟接近真实地下异常模型的正演响应,基于广西某隧道真实地形数据建立复杂地形岩溶模型,对其三维正演结果进行可视化展示。结果表明电磁响应在地形、地层、异常体边界变化处均发生畸变,其中低电阻率异常体对 dB_z/dt 感应灵敏,内部发生极性偏转,产生较大 dB_z/dt 并进行扩散,dB_z/dt 对低电阻率异常体有良好的反应。低阻异常体对涡流有一定汇聚作用,对 E_y 进行汇聚且衰减缓慢,E_y 对低电阻率异常体的边界具有良好的刻画能力。而低阻异常体对 E_x 中正值汇聚到内部,负值汇聚在边缘位置。

综上所述,采用实际地形数据与更接近真实地层模型进行正演模拟,可以为实际勘探中复杂地形条件下的地面瞬变电磁数据采集、处理与解释提供有关理论指导。

参考文献(References):

[1] Newman G A, Anderson W L, Hohmann G W. Effect of conductive host rock on borehole transient electromagnetic responses[J]. Geophysics, 1989, 54(5): 598-608.

[2] 吴明刚,王海龙,门业凯,等. 高密度电阻率法和瞬变电磁法在复兴村金矿探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(3): 363-368.
Wu M G, Wang H L, Men Y K, et al. Application of high density resistivity method and transient electromagnetic method to fuxingcun gold deposit[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(3): 363-368.

[3] 题正义,张小双,乔宁,等. 瞬变电磁法在煤矿不明采空区积水探测中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2017, 28(1): 102-107.
Ti Z Y, Zhang X S, Qiao N, et al. Transient electromagnetic method applied to the detection of unknown goaf water in coal mine[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 102-107.

[4] 徐慧,牟义,李江华,等. 河流区域露—井联采矿区水文地质综合勘查技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(11): 191-198.
Xu H, Mu Y, Li J H, et al. Research on comprehensive hydrogeological exploration technology in surface-underground combined mining area of river basin[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(11): 191-198.

[5] 汪路路,于润桥,胡博,等. 基于瞬变电磁法的城市热力管道腐蚀检测[J]. 无损检测, 2019, 41(7): 34-38.

Wang L L, Yu R Q, Hu B, et al. Corrosion detection of urban thermal pipeline based on transient electromagnetic method[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2019, 41(7): 34-38.

[6] 孙怀凤,吴启龙,陈儒军,等. 浅层岩溶瞬变电磁响应规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(3):652-661.
Sun H F, Wu Q L, Chen R J, et al. Experimental study on transient electromagnetic responses to shallow karst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 652-661.

[7] 孙怀凤. 隧道含水构造三维瞬变电磁场响应特征及突水灾害源预报研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(3):648.
Sun H F. Three-dimensional transient electromagnetic responses of water bearing structures in tunnels and prediction of water inrush sources[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 648.

[8] 柳尚斌. 基于后推欧拉与直接分解的瞬变电磁三维高效正演方法及 L-BFGS 三维反演[D]. 济南:山东大学,2022.
Liu S B. Three-dimensional efficient forward modeling method of transient electromagnetic based on backward Euler and direct decomposition and L-BFGS three-dimensional inversion[D]. Jinan: Shandong University, 2022.

[9] 刘明宏,蔡红柱,杨浩,等. 地面与半航空瞬变电磁法三维联合反演[J]. 地球物理学报,2022,65(10):3997-4011.
Liu M H, Cai H Z, Yang H, et al. Three-dimensional joint inversion of ground and semi-airborne transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(10): 3997-4011.

[10] 刘云鹤,殷长春. 三维频率域航空电磁反演研究[J]. 地球物理学报,2013,56(12):4278-4287.
Liu Y H, Yin C C. 3D inversion for frequency-domain HEM data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4278-4287.

[11] Wang T. A finite-difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling[J]. Geophysics, 1993, 58(6): 797-809.

[12] 聂佐夫,陶春辉,沈金松,等. 复杂地形结构下瞬变电磁三维正演模拟——以大西洋洋中脊 TAG 热液区为例[J]. 海洋学报,2021,43(6):145-156.
Nie Z F, Tao C H, Shen J S, et al. 3D transient electromagnetics forward modeling with complex topography and structure: A case study of the TAG hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(6): 145-156.

[13] 屈少波,朱姣,姜志海,等. 复杂地形瞬变电磁三维正演模拟与地形效应分析[J]. 煤田地质与勘探,2024,52(4):137-151.
Qu S B, Zhu J, Jiang Z H, et al. Three-dimensional forward modeling using the transient electromagnetic method under complex terrains and the analysis of terrain effects[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 137-151.

[14] Liu G M. Evaluation of terrain effects in AEM surveys using the boundary element method[J]. Geophysics, 1992, 57(2): 272-278.

[15] Newman G A, Alumbaugh D L. Frequency-domain modelling of airborne electromagnetic responses using staggered finite differences[J]. Geophysical Prospecting, 1995, 43(8): 1021-1042.

[16] Chen P F, Hou Z Z, Fan G H. Three-dimensional topographic responses in MT using finite difference method[J]. Acta Seismologica Sinica, 1998, 11(5): 631-635.

[17] Sasaki Y, Nakazato H. Topographic effects in frequency-domain helicopter-borne electromagnetics[J]. Exploration Geophysics, 2003, 34(1-2): 24-28.

[18] Commer M, Hoversten G M, Um E S. Transient-electromagnetic finite-difference time-domain earth modeling over steel infrastructure[J]. Geophysics, 2015, 80(2): E147-E162.

[19] 肖怀宇. 带地形的瞬变电磁法三维数值模拟[D]. 北京:中国地质大学(北京),2006.
Xiao H Y. Three-dimensional numerical simulation of transient electromagnetic method with topography[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2006.

[20] 强建科,罗延钟. 三维地形直流电阻率有限元法模拟[J]. 地球物理学报,2007,50(5):1606-1613.
Qiang J K, Luo Y Z. The resistivity FEM numerical modeling on 3-D undulating topography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5): 1606-1613.

[21] 邱稚鹏,李展辉,李墩柱,等. 基于非正交网格的带地形三维瞬变电磁场模拟[J]. 地球物理学报,2013,56(12):4245-4255.
Qiu Z P, Li Z H, Li D Z, et al. Non-orthogonal-Grid-based three dimensional modeling of transient electromagnetic field with topography[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4245-4255.

[22] 王卫平,曾昭发,李静,等. 频率域航空电磁法地形影响和校正方法[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2015,45(3):941-951.
Wang W P, Zeng Z F, Li J, et al. Topographic effects and correction for frequency airborne electromagnetic method[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(3): 941-951.

[23] 韩波,胡祥云,Schultz A,等. 复杂场源形态的海洋可控源电磁三维正演[J]. 地球物理学报,2015,58(3):1059-1071.
Han B, Hu X Y, Schultz A, et al. Three-dimensional forward modeling of the marine controlled-source electromagnetic field with complex source geometries[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(3): 1059-1071.

[24] 嵇艳鞠,黄廷哲,黄婉玉,等. 起伏地形下各向异性的 2D 大地电磁无网格法数值模拟[J]. 地球物理学报,2016,59(12):4483-4493.
Ji Y J, Huang T Z, Huang W Y, et al. 2D anisotropic magnetotelluric numerical simulation using meshfree method under undulating terrain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(12): 4483-4493.

[25] 张博,殷长春,刘云鹤,等. 起伏地表频域/时域航空电磁系统三维正演模拟研究[J]. 地球物理学报,2016,59(4):1506-1520.
Zhang B, Yin C C, Liu Y H, et al. 3D modeling on topographic effect for frequency-/time-domain airborne EM systems[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(4): 1506-1520.

[26] 赵越,李貅,王祎鹏,等. 三维起伏地形条件下航空瞬变电磁响应特征研究[J]. 地球物理学报,2017,60(1):383-402.
Zhao Y, Li X, Wang Y P, et al. Characteristics of terrain effect for 3D ATEM[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(1): 383-402.

[27] Li J H, Lu X S, Farquharson C G, et al. A finite-element time-do-

main forward solver for electromagnetic methods with complex-shaped loop sources[J]. Geophysics,2018,83(3):E117-E132.

[28] 周峰,张志勇,胡斌,等. 任意形态场源可控源电磁法各向异性介质三维数值模拟[J]. 东华理工大学学报:自然科学版,2022,45(5):460-469.
Zhou F, Zhang Z Y, Hu B, et al. Three-dimensional controlled-source electromagnetic forward modeling with complex source geometries in general anisotropic media[J]. Journal of East China University of Technology:Natural Science Edition,2022,45(5):460-469.

[29] 齐彦福,李貅,孙乃泉,等. 电性源短偏移距瞬变电磁地形影响特征分析[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2022,52(1):247-260.
Qi Y F,Li X,Sun N Q,et al. Analysis of influence characteristics of topography on grounded-source short-offset transient electromagnetic responses[J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition,2022,52(1):247-260.

[30] 王新宇. 起伏地形条件下电性源瞬变电磁三维正演[D]. 荆州:长江大学,2022.
Wang X Y. Three-dimensional forward modeling of transient electromagnetic field with electrical source under undulating terrain conditions[D]. Jingzhou:Yangtze University,2022.

[31] 周钟航,张莹莹. 山峰对电性源地面瞬变电磁响应的影响及校正方法[J]. 物探与化探,2023,47(5):1236-1249.
Zhou Z H,Zhang Y Y. Correction of the influence of mountains on grounded-source transient electromagnetic responses[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2023,47(5):1236-1249.

[32] 曾友强. 瞬变电磁三维建模及软件开发[D]. 西安:长安大学,2016.
Zeng Y Q. Three-dimensional modeling and software development of transient electromagnetism[D]. Xi'an:Changan University,2016.

[33] 李雪峰. 基于 CNCSU-FDTD 的瞬变电磁三维正演与复杂模型三维可视化建模软件开发[D]. 济南:山东大学,2023.
Li X F. Development of 3D modeling software for transient electromagnetic forward modeling and complex model visualization based on CNCSU-FDTD[D]. Jinan:Shandong University,2023.

[34] 孙怀凤,胡杉杉,柳尚斌,等. 复杂模型瞬变电磁三维 FDTD 正演软件开发[J]. 地球物理学进展,2024,39(6):2368-2382.
Sun H F,Hu S S,Liu S B,et al. 3D forward modeling software development for transient electromagnetic based on FDTD method [J]. Progress in Geophysics,2024,39(6):2368-2382.

3D TEM forward modeling of complex geoelectric model based on em3d software

WANG Xiao-Ming[1], LIU Bo[2,3], ZHAO Yu[1], LIU Dong[2,3], LIU Shang-Bin[2,3], YANG Guang[1], HU Shan-Shan[2,3], ZHOU Yong-Xing[1], SUN Huai-Feng[2,3]

(1. *China First Highway Engineering Group Co., Ltd., Beijing* 100024, *China*; 2. *Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan* 250061, *China*; 3. *Laboratory of Earth Electromagnetic Exploration, Shandong University, Jinan* 250061, *China*)

Abstract: Three-dimensional forward modeling in transient electromagnetic (TEM) surveys is a crucial tool for studying the response patterns of different scenarios and targets. A key issue in forward modeling is ensuring that the model closely approximates the actual geological conditions. This paper uses the EM3D software to model and conduct three-dimensional forward analysis of complex terrain and karst geological models, investigating the response characteristics of transient electromagnetic fields under complex geoelectric conditions. The three-dimensional forward simulation of complex terrain models reveals that complex terrain induces distortions in the transient electromagnetic response, and ignoring terrain effects can lead to false anomalies. The three-dimensional forward simulation of complex karst geological models shows that undulating strata and the boundaries of complex karst anomalies also cause distortions in the transient electromagnetic response, significantly interfering with anomaly identification. Analysis of the transient electromagnetic responses of the two complex geoelectric models indicates that the vertical induced electromotive force dB_z/dt effectively reflects low-resistivity bodies, the electric field E_y parallel to the source accurately delineates the boundaries of low-resistivity bodies, and the electric field E_x perpendicular to the source shows positive values within the anomaly and coexisting positive and negative values outside the anomaly.

Key words: transient electromagnetic; complex terrain; complex model; forward simulation; BEDS-FDTD; em3d

(本文编辑:王萌)