doi: 10.11720/wtyht.2026.1209
刘建利, 李新胜, 陈小龙, 等. 地形起伏条件下地空瞬变电磁电性源形态畸变效应与观测系统优化[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 533-550. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1209
Liu J L, Li X S, Chen X L, et al. Semi-airborne transient electromagnetic method: Geometrical distortion effects of grounded source under undulating terrain conditions and optimization of observation systems[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 533-550. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1209

地形起伏条件下地空瞬变电磁电性源形态畸变效应与观测系统优化

刘建利[1,2,3], 李新胜[1,2], 陈小龙[1,2], 李冰[1,2], 赵旭阳[1,2], 申晨[1,2]
(1. 陕西地矿物化探队有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 陕西地矿创新研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 李新胜劳模和工匠人才创新工作室, 陕西 西安 710043)

摘 要: 随着矿产资源开发对复杂地形区域勘探工作需求的增加, 传统瞬变电磁法(TEM)在复杂地形区域面临布设困难、效率低下等挑战。地空瞬变电磁法(semi-airborne TEM, SATEM)通过地面发射、空中接收的方式, 显著提高了地形复杂区域的采集效率和适应能力。然而, 地形起伏常导致电性源无法按照理想直线布设, 其几何形态畸变对电磁场响应的影响机制尚未得到充分研究。本文基于三维有限元正演模拟, 系统分析了山峰、山谷等典型起伏地形条件下发射源弯曲与垂向起伏引起的电磁场畸变特征。研究结果表明, 发射源的非理想几何形态是造成早期电磁响应不对称与假异常的主要原因; 山峰地形使电磁能量集中于浅部山体, 抑制了探测深度, 而山谷地形则因发射源位置下沉而增强了地下耦合, 扩大了早期的探测范围; 更重要的是, 采用地形跟随式飞行测线(即接收高度相对于地表恒定)可有效压制由源形态畸变与地形耦合引起的视电阻率假异常。基于此, 本文提出一套适用于复杂地形的 SATEM 优化采集方案, 为提高深部资源勘探精度提供理论支撑与技术指导。

关键词: 地空瞬变电磁法; 三维数值模拟; 有限单元法; 场源布设; 地形; 电磁响应畸变; 采集方案优化
中图分类号: P631; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0533-18

0 引言

矿产资源在我国经济发展和工业化进程中具有重要的战略地位。然而, 经过长期大规模的勘探与开发, 浅层资源已日趋枯竭, 面临可开采空间逐渐缩小的严峻挑战[1-3]。在这一背景下, 对深部资源及地形复杂地区资源的开采, 成为当前和未来矿产勘查与开发的重点方向[4-6]。

瞬变电磁法(TEM)因其对地下导电结构具有较高的分辨能力, 已广泛应用于矿产资源勘查中[7-9]。复杂地形区域通常具有起伏较大、地质条件复杂等特点, 这使得传统的地面发射与接收系统在布设过程中受到了地形的显著限制, 且设备搬运困难、电磁干扰等问题严重影响了数据质量和工作效率。因此, 解决这些问题的迫切需求推动了地空瞬变电磁法的发展。地空瞬变电磁法凭借地面发射、空中接收的工作模式, 有效规避了地面障碍对接收系统布设的限制, 不仅大幅提高了复杂地形区域的作业灵活性, 还显著降低了人力成本和勘探风险。近年来, 国内多个研究团队在这一技术领域取得了重要突破。例如, 中国科学院电子所刘富波团队成功研制了无人直升机 TEM 系统; 吉林大学嵇艳鞠团队开发了无人飞艇长导线源地空探测系统; 成都理工大学王绪本团队则构建了无人机接收系统。地空瞬变电磁法的勘探系统已基本成熟[10-15]。

尽管地空瞬变电磁法在复杂地形区具有明显的优势, 但其发射源的布设仍面临诸多实际困难。为避免地形的影响, 传统方法将发射源布置在地势平缓区域。然而, 在地质条件复杂的平原地区和高山

收稿日期: 2025-06-18; **修回日期:** 2025-11-26
基金项目: 陕西地矿集团科研专项资金项目“150 kW 大功率地空瞬变电磁方法技术研究”(KY202314)
第一作者: 刘建利(1972-), 正高级工程师, 陕西地矿集团有限公司首席专家, 长期从事地球物理勘查研究与应用工作。Email: 188765950@qq.com

峡谷等剧烈起伏区域，受限于河流湖泊、人文干扰源和复杂地质结构难以实现理想的一维布局。此类非理想布设方式不仅影响电磁场的传播特性，还可能对数据解释造成干扰。因此，在实际勘探中，需充分考虑地形与地质条件对源布设的影响。针对复杂地形条件下的源布设问题，已开展了若干研究与讨论。陈卫营等[2]基于电性源一维正演理论，研究了发射源偏移和弯曲对视电阻率和电磁响应的影响，并通过实测数据验证，为复杂地形条件下的勘探工作提供了有益参考，然而研究并未涉及复杂地形条件下源布设的综合影响。Zhou 等[16]研究了发射源形态变化对短偏移距瞬变电磁法响应的影响，采用叠加偶极子建模方法揭示了源路径折叠对接收电场的影响特征，但研究集中于单一地形条件，未能涉及复杂的地形环境。Qi 等[17]探讨了回线源瞬变电磁法中发射线圈几何形状变化对电磁响应的影响。Li 等[18]提出了一种考虑回线源几何形状影响的反演方案，并借助实测数据验证了该方法的准确性。然而，该方法主要应用于理想条件下的数据采集，未能充分考虑复杂地形对源形态变化的影响。Zhou 等[19]对比分析了可控源电磁法中接地导线源沿曲线路径与直线路径布设的场强差异，并提出了优化布设建议。Shi 等[20]则研究了电性源弯曲起伏对电磁响应的影响，并就地空瞬变电磁法的现场勘测规范提出了改进措施。

在复杂地形区域的勘探工作中，尽管已对电性源形态变化的影响进行了初步探讨，但目前仍缺乏对非理想布设条件下电磁场传播特性的系统性研究。目前研究多集中于单一地形或特定条件，尚未系统涵盖多种复杂地形中电性源形态变化对电磁场传播机制的影响。为此，本研究通过高精度数值模拟，系统分析了电性源在不同复杂地形条件下形态变化对电磁场响应的影响，并构建了电性源形态变化对电磁响应的综合影响模型。与以往侧重于单一地形的研究不同，本文综合考虑了山峰、山谷等多种典型复杂地形情形，进一步对比了高程固定与随地形变化等不同飞行测线采集方式对勘探质量的影响，以优化勘探方案设计。本研究不仅丰富了复杂地形条件下电性源电磁响应的理论体系，也为地空瞬变电磁法的勘探实践提供了有效支撑，兼具理论意义与工程应用价值。

1 三维正演基本原理

基于麦克斯韦方程组，推导出时间域电场扩散方程：

$$\frac{1}{\mu}\nabla\times\nabla\times\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)+\sigma\frac{\partial\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}+\frac{\partial\boldsymbol{j}_s(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}=0, \tag{1}$$

式中：r为位置矢量；$e(r,t)$为$\boldsymbol{r}$矢量点t时刻电场强度；$\boldsymbol{j}_s$为外部源电流密度；μ是磁导率，取为常数$4\pi\times10^{-7}$ H/m。式 (1) 满足切向电场连续性条件和法向电流密度连续性条件：

$$\hat{\boldsymbol{n}}\times(\boldsymbol{e}_1-\boldsymbol{e}_2)=0, \tag{2}$$

$$\hat{\boldsymbol{n}}\times(\boldsymbol{j}_1-\boldsymbol{j}_2)=0, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{j}_i=\sigma_i\boldsymbol{e}_i, \tag{4}$$

式中：$\hat{\boldsymbol{n}}$表示边界外法向单位向量；$\boldsymbol{e}_i$、$\boldsymbol{j}_i$和σ_i分别表示边界两侧电场强度、电流密度和电导率。

对整个空间进行四面体网格剖分，利用伽辽金方法原理定义残差：

$$\boldsymbol{p}(\boldsymbol{r},t)=\frac{1}{\mu}\nabla\times\nabla\times\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)+\sigma\frac{\partial\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}+\frac{\partial\boldsymbol{j}_s(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}, \tag{5}$$

计算第 e 个网格残差的加权积分为：

$$R^e=\iiint_{V^e}\boldsymbol{w}(\boldsymbol{r},t)\cdot\boldsymbol{p}^e(\boldsymbol{r},t)\mathrm{d}v, \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{w}(\boldsymbol{r},t)$ 为定义的积分加权系数。将式 (5) 代入式 (6) 中：

$$R^e=\iiint_{V^e}\boldsymbol{w}(\boldsymbol{r},t)\cdot\left(\frac{1}{\mu}\nabla\times\nabla\times\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)+\sigma\frac{\partial\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}+\frac{\partial\boldsymbol{j}_s(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}\right)\mathrm{d}v, \tag{7}$$

采用插值基函数进行空间离散，利用棱边自由度表示任意位置电场强度：

$$\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)=\sum_{j=1}^{6}u_j^e(t)\boldsymbol{n}_j^e(\boldsymbol{r}), \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{e}(\boldsymbol{r},t)$表示任意位置的电场强度；$u_j^e(t)$ 表示第e个四面体j条棱边上的切向电场；$\boldsymbol{n}_j^e(\boldsymbol{r})$ 为插值基函数。根据伽辽金方法利用插值基函数$\boldsymbol{n}_j^e(\boldsymbol{r})$代替加权系数$\boldsymbol{w}(\boldsymbol{r},t)$，将式 (8) 带入式 (7) 中，并进行变换后得到：

$$\begin{aligned}R_i^e=&\frac{1}{\mu}\sum_{j=1}^{6}u_j^e(t)\iiint_{V^e}\boldsymbol{n}_i^e(\boldsymbol{r})\cdot\nabla\times\nabla\times\boldsymbol{n}_j^e(\boldsymbol{r})\mathrm{d}v+\\&\sum_{j=1}^{6}\frac{\partial u_j^e(t)}{\partial t}\iiint_{V^e}\boldsymbol{n}_i^e(\boldsymbol{r})\cdot\sigma^e\cdot\boldsymbol{n}_j^e(\boldsymbol{r})\mathrm{d}v+\\&\iiint_{V^e}\boldsymbol{n}_i^e(\boldsymbol{r})\cdot\frac{\partial\boldsymbol{j}_s(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}\mathrm{d}v,\end{aligned} \tag{9}$$

转换成矩阵形式：

$$\boldsymbol{R}^e=\boldsymbol{M}^e\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}^e(t)}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{S}^e\boldsymbol{u}^e(t)+\boldsymbol{J}^e, \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{S}$和$\boldsymbol{J}$分别表示单元质量、刚度矩阵以及电流源项。将所有四面体单元矩阵合成总体矩阵，并令残差为 0，得到有限元控制方程：

$$\boldsymbol{M}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{u}(t)}{\mathrm{d}t}+\boldsymbol{S}\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{J}=0, \tag{11}$$

利用二阶向后欧拉公式对有限元控制方程进行时间离散:

$$(3\boldsymbol{M}+3\Delta t\boldsymbol{S})\boldsymbol{e}^{i+2}(t)=\boldsymbol{M}\left[4\boldsymbol{e}^{i+1}(t)-\boldsymbol{e}^{i}(t)\right]-2\Delta t\boldsymbol{J}^{i+2}。 \tag{12}$$

为定量评估电性源形态变化和地形起伏对电磁响应的影响, 本文定义相对畸变率δ为:

$$\delta=\frac{\left|B_{\mathrm{complex}}-B_{\mathrm{ideal}}\right|}{B_{\mathrm{ideal}}}\times 100\%, \tag{13}$$

式中: B_{ideal}为理想模型(水平地表、直线源)的磁场响应; B_{complex}为复杂模型(弯曲源或地形)的磁场响应。同时, 为评估采集方案的优化效果, 定义假异常校正系数η为:

$$\eta=\left(1-\frac{\left|B_{\mathrm{corrected}}-B_{\mathrm{ideal}}\right|}{\left|B_{\mathrm{uncorrected}}-B_{\mathrm{ideal}}\right|}\right)\times 100\%, \tag{14}$$

式中: $B_{\mathrm{uncorrected}}$为未进行矫正的采集数据; $B_{\mathrm{corrected}}$为校正后的采集数据。η值越高, 表明优化方案对假异常的校正效果越好。

2　数值模拟

2.1　模型验证

为确保三维有限元正演模拟的精度, 本文采用了局部网格加密策略, 即在发射源附近加密网格, 网格尺寸从远区到近区逐渐减小。为了对比不同网格尺寸对正演精度的影响, 本文以水平地表模型为例, 构建了 1 个均匀半空间模型(电导率 σ=0.01 S/m), 并布设了端点为(0, −500, 0)与(0, 500, 0)的理想直线发射源。接着, 计算了偏移距 100 m、上空 30 m 处的磁场响应, 并与该条件下的一维解析解进行了对比, 评估了不同网格加密尺度对正演精度的影响。具体的电性参数与模拟设置见表 1。为了进行对比, 远源区单元的网格尺寸设置为 50 m, 近源区则选择了 5 m、2 m、1 m、0.5 m 和 0.1 m 共 5 种不同网格尺寸进行加密。对比结果表明, 随着网格尺寸的减小, 网格数量逐渐增加, 当网格尺寸为 1 m 时, 正演精度与网格数量之间达到了平衡(图 1)。因此, 本文最终选择 1 m 作为近源区的标准网格尺寸。

表 1　数值模拟参数

Table 1　Numerical simulation parameters

参数	取值
时间步长	1×10^{-7} s(早期)→1×10^{-5} s(晚期)
边界条件	截断边界设为模型边缘外扩1 000 m, 采用Dirichlet边界条件
地层电导率/(S·m^{-1})	0.01
磁导率/(H·m^{-1})	$4\pi\times10^{-7}$
发射波形	阶跃电流, 10 A

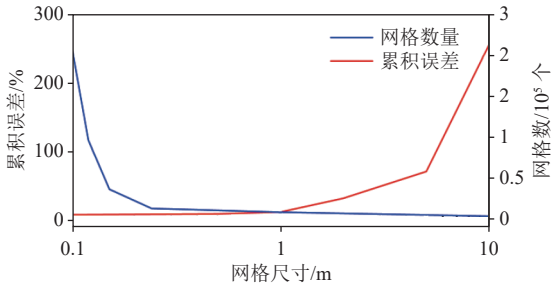


图 1　加密尺寸与正演精度及网格数量关系曲线

Fig. 1　Relationship between encryption size and forward modeling accuracy with grid quantity

基于上述网格加密策略, 本文进一步验证了有限元三维正演的精度, 计算了时间道的相对误差(图 2)。在全时间道内, 数值解与解析解的相对误差均小于 5%, 证明了所采用的数值模拟程序的计算结果是可靠的。本文的模型数值模拟参数设置见表 1。

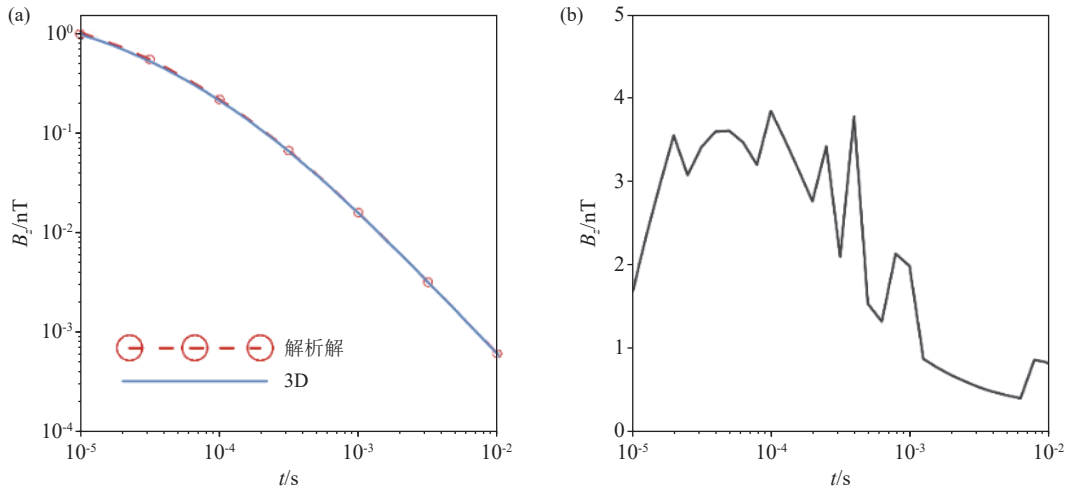
2.2　水平发射源影响分析

本次模拟采用的边界条件为狄利克雷边界条件, 即在模型的外部边界上设置电场切向分量为零, 以模拟电磁波在无穷远处的衰减特性。时间步长采用自适应调整策略, 初始步长为 1×10^{-7} s, 并根据场值变化率自动调整, 确保了早期快速变化和晚期平缓衰减过程均能被精确捕捉。

在野外勘探工作中, 电性源作为常用的发射源, 其布设过程常受到地表环境的干扰, 尤其在建筑物、湖泊或接地条件较差的区域, 电性源通常需要在水平方向上进行弯曲布设。这种实际情况使得电性源的形态与理想模型存在显著差异, 进而影响电磁响应的结果。为了深入研究电性源形态变化对电磁场激发效果的影响, 本文设计了如图 3 所示的水平地表模型: 图 3a 为理想直线发射源布设, 图 3b 为模拟绕过障碍区域的实际布设情况, 其中发射源的中段向 x 轴负方向侧移约 100 m。两组模型的端点均为(0, −500, 0)与(0, 500, 0), 以确保不同布设形态的对比。

本研究采用阶跃波形信号进行发射, 电流强度为 10 A。接收测点分布在 2 000 m × 2 000 m 区域内, 点距与线距均为 20 m, 飞行高度为 30 m, 总测点数为 100 个。加密后网格单元分布见图 4。为研究不同电性源形态对电磁场的影响, 本文选取了 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 共 3 个时刻, 绘制了磁通量 B 在空间中的分布, 如图 5 所示。

通过对比两种不同电性源形态所激发的电磁场, 可以发现, 在早期电磁场中, 弯曲电性源的影响尤为明显, 且电磁场的强度在趋近弯曲侧时更为强

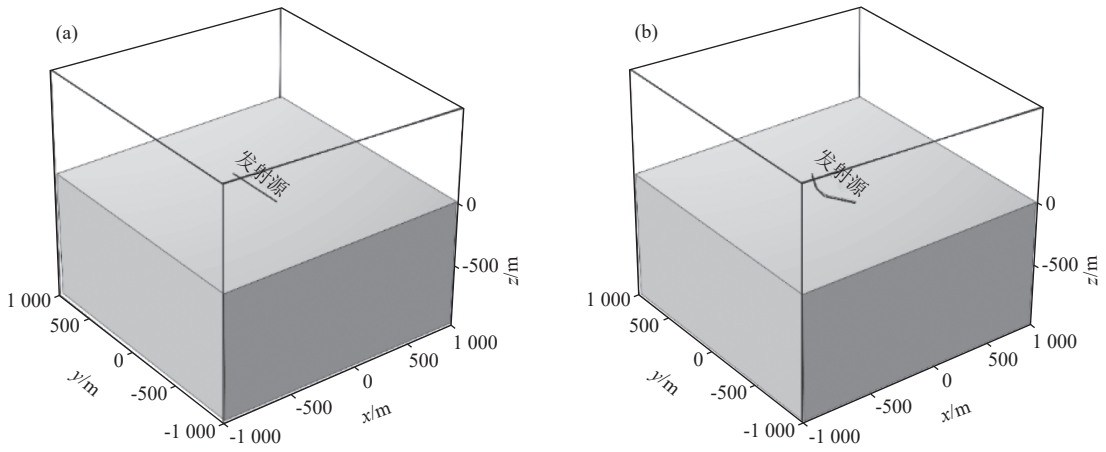


a—B_z 正演解与解析解对比；b—正演解与解析解相对误差曲线

a—B_z forward vs analytical solutions comparison; b—relative error of forward and analytical solutions

图 2　精度验证结果

Fig. 2　Accuracy verification results

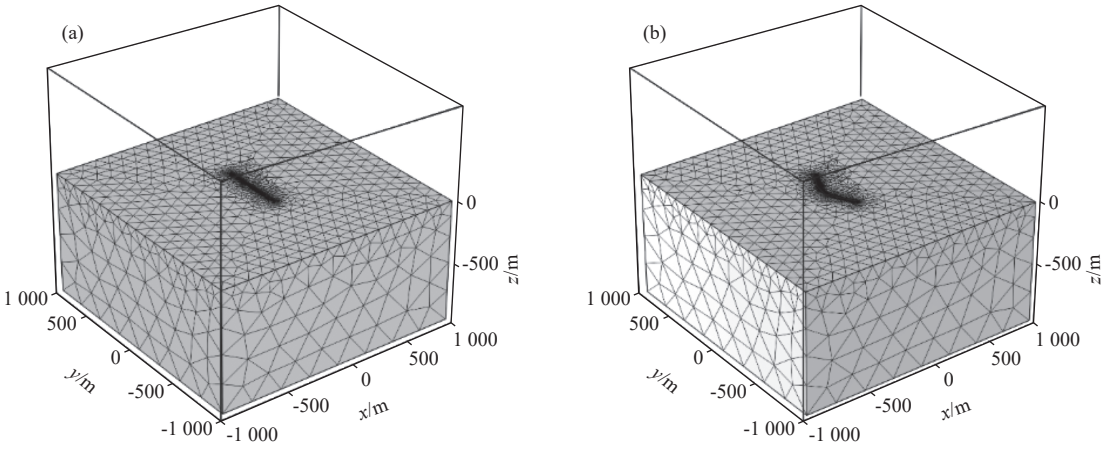


a—理想电性源模型；b—水平弯折电性源模型

a—ideal grounded source model; b—horizontally bent grounded source model

图 3　水平地表仿真模型示意

Fig. 3　Schematic of the horizontal surface simulation model

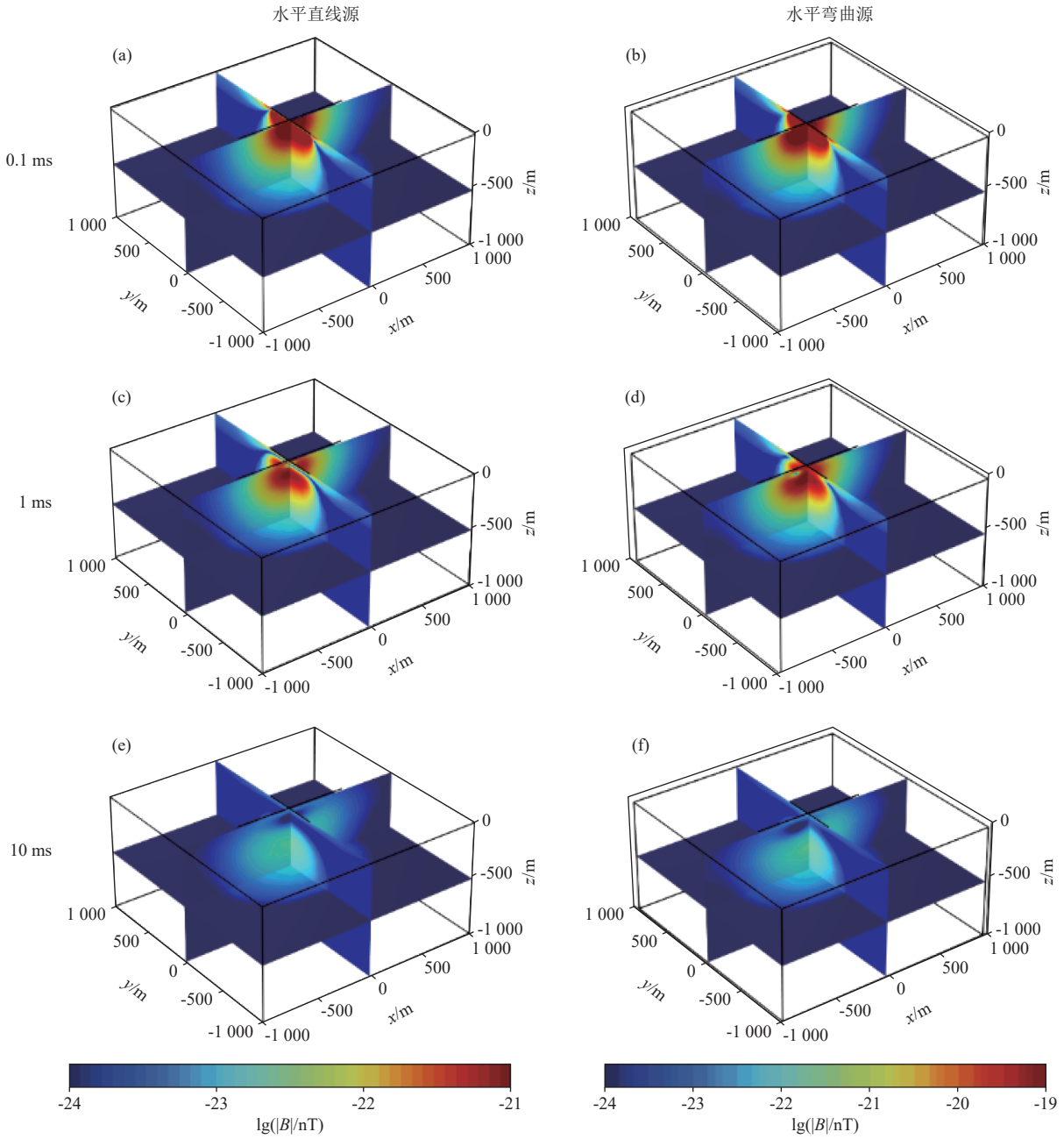


a—理想电性源网格模型；b—水平弯折电性源网格模型

a—mesh for the ideal grounded source model; b—mesh for the horizontally bent grounded source model

图 4　水平地表仿真网格

Fig. 4　Mesh of the horizontal surface simulation model



a、c、e—理想电性源 0.1 ms、1 m s 和 10 ms 时刻磁通量分布情况; b、d 和 f—弯曲电性源 0.1 ms、1 m s 和 10 ms s 时刻磁通量分布情况

a, c, e—correspond to 0.1 ms, 1 ms, and 10 ms for the ideal source; b, d, f—correspond to 0.1 ms, 1 ms, and 10 ms for the bent source

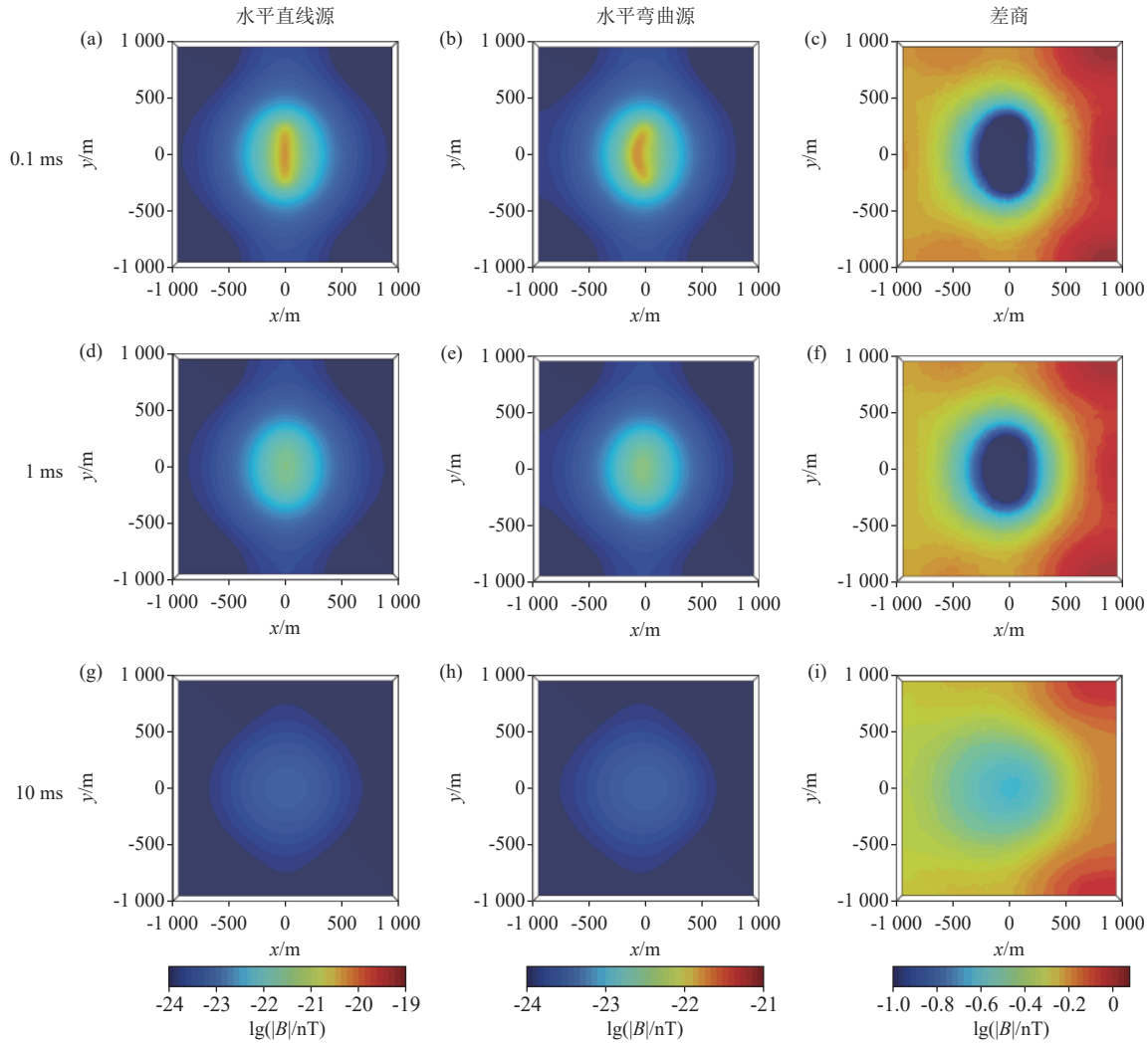
图 5　不同时刻磁通量空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of magnetic flux at different times

烈。随着电磁场的衰减和扩散, 电性源的影响逐渐减小。图 6 展示了源形态对电磁场的影响过程, 其中图 6a 和图 6b 展示了电性源弯曲带来的电磁场不对称性, 弯曲电性源产生的电磁场向弯曲侧集中, 形态与发射源对应。图 6c、6f 和 6i 展示了这种畸变如何随着时间的推移而逐渐消失。图 7 中展示的不同飞行测线多测道结果验证了电磁场扩散特征。

选择电性源铅锤线方向的 1 条测线, 绘制多测道图(见图 7)。对比图 7a 与图 7b 可以明显观察到, 电性源的弯曲导致了电磁场的畸变, 且畸变方向与电性源的弯曲方向一致。这表明, 电性源的形态变化对电磁场的传播特性具有显著影响, 特别是在复杂地形条件下, 电性源的非理想布设会导致电磁响应的失真。

接下来, 本研究通过设计不同弯曲程度的电性源, 研究了电性源横向偏移对电磁场的影响(图 8)。通过正演模拟得到不同横向偏移量(如 0 m、150 m 和 250 m)下的电磁场等值面(图 9)。对比结果表明, 随着电性源横向偏移量的增加, 电磁场的不对称程度加深, 且内凹侧的电磁场值始终高于外凸侧, 表

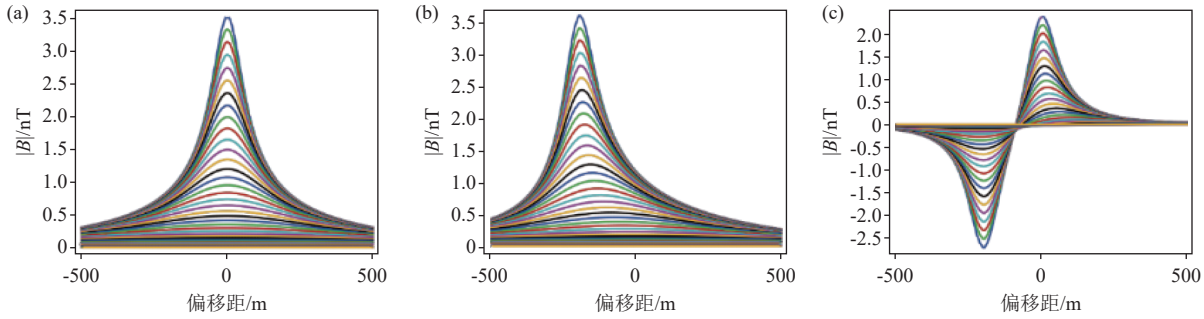


a、b、c—0.1 ms 时刻直线源磁通量、弯曲源磁通量以及两者之差；e、f、g—1 ms 时刻直线源磁通量、弯曲源磁通量以及两者之差；h、i、j—10 ms 时刻直线源磁通量、弯曲源磁通量以及两者之差

a,b,c—0.1 ms magnetic flux for the straight source, bent source, and their difference, respectively; e,f,g—1 ms magnetic flux for the straight source, bent source, and their difference, respectively; h,i,j—10 ms magnetic flux for the straight source, bent source, and their difference, respectively

图 6　磁通量切面

Fig. 6　Cross-sectional views of magnetic flux



a—直线源多测道图；b—弯曲源多测道图；c—直线源和弯曲源多测道图差值

a—multichannel response profile for the straight source; b—multichannel response profile for the bent source; c—difference between the multichannel response profile of the stright and bent sources

图 7　多测道图

Fig. 7　Multichannel response profiles

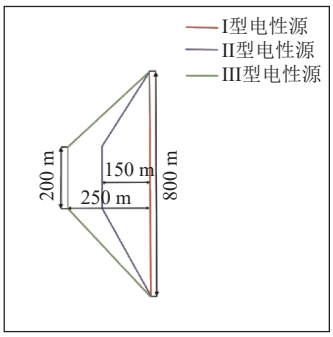


图 8　不同弯曲程度发射源示意

Fig. 8　Schematic of transmitting sources with different bending degrees

明内凹侧的电磁场强度更为理想, 适合观测。

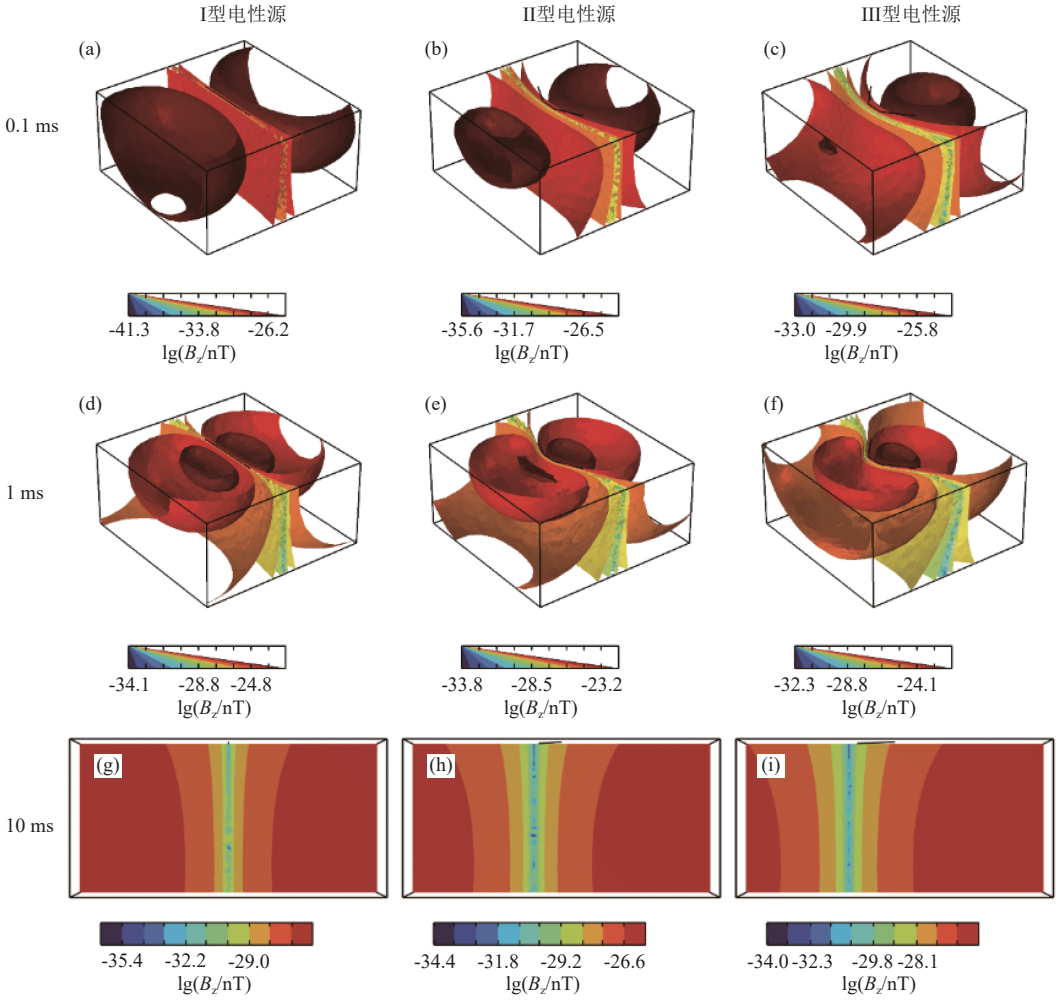
2.3　纵向起伏电性源形态分析

在前文中, 我们分析了位于水平地表的电性源形态对电磁场扩散的影响, 这一分析仅涉及了电性源的横向变化。然而, 在实际野外勘探中, 电性源常受到地形起伏的影响。为了更贴近实际情况, 接下来我们将利用地形起伏模型模拟电性源纵向弯曲分布对电磁场扩散及数据采集的影响。

2.3.1　山峰模型模拟

为研究地形隆起对电性源纵向起伏的影响, 首先构建了如图 10 所示的山峰模型。山峰的最高点设为 300 m, 电性源沿山脊布设, 测网分布在高程 340 m 区域内, 覆盖范围为 2 000 m × 2 000 m。将山峰模型进行网格剖分后, 带入三维正演程序, 计算 0.1~10 ms 时刻的电磁场分布。

为分析山峰地形条件下电性源弯曲与起伏形态对电磁场分布的影响, 将山峰模型的三维正演结果与第 2.1 节中水平地表直线型电性源模型的结果进行对比(见图 11)。图中给出了 0.1 ms、1 ms 和 10 ms

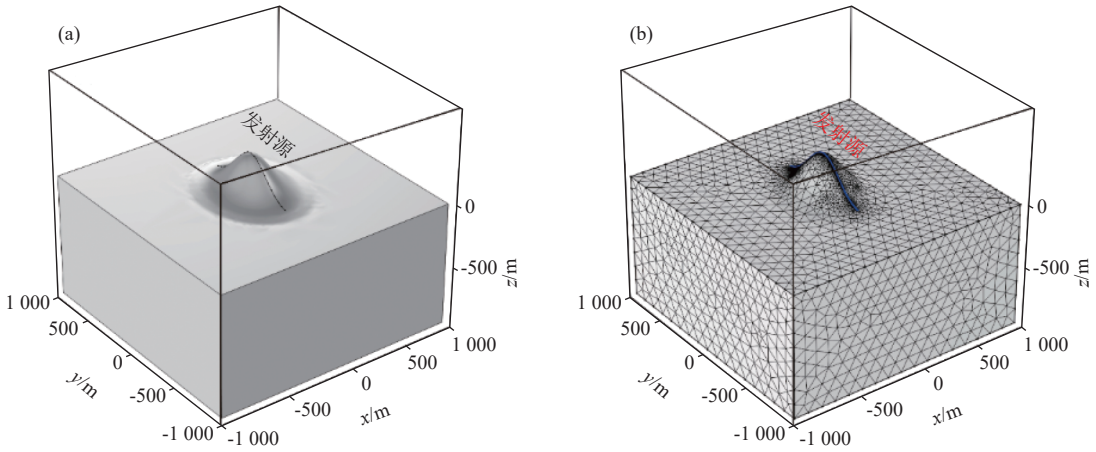


a、b、c—0.1 ms 时刻Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型电性源等值面; d、e、f—1 ms 时刻Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型电性源等值面; g、h、i—10 ms 时刻Ⅰ型、Ⅱ型、Ⅲ型电性源等值面

a, b, c—iso-surfaces of the type-I, type-II, and type-III electrical sources at 0.1 ms, respectively; d,e,f—iso-surfacesofthe type-I, type-II, and type-III electrical sources at1 ms, respectively;g,h,i—iso-surfaces of the type-I, type-II, and type-III electrical sources at 10 ms, respectively

图 9　不同形态电性源等值面对比

Fig. 9　Comparison of iso-surfaces for different source configurations



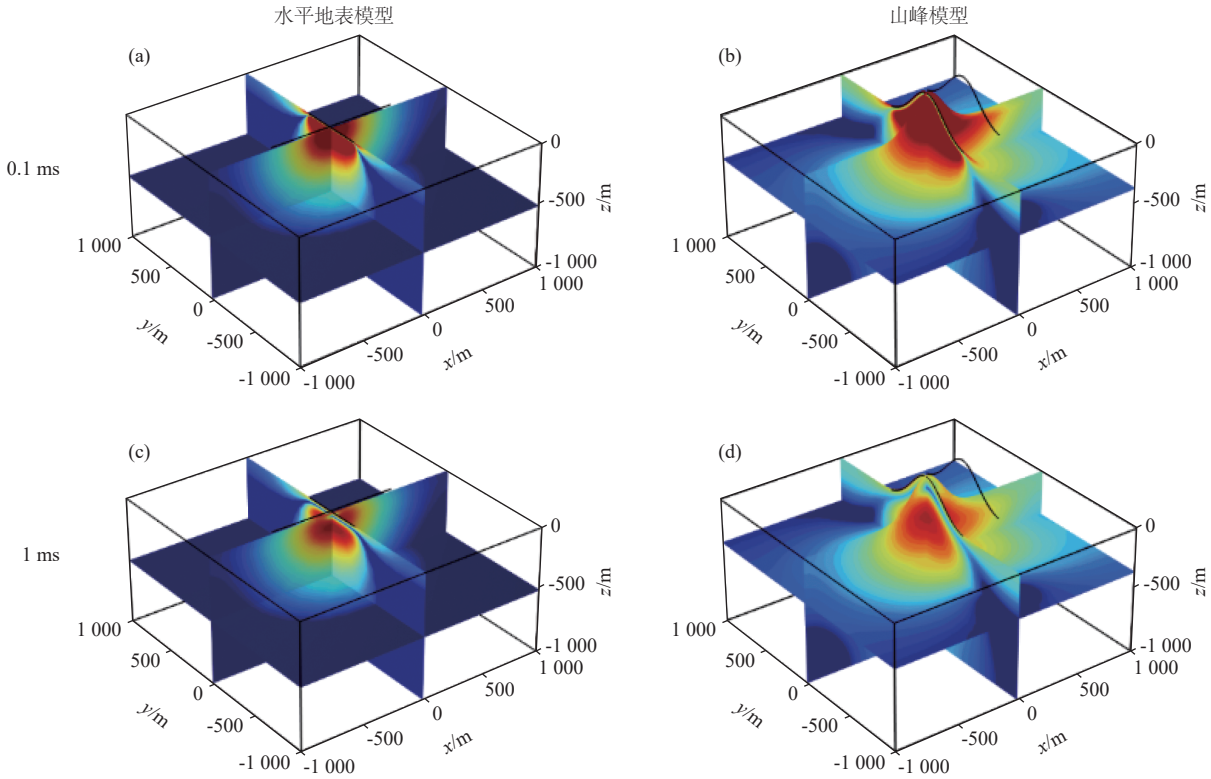
a—山峰模型示意; b—山峰模型网格剖分结果

a—schematic of the peak model; b—mesh of the peak model

图 10　山峰模型示意及网格剖分结果

Fig. 10　Schematic and mesh division of the peak model

共 3 个典型时刻的磁感应强度分布。结果表明, 山峰地形显著改变了电磁场的时空分布特征。在早期阶段(0.1 ms), 电磁能量主要集中于山体上方及两侧, 表现为场强集中和浅部响应增强, 与水平地表模型相比, 电磁场的有效分布范围明显减小。至 1 ms 时刻, 电磁场在空间上逐渐扩展, 但能量依然在山体区域保持较强集中。至 10 ms 后, 电磁场分布形态趋于与水平地表模型一致, 表明地形影响主要作用于早期至中期响应阶段。进一步结合图 12 所示高程 330 m 处的平面等值线结果可见, 山峰模型下电

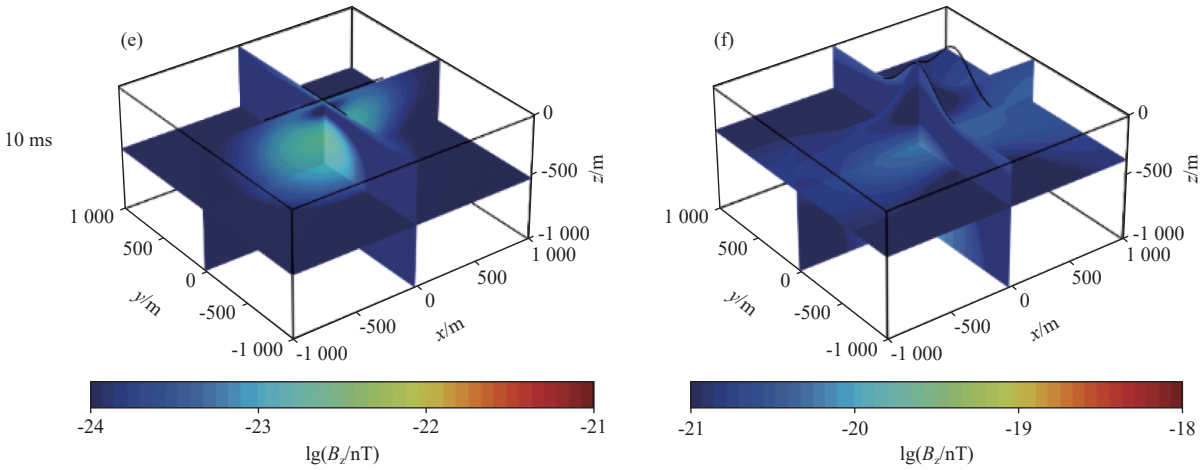


a、c、e—分别为水平模型发射源 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量场值空间分布; b、d、f—分别为山峰模型发射源 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量场值空间分布

a,c,e—spatial distributions of magnetic flux field values for the flat-surface model transmitter source at 0.1 ms,1 ms,and10 ms,respectively; b,d,f—spatial distributions of magnetic flux field values for the peak-model transmitter source at the same times, respectively

图 11-1　水平与山峰模型磁通量分布对比

Fig. 11-1　Magnetic flux distribution comparison between the flat and the peak model

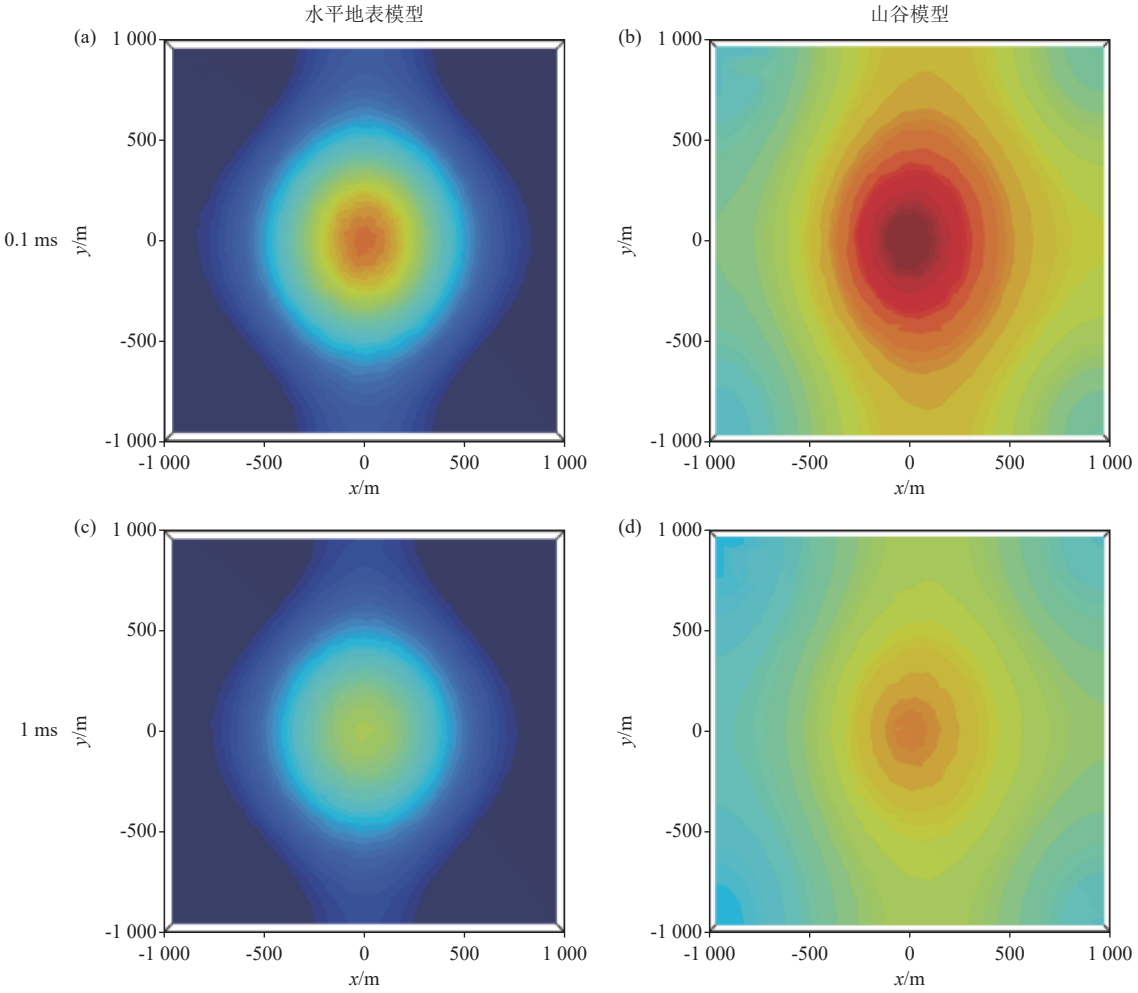


a、c、e—分别为水平模型发射源 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量场值空间分布；b、d、f—分别为山峰模型发射源 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量场值空间分布

a,c,e—spatial distributions of magnetic flux field values for the flat-surface model transmitter source at 0.1 ms,1 ms,and 10 ms,respectively;b,d,f—spatial distributions of magnetic flux field values for the peak-model transmitter source at the same times, respectively

图 11-2　水平与山峰模型磁通量分布对比

Fig. 11-2　Magnetic flux distribution comparison between the flat and the peak models

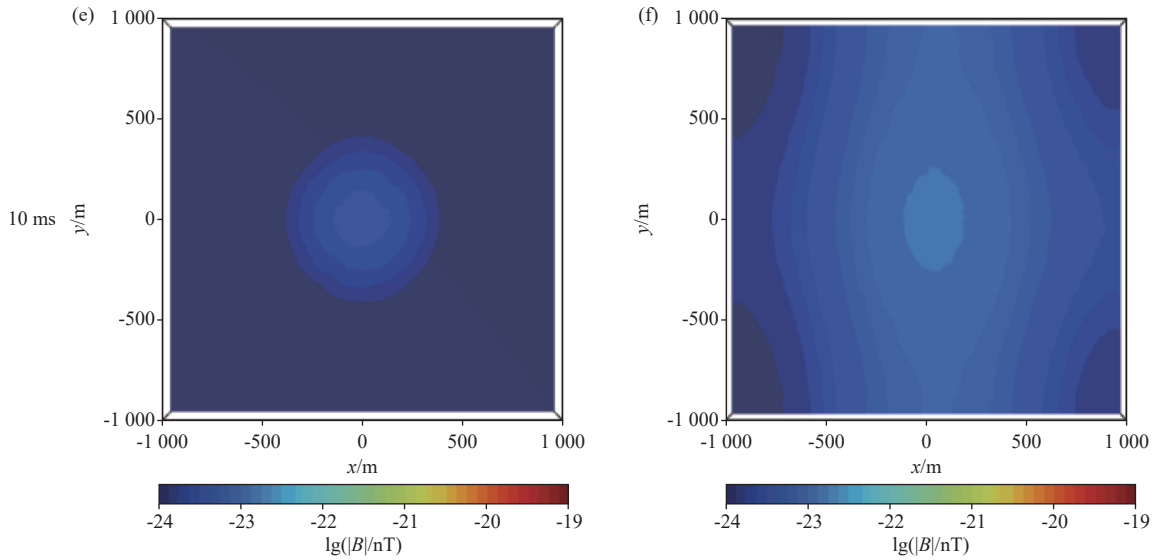


a、c、e—水平地表模型在 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量平面等值线；b、d、f—山峰模型在 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量平面等值线；

a,c,e—planar magnetic flux contour plots for the flat-surface model at 0.1 ms, 1 ms, and 10 ms, respectively;b,d,f—planar magnetic flux contour plots for the peak model at the same times, respectively

图 12-1　不同模型磁通量平面等值线对比

Fig. 12-1　Planar contour plots of magnetic flux for different models



a、c、e—水平地表模型在 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量平面等值线; b、d、f—山峰模型在 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量平面等值线; a,c,e—planar magnetic flux contour plots for the flat-surface model at 0.1 ms, 1 ms, and 10 ms, respectively;b,d,f—planar magnetic flux contour plots for the peak model at the same times, respectively

图 12-2　不同模型磁通量平面等值线对比

Fig. 12-2　Planar contour plots of magnetic flux for different models

性源的弯曲形态导致电磁场空间分布发生畸变, B 场在 xy 平面上出现一定程度的拉伸与偏移, 反映出地形耦合对电磁响应的非对称影响。

为定量分析山峰地形对电磁场响应的影响, 以水平地表模型为基准, 在飞行高度 30 m 处设置范围 2 000 m×2 000 m 的测网, 计算山峰模型相对于平地模型的磁场相对畸变率, 并绘制 0.01 ms、0.1 ms 和 1 ms 时刻的畸变率等值线分布(图 13)。结果表明, 山峰地形显著改变了电磁场的空间分布特征。早期阶段(0.01~0.1 ms), 畸变范围较小, 主要集中于山峰顶部及其两侧; 至 1 ms 时, 畸变率达到最大, 空间分布范围显著扩大; 随后随时间延迟(>10 ms), 畸变范围逐渐分布在整个测网范围。总体上, 电磁场畸变随着时间推移变大, 并在山峰区域呈轴对称分布, 表明地形起伏对电磁响应的影响主要表现为局部场增强和能量集中效应。

为比较不同采集方式对电磁响应的影响, 本文分别模拟了两种飞行测线方案: 一种为高程固定飞行测线, 另一种为随地形起伏变化的飞行测线。图 14 展示了两种方案下的多测道磁场分布对比结果。可以看出, 在固定高程测线中, 受地形起伏及发射源形态畸变的共同影响, 电磁响应曲线在山峰上方出现了类似低阻体的假异常特征, 表现为 B_z 和 $|B|$ 曲线的异常抬升与局部波动。而在随地形变化的飞行测线中, 这些假异常得到显著抑制, 曲线形态更加平滑, 为了定性分析采集方案对假性异常的压制, 利用水平地表模型的水平测线采集数据与两种采集方案数据结果进行对比, 计算假异常矫正系数, 绘制不同 0.1~10 ms 时间道的校正系数结果(图 15), 最大矫正率为 64.47%, 矫正率以中心为轴, 呈现两端对称的形态, 两端值逐渐增大; 并且对于中早期矫正效果较好, 说明沿地表起伏飞行的采集方式能够在山峰地形区域在测线两端对假异常达到有效的矫正作用。地形跟随式采集方案能够有效减弱源畸变与地形耦合效应引起的视电阻率假异常, 提高数据的空间一致性和解释可靠性。

为了进一步分析电性源纵向起伏程度对电磁场扩散过程的影响, 本文模拟了不同纵向起伏程度的山峰模型(图 16)。山峰模型的峰顶高程分别为 100 m(Ⅰ型电性源模型)、200 m(Ⅱ型电性源模型)和 300 m(Ⅲ型电性源模型)。我们分别对这 3 种模型进行正演模拟, 并在 0.1 ms 和 1 ms 时刻绘制三维空间的 B_z 等值面(图 17)。

对比 3 种模型在 0.1 ms 与 1 ms 时刻的 B_z 分量等值面分布(图 17)。结果显示, 在相同场强阈值条件下, Ⅰ型电性源模型的电磁场分布范围最广, Ⅱ型次之, Ⅲ型最小, 表明电性源几何形态对场能量的空间分布具有显著影响。随着时间延迟至 1 ms, 各模型的电磁场分布体积均有所扩大, 但Ⅰ型模型的场能覆盖范围仍明显大于其他两种模型, 且差异进一步增强。这说明, 电性源形态的平直度越高, 其激发的电磁场能量传播越充分, 探测深度与有效覆盖范

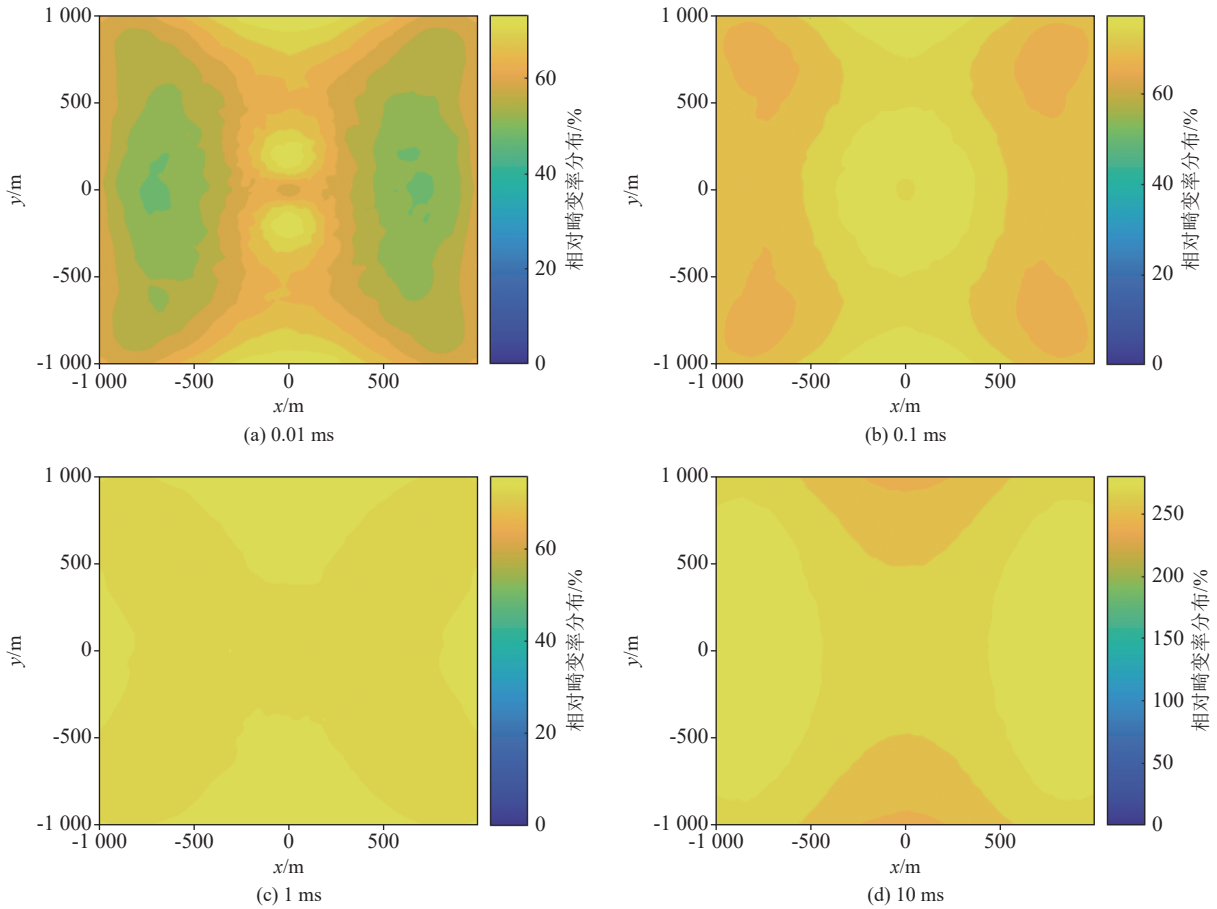
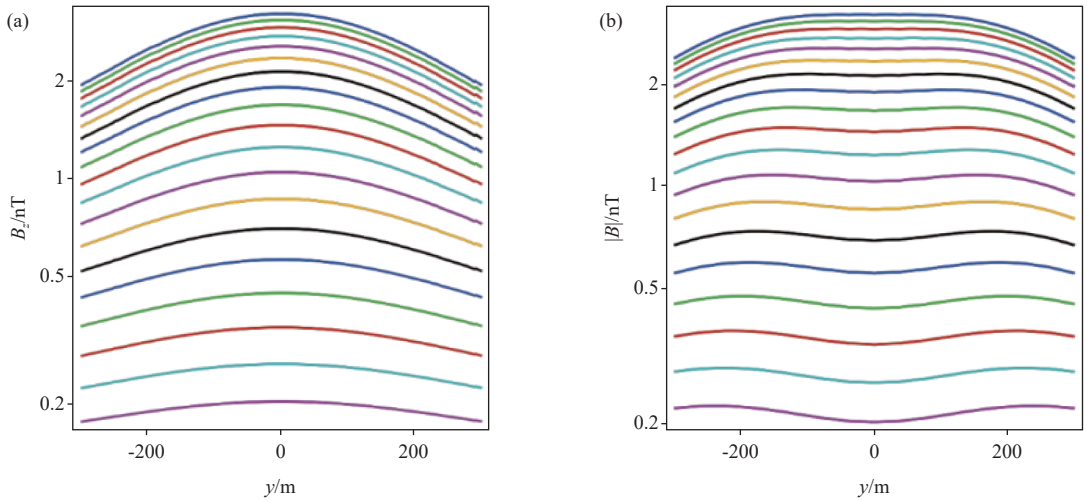


图 13　不同时间道下山峰模型相对畸变率空间分布

Fig. 13　Spatial distribution of relative distortion rate of the magnetic field for the mountain-peak model at different time channels



a—固定高程测线; b—高程随地形起伏测线

a—fixed-elevation flight path; b—terrain-following flight path

图 14　山峰模型不同飞行模式下响应对比

Fig. 14　Comparison of responses under different flight modes in the peak model

围越大; 而当源线弯曲程度增加时, 电磁场的有效辐射体积随之减小, 探测能力相应降低。

为进一步定量分析山峰高度对电磁场畸变特征的影响, 本文构建了山峰高度分别为 100 m、200 m 和 300 m 的 3 种地形模型, 并计算了其在相同飞行高度处的相对畸变率分布(图 18), 平均畸变率结果列于表 2。结果显示, 随着山峰高度的增加, 电磁场的畸变程度显著增强。在 0.01 ms 时刻, 3 种模型的

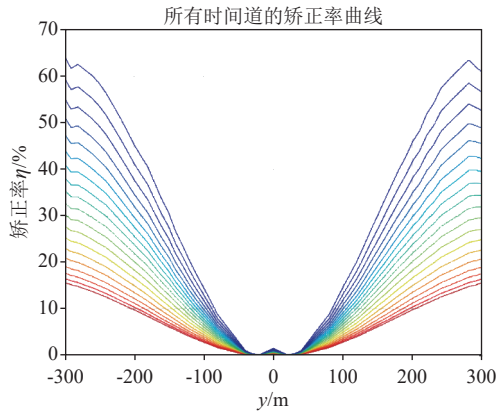


图 15 假性异常矫正率曲线

Fig. 15 Pseudo-aberration correction rate

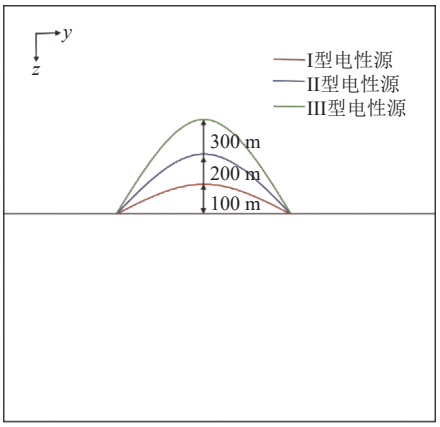


图 16 不同山峰模型示意

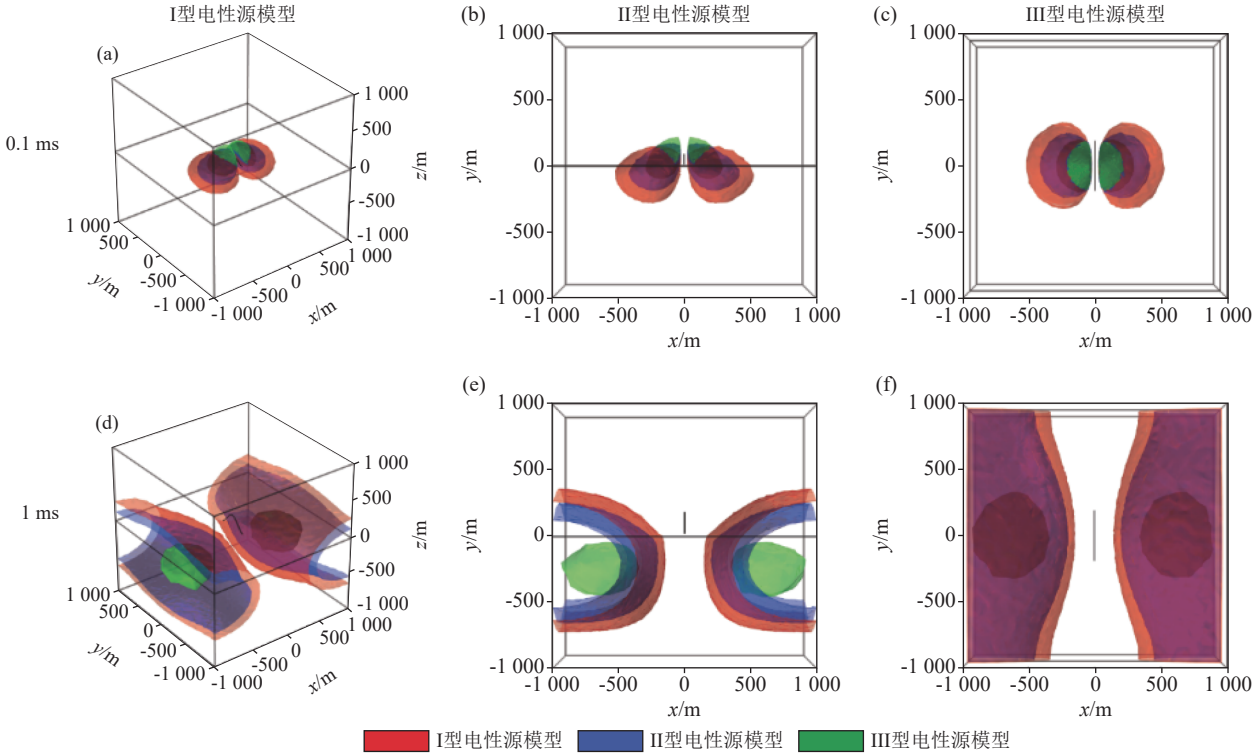
Fig. 16 Schematic of different peak models

平均畸变率分别为 29.17%、48.02% 和 62.36%，表明山峰高度对早期电磁场的影响较为明显；当时间延长至 0.1 ms 和 1 ms 时，畸变率进一步增大，且随山峰高度呈持续上升趋势，最高可达 79.15%。这种趋势表明，地形起伏越大，电磁场的局部畸变效应越强，能量分布越不均匀。

从空间分布特征来看(图 18)，在早期阶段(0.01 ms)，畸变率高值区主要集中于山体顶部及两侧区域，呈明显的环状分布，说明电磁能量在山峰附近发生局部聚集；随着时间推移至 0.1 ms，畸变范围逐渐扩大，场值分布呈现出近似轴对称特征；至 1 ms 阶段，畸变区范围进一步扩大且向深部扩散，但整体畸变幅度趋于稳定。综合来看，山峰地形会在早期阶段显著增强浅部电磁场畸变，且随着山体高度的增加，这种集中效应进一步放大，使得电磁响应对地形起伏更加敏感。

2.3.2 山谷模型模拟

为研究地形凹陷导致的纵向弯曲电性源对电磁场分布的影响，本文设计了如图 19 所示的山谷模型，并开展了三维正演模拟。模型中山谷最低点高



a、b、c—0.1 ms 时刻 3 种不同高程山峰模型三维等值面；d、e、f—1 ms 时刻 3 种不同高程山峰模型三维等值面

a,b,c—3D iso-surfaces of magnetic flux for three peak models with different elevations at 0.1 ms, respectively;d,e,f—3D so-surfaces of magnetic flux for the same models at 1 ms, respectively

图 17 不同山峰模型三维等值面

Fig. 17 3D iso-surfaces of magnetic flux in different peak models

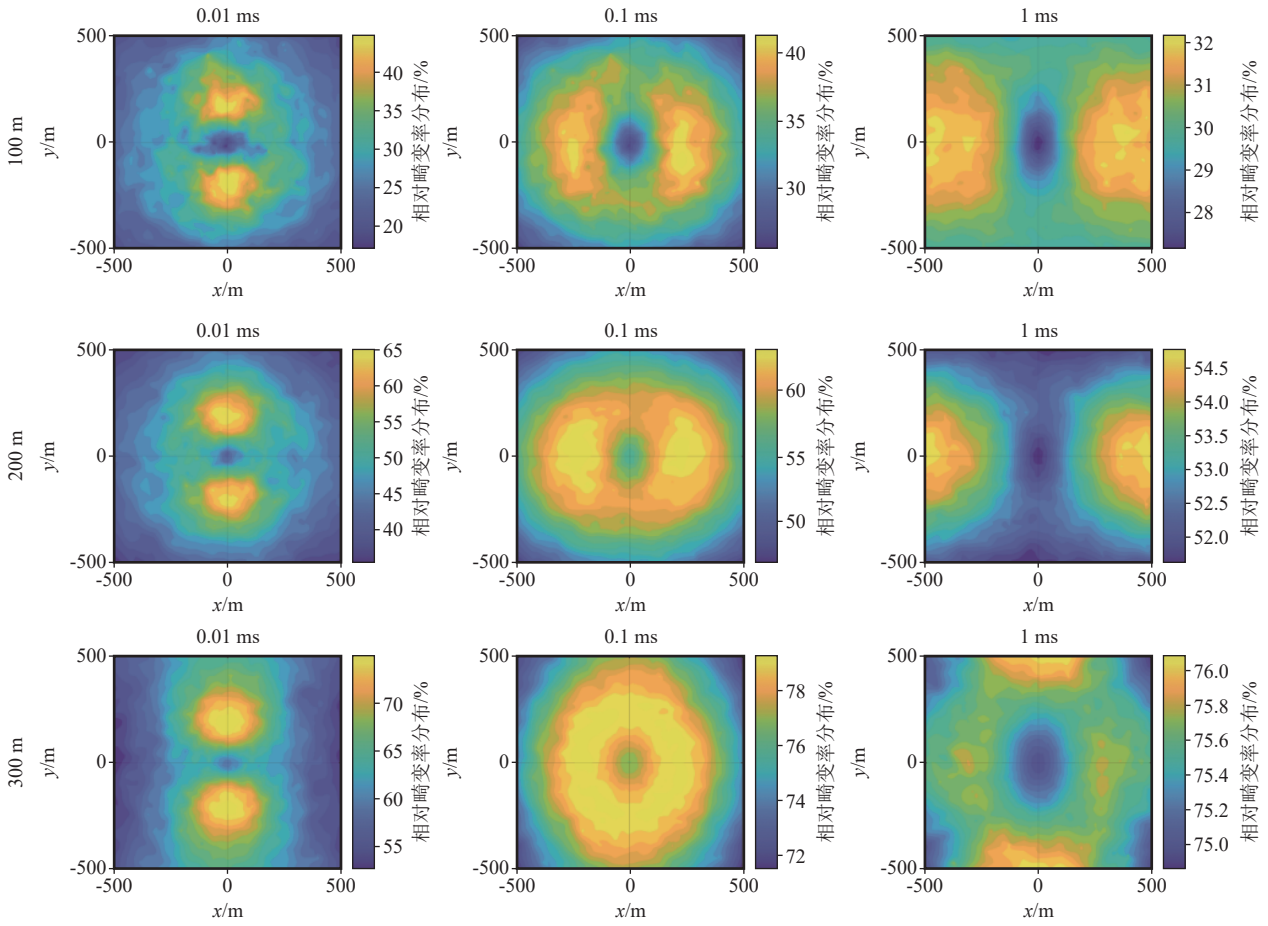


图 18　不同山峰高度下电磁场相对畸变率的时间演化特征

Fig. 18　Temporal evolution of relative distortion rate of electromagnetic fields under different mountain-peak heights

表 2　不同山峰高度畸变率平均值

Table 2　Average distortion rate of different peak heights

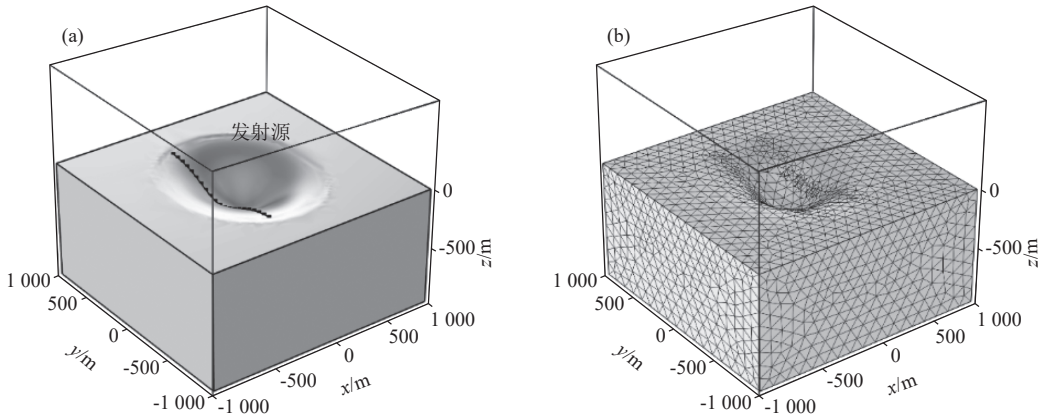
山峰高度/m	不同时刻的畸变率平均值		
	0.01 ms时刻	0.1 ms时刻	1 ms时刻
100	29.17%	35.14%	38.62%
200	48.02%	57.89%	63.08%
300	62.36%	72.65%	79.15%

程设为−300 m, 电性源沿山谷右侧布设并穿过谷底形成弯曲形态, 测网布设于高程 30 m 处, 覆盖范围为 2 000 m ×2 000 m。将山谷模型的模拟结果与水平地表模型进行对比, 得到不同时间道下的磁感应强度三维分布(图 20)。

结果表明, 山谷地形显著改变了电磁场的空间分布特征。在早期阶段(0.1 ms), 电磁场能量主要集中于山谷底部。随着时间延迟(1~10 ms), 山谷模型的电磁场逐渐向深部传播, 其分布范围持续扩大, 并在晚期阶段(10 ms)与水平地表模型的响应形态趋于一致。根据电磁扩散理论分析, 这种差异主要源于地形凹陷导致的能量再分配: 部分原本向空气层扩散的电磁能量被引导进入地下介质, 从而增强了地下场强并扩大了电磁耦合范围。

为了进一步分析不同飞行测线对山谷模型数据结果的影响, 本文分别采用了高程保持不变的飞行测线和高程随地形起伏变化的飞行测线, 并绘制了多测道图(图 21)。图 21a 中, 由于山谷地形和电性源形态的影响, 固定高程的飞行测线数据出现了类似高阻体的假异常, 表现为多测道图中的局部场值异常抬升。而在图 21b 中, 当测线高程随地形起伏变化时, 这些假异常得到了一定程度的校正, 场值分布趋于平滑, 表现出更符合实际地形的电磁响应特征。进一步定量分析采集方案对数据的矫正作用, 通过两种采集方案数据与理想模型(水平地表模型)计算假异常矫正率, 绘制矫正率曲线(图 22)。矫正率最大值为 46.98%, 略小于山峰模型的矫正率, 同时矫正率的分布呈现中心对称心态, 中间值最高; 并且对于中早期矫正效果最好, 说明沿地表起伏飞行的采集方式能够在山谷区域在测线中心对假异常达到最佳矫正。综上, 随地形变化的飞行测线能够有效抑制由地形起伏和电性源形态引起的假异常, 从而提高数据的准确性和解释可靠性。

为进一步分析电性源弯曲程度对山谷模型电磁场响应的影响, 本文设计了 3 组具有不同弯曲程度

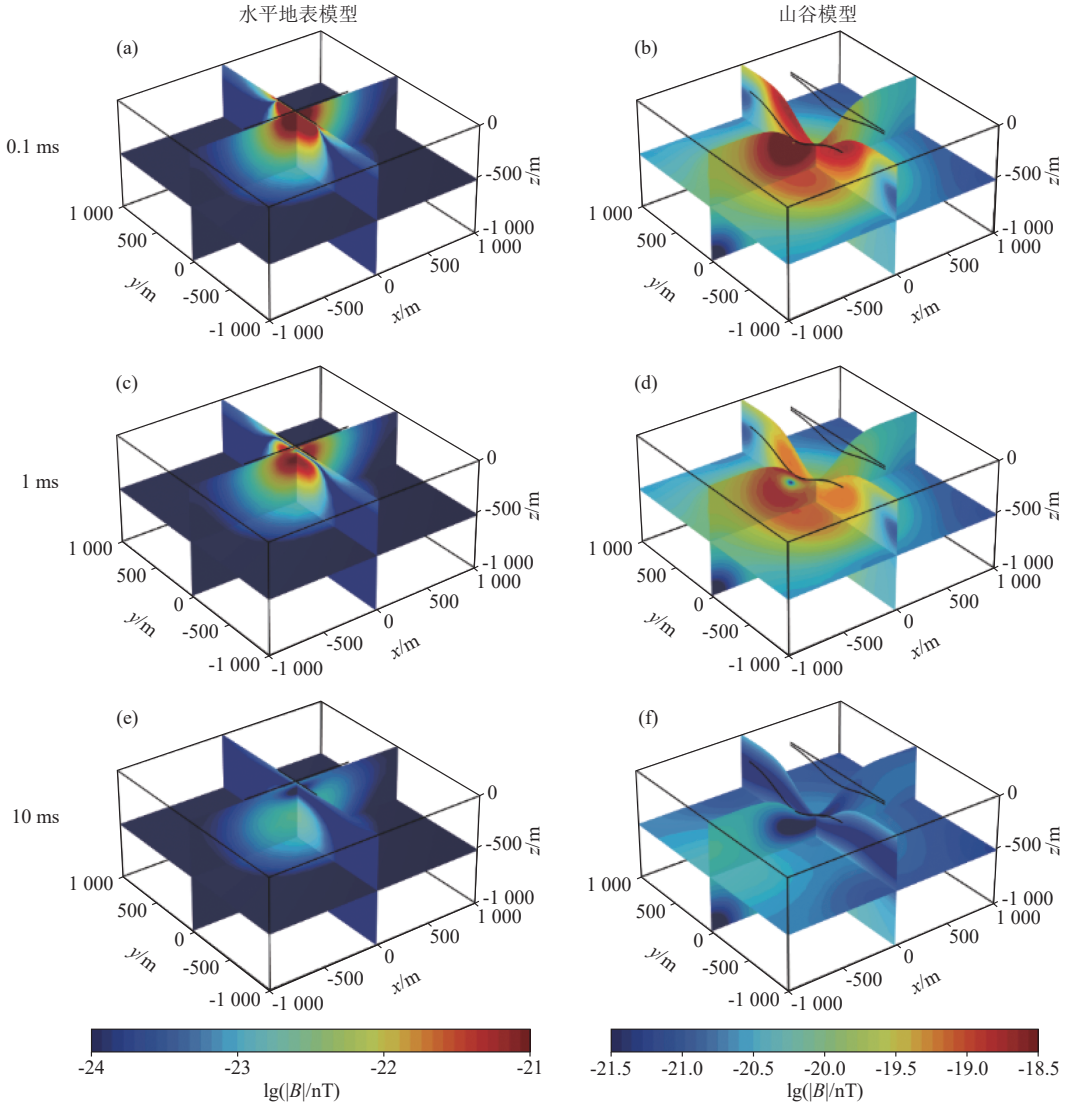


a—山谷模型示意；b—山谷模型网格剖分结果

a—schematic of valley model; b—mesh division of the valley model

图 19　山谷模型示意图及网格剖分结果

Fig. 19　Schematic and mesh of the valley model

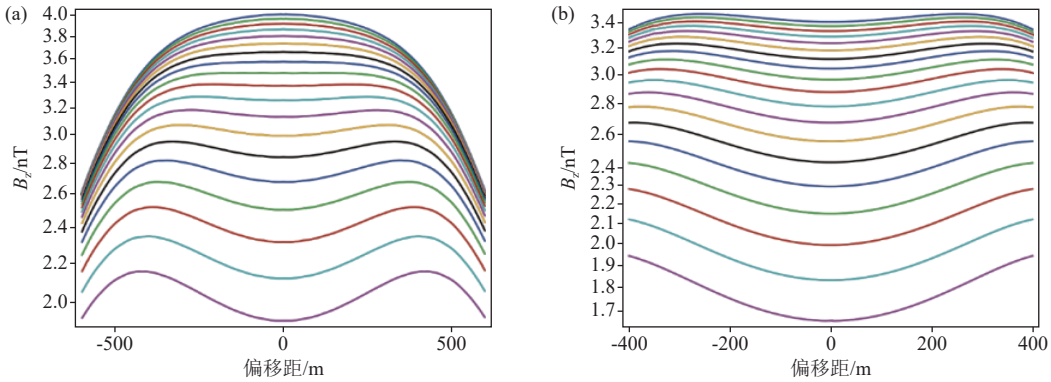


a、b、c—水平地表垂直发射源 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量场值空间分布；d、e、f—山峰形态弯曲发射源 0.1 ms、1 ms 和 10 ms 时刻磁通量场值空间分布

a,b,c—vertical straight source over flat terrain at 0.1 ms, 1 ms, and 10 ms; d,e,f—bent source over peak terrain at the same times

图 20　山峰模型磁通量分布对比

Fig. 20　Comparison of magnetic flux distributions between peak and flat models



a—飞行测线高程固定; b—飞行测线高程随地形变化

a—fixed-elevation flight line; b—terrain-following flight line

图 21　山谷模型不同飞行测线下电磁响应曲线

Fig. 21　Electromagnetic response curves under different flight lines in valley model

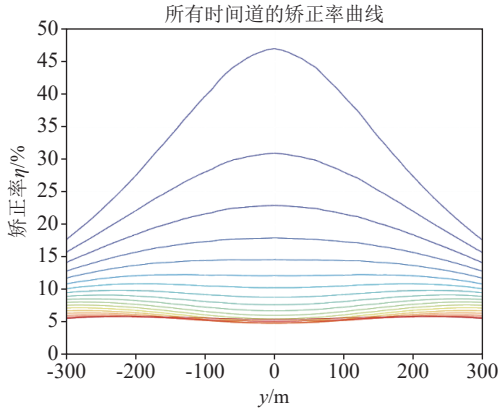


图 22　山谷模型假异常矫正率曲线

Fig. 22　Valley model pseudo-anomaly correction rate

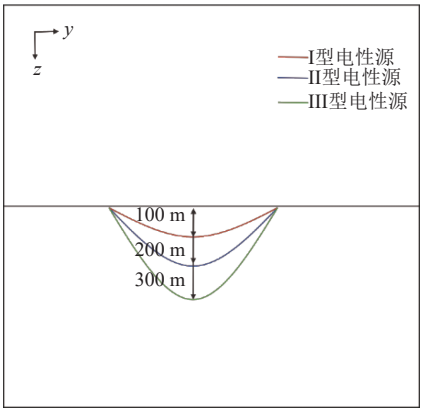
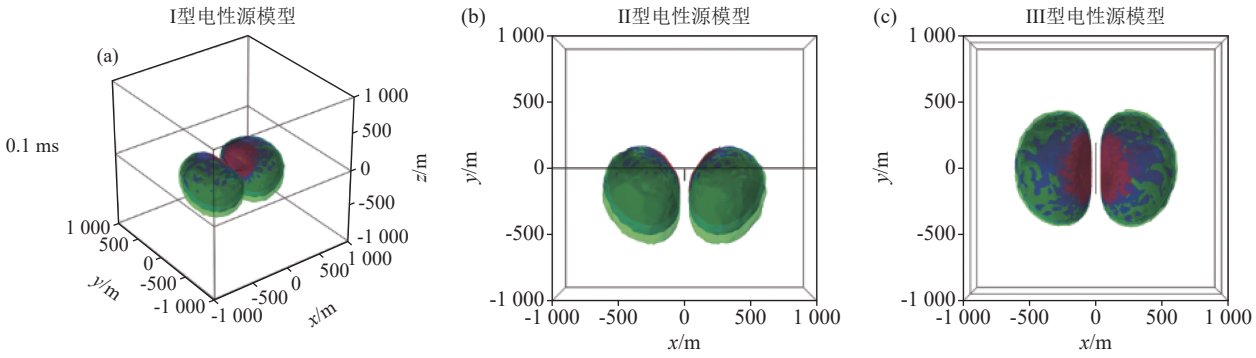


图 23　山谷模型不同电性源示意

Fig. 23　Schematic of different grounded sources in the valley model

的山谷模型(图 23), 并对这 3 个模型进行了正演计算。图 24 展示了这 3 种模型在 0.1 ms 和 1 ms 时刻的 B_z 分量等值面。从图中可以看出, Ⅲ型电性源模型在相同时间下展现出最大的电磁场分布范围, 表明该模型在相同条件下具有更强的探测能力。这一结果表明, 随着电性源弯曲程度的增加, 电磁场的有效分布范围逐渐缩小, 进一步验证了源形态对电磁响应的影响。

为定量分析山谷深度对电磁场畸变特征的影响, 分别计算了山谷深度为 100 m、200 m 和 300 m 共 3 种地形模型在相同飞行高度处的相对畸变率分

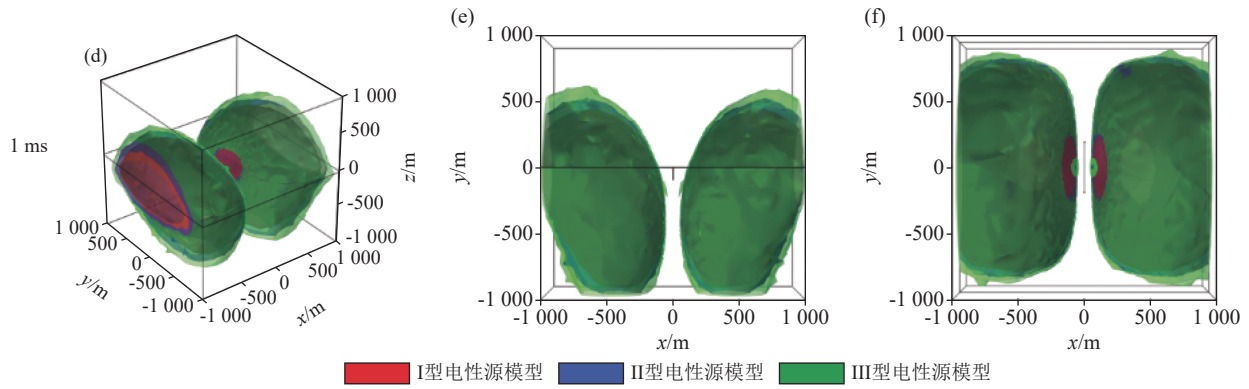


a、b、c—0.1 ms 时刻 3 种不同高程山谷模型三维等值面; d、e、f—1 ms 时刻 3 种不同高程山谷模型三维等值面

a,b,c—3D iso-surfaces of magnetic flux for three valley models with different elevations at 0.1 ms, respectively; d,e,f—3D iso-surfaces of magnetic flux for the same models at 1 ms, respectively

图 24-1　不同山谷模型三维等值面

Fig. 24-1　3D iso-surfaces of magnetic flux in different valley models



a、b、c—0.1 ms 时刻 3 种不同高程山谷模型三维等值面; d、e、f—1 ms 时刻 3 种不同高程山谷模型三维等值面

a,b,c—3D iso-surfaces of magnetic flux for three valley models with different elevations at 0.1 ms, respectively; d,e,f—3D iso-surfaces of magnetic flux for the same models at 1 ms, respectively

图 24-2　不同山谷模型三维等值面

Fig. 24-2　3D iso-surfaces of magnetic flux in different valley models

布(图 25), 并提取了不同时间道下的平均畸变率结果(表 3)。结果显示, 随着山谷深度的增加, 电磁场畸变率整体呈上升趋势。在 0.01 ms 时刻, 平均畸变率随深度由 11.94% 增至 13.20%, 表明地形凹陷增强了电磁场在谷底及其两侧的局部能量汇聚效应; 至 0.1 ms 时刻, 3 种模型的平均畸变率均显著上升, 分别达到 41.29%、40.75% 和 43.00%; 在 1 ms 时刻, 畸变差异进一步拉大, 300 m 深山谷模型的平均畸变率达 76.07%, 显著高于浅谷模型。这表明, 山谷越深, 电磁能量的下传与局部耦合越强, 导致电磁场畸变效应的增强。

在空间分布特征上(图 25), 山谷模型在早期阶段(0.01 ms)中, 畸变率高值区主要集中于谷底中心区域, 表现为典型的轴对称结构。随着时间推移至

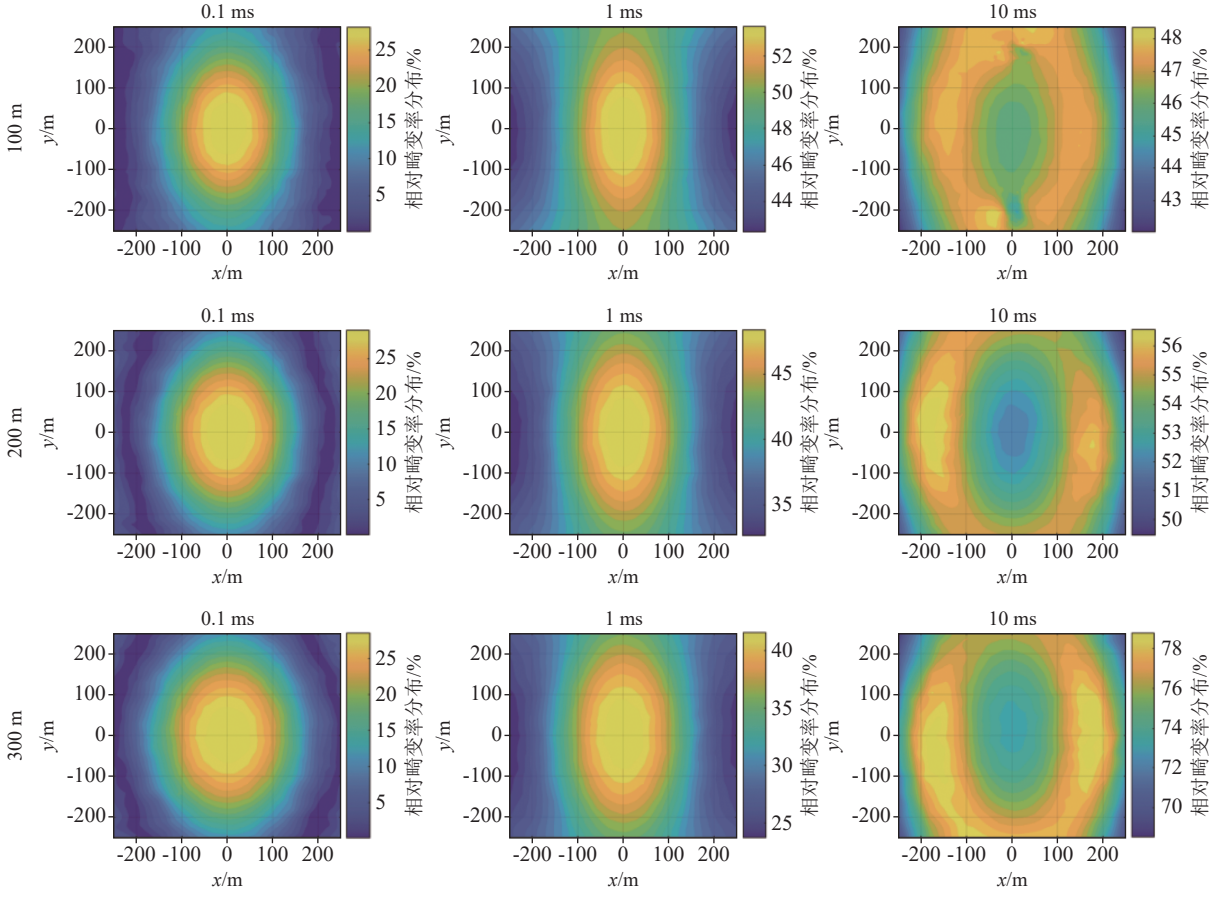


图 25　不同深度山谷模型电磁强度畸变分布

Fig. 25　Distribution of electromagnetic intensity distortion in valley models at different depths

表 3　山谷模型平均畸变值随时间分布

Table 3　Temporal distribution of average distortion values in the valley model

山谷深度/m	不同时刻平均畸变值		
	0.01 ms时刻	0.1 ms时刻	1 ms时刻
100	11.94%	41.29%	46.52%
200	12.27%	40.75%	54.36%
300	13.20%	43.00%	76.07%

0.1 ms, 畸变范围沿山谷走向显著扩大, 浅部场能的水平扩散增强, 呈现明显的椭圆状分布; 至 1 ms 阶段, 畸变区进一步向深部发展, 谷底区域出现高畸变闭合区, 其范围与山谷深度呈正相关。整体来看, 山谷地形的凹陷效应强化了电磁场在地下介质中的聚集与传导, 导致平均畸变率随地形深度与时间的增加呈持续增长趋势。

3　总结

本研究基于三维有限元数值模拟, 系统分析了电性源形态及地形起伏对地空瞬变电磁(SATEM)法电磁场响应的影响规律, 定量评估了地形条件、电性源布设方式以及飞行测线策略对电磁场畸变的贡献机制。主要结论如下:

1)电性源形态对电磁场扩散特性的影响显著。电性源的弯曲与起伏会改变电磁场的扩散路径及能量分布特征, 导致场响应在空间上出现非对称畸变。模拟结果表明, 电性源的几何形态对早期时道(<1 ms)的电磁响应影响最为敏感, 源线平直度越高, 电磁能量传播越充分, 探测深度越大; 而源线弯曲或受地形约束时, 则易产生局部场强集中和假异常特征。

2)地形起伏显著影响电磁场能量分布。山峰和山谷模型对电磁场响应的影响方向相反。山峰地形使电磁场能量集中于浅部区域, 早期场强增强但探测深度受限; 山谷地形则强化了地下耦合效应, 扩大了电磁能量的传播范围, 深部响应增强。定量结果显示, 山峰高度和山谷深度的增加均会引起平均畸变率显著上升, 其中山峰模型在 1 ms 时最大平均畸变率达 79.15%, 而山谷模型则达 76.07%, 表明地形起伏幅度与畸变程度呈正相关关系。

3)飞行测线方式对数据精度具有关键作用。对比高程固定与地形跟随式两种飞行方案发现, 固定高程测线易受源畸变与地形耦合的影响, 产生明显的假异常; 地形跟随式测线能够有效抑制这种畸变, 使磁场曲线形态更加平滑, 假异常幅度平均降低约 40%, 显著提升了数据的空间一致性与解释可靠性。

4)地形—源耦合机制揭示 SATEM 系统的关键约束条件。电性源形态与地形起伏的耦合作用是导致电磁场畸变的重要来源。研究结果揭示了电磁能量在复杂地形下的再分配规律: 山峰引起能量上移与集中, 山谷促进能量下传与扩散。该机制为复杂地形条件下的源设计、数据采集与解释提供了量化依据。

综上所述, 本研究不仅定量揭示了地形起伏与电性源形态对电磁响应的耦合机制, 也验证了地形跟随式飞行测线在减少假异常和提升探测精度方面的有效性。研究成果为复杂地形区域 SATEM 系统的优化布设与深部资源探测提供了理论支持和技术指导。

参考文献(References):

[1] 陈本池, 周凤桐, 李金铭, 等. 瞬变电磁场的波场变换研究 [J]. 物探与化探, 1999, 23(3): 195−201.
Chen B C, Zhou F T, Li J M, et al. Study on wavefield transformation of transient electromagnetic field[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1999, 23(3): 195−201.

[2] 陈卫营, 薛国强, 崔江伟, 等. 电性源瞬变电磁发射源形变对观测结果影响分析 [J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 126−132.
Chen W Y, Xue G Q, Cui J W, et al. Analysis of the influence of deformation of electric-source TEM transmitter on observation results [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 126−132.

[3] 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128−2138.
Di Q Y, Zhu R X, Xue G Q, et al. Advances in new electromagnetic detection technologies for deep resources in China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2128−2138.

[4] 李帝铨, 刘子杰, 胡艳芳, 等. 基于站间传递函数的人工源电磁法有效信号提取 [J]. 地球物理学报, 2025, 68(2): 746−758.
Li D Q, Liu Z J, Hu Y F, et al. Effective signal extraction in controlled-source electromagnetic method based on inter-station transfer function[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2025, 68(2): 746−758.

[5] 嵇艳鞠, 王远, 徐江, 等. 无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3640−3650.
Ji Y J, Wang Y, Xu J, et al. Long-wire source time-domain airborne electromagnetic exploration system based on unmanned airship and its application[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3640−3650.

[6] 何继善. 电法勘探的发展和展望 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(S1): 308−316.
He J S. Development and prospect of electrical prospecting[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1997, 40(S1): 308−316.

[7] 薛俊杰, 程久龙, 韩杨春, 等. 钻孔瞬变电磁法拟地震全波形反演 [J]. 地球物理学报, 2024, 67(9): 3630−3639.
Xue J J, Cheng J L, Han Y C, et al. Pseudo-seismic full-waveform inversion for borehole transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(9): 3630−3639.

[8] 田忠斌, 马玉龙, 李貅, 等. 煤层采空区内煤层气储气构造半航空瞬变电磁探测——以沁水煤田为例 [J]. 地球物理学报, 2022, 65(11): 4495−4503.
Tian Z B, Ma Y L, Li X, et al. Semi-airborne transient electromag-

netic detection of coalbed methane reservoir structures in goaf areas: A case study from Qinshui coalfield[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(11): 4495−4503.

[9] 薛国强, 李貅, 底青云, 等. 瞬变电磁法正反演问题研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1165−1172.
Xue G Q, Li X, Di Q Y, et al. Advances in forward and inverse problems of transient electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1165−1172.

[10] 刘富波, 李巨涛, 刘丽华, 等. 无人机平台半航空瞬变电磁勘探系统及其应用 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2222−2229.
Liu F B, Li J T, Liu L H, et al. Semi-airborne transient electromagnetic exploration system based on UAV platform and its application[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 2222−2229.

[11] 王金梅. 无人机半航空瞬变电磁信号接收技术研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
Wang J M. Research on signal receiving technology for UAV-based semi-airborne transient electromagnetic system[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.

[12] 薛国强. 短偏移距瞬变电磁法探测技术与应用研究新进展 [J]. 物探与化探, 2024, 48(5): 1165-1168.
XUE Guo-Qiang. New progress in the technology and applications of SOTEM. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(5): 1165-1168.

[13] 陈卫营, 薛国强, 李海. SOTEM 野外数据采集中的关键参数分析 [J]. 物探与化探, 2024, 48(5): 1169-1175.
CHEN Wei-Ying, XUE Guo-Qiang, LI Hai. Analysis of critical parameters in the field acquisition of short-offset transient electromagnetic data. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(5): 1169-1175.

[14] 薛国强, 李貅, 戚志鹏, 等. 瞬变电磁拟地震子波宽度压缩研究 [J]. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1384−1390.
Xue G Q, Li X, Qi Z P, et al. Study on compression of pseudo-seismic wavelet width in transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(5): 1384−1390.

[15] 薛国强, 于景邨. 瞬变电磁法在煤炭领域的研究与应用新进展 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 319−326.
Xue G Q, Yu J C. New progress in research and application of transient electromagnetic method in coal industry[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 319−326.

[16] Zhou N N, Xue G Q, Hou D Y, et al. An investigation of the effect of source geometry on grounded-wire TEM surveying with horizontal electric field[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2018, 23(1): 143−151.

[17] Qi Y Z, Huang L, Wu X, et al. Effect of loop geometry on TEM response over layered earth[J]. Pure and Applied Geophysics, 2014, 171(9): 2407−2415.

[18] Li H, Xue G Q, Zhao P, et al. Inversion of arbitrary segmented loop source TEM data over a layered earth[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 128: 87−95.

[19] Zhou Z K, Weng A H, Wang X Q, et al. Source shape impact on controlled source EM surveys[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 171: 103858.

[20] Shi J J, Wu X, Wang Y B, et al. Influence of grounded source geometry and terrain on the semi-airborne transient electromagnetic response from 3D simulation data[J]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 233: 105619.

Semi-airborne transient electromagnetic method: Geometrical distortion effects of grounded source under undulating terrain conditions and optimization of observation systems

LIU Jian-Li [1, 2, 3], LI Xin-Sheng [1, 2], CHEN Xiao-Long [1, 2], LI Bing [1, 2], ZHAO Xu-Yang [1, 2], SHEN Chen [1, 2]

(1. *Shaanxi Geology and Mining Geophysical and Geochemical Prospecting Team Co., Ltd., Xi'an* 710043, *China*; 2. *Shaanxi Geological and Mineral Innovation Research Institute Co., Ltd., Xi'an* 710054, *China*; 3. *Li Xinsheng Model Worker and Craftsman Talent Innovation Studio, Xi'an* 710043, *China*)

Abstract: As mineral exploitation is gradually shifting to complex terrain areas, the traditional transient electromagnetic (TEM) method has encountered challenges such as inconvenient deployment and low efficiency in these areas. In contrast, the semi-airborne TEM (SATEM) method, which combines a ground-based transmitter and an airborne receiver, can significantly improve data acquisition efficiency and adaptability in complex areas. However, due to the undulating terrains, the grounded source often deviates from the ideal straight-line pattern. The geometrical distortion effects of the grounded source on electromagnetic responses remain under-studied. Through 3D finite-element forward modeling, this study systematically analyzed the electromagnetic field distortions caused by the curvature and vertical undulation of the grounded source under typical undulating terrains, such as mountain peaks and valleys. The results indicate that the non-ideal geometry of the grounded source is the primary cause of early asymmetric electromagnetic responses and false anomalies. Mountain peaks concentrate the electromagnetic energy in the shallow parts of the mountains, suppressing the detection depth, whereas valleys enhance subsurface coupling due to the lower position of the grounded source, thus expanding the early detection range. More importantly, adopting a terrain-following flight line (i.e., maintaining a constant receiver height relative to the ground surface) can effectively mitigate the false anomalies of apparent resistivity caused by the geometrical distortion of the grounded source and the terrain coupling. Accordingly, this study proposes a SATEM-optimized data acquisition scheme for complex terrains, providing theoretical support and technical guidance for improving the accuracy of deep resource exploration.

Key words: semi-airborne transient electromagnetic (SATEM) method; 3D numerical simulation; finite element method; field source deployment; terrain; electromagnetic response distortion; optimized data acquisition scheme

（本文编辑：王萌）