第 36 卷 第 6 期 地 震 学 报 Vol. 36, No. 6
2014 年 11 月 (1101—1112) ACTA SEISMOLOGICA SINICA Nov., 2014

石富强, 邵辉成, 张国强, 方炜. 2014. 偶极接地线对地电阻率影响的数值模拟. 地震学报, 36(6): 1101—1112. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.06.011.
Shi F Q, Shao H C, Zhang G Q, Fang W. 2014. Numerical simulation for the influence of two-end grounded cables on georesistivity observation. *Acta Seismologica Sinica*, **36**(6): 1101—1112. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.06.011.

偶极接地线对地电阻率影响的数值模拟*

石富强* 邵辉成 张国强 方 炜

(中国西安 710068 陕西省地震局)

摘要 针对我国地震监测预报中地电阻率定点连续观测中存在的偶极接地线的干扰问题, 本文将台站区域地层简化为 3 层均匀介质模型, 将接地线等效为偶极接地的电阻体, 建立了接地线干扰地电阻率观测的耦合物理模型. 通过有限元分析软件 ANSYS 模拟分析不同电性断面情况下接地线对地电阻率观测的影响, 同时分析这种干扰的产生机理, 并结合实际观测中存在的干扰问题作了对比验证分析. 结果表明: ① 接地线使得供电电极产生的地下对称性电场分布发生局部调整, 从而影响地电阻率观测; ② 接地线对地电阻率观测的影响主要取决于线缆的位置及方位角的大小; ③ 适当增大电极埋深可以减小其对地电阻率观测的影响; ④ 电性结构的差异性决定干扰变化幅度的大小. 本文结果对相关台站地电阻率观测异常分析落实及干扰源避让和观测系统改造具有参考意义.

关键词 地电阻率 偶极接地线 水平 3 层介质 干扰 数值模拟
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.06.011 **中图分类号**: P315.72+2 **文献标志码**: A

Numerical simulation for the influence of two-end grounded cables on georesistivity observation

Shi Fuqiang* Shao Huicheng Zhang Guoqiang Fang Wei

(*Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an* 710068, *China*)

Abstract: Two-end grounded cables often generate interference to continuous georesistivity observation at fixed sites for earthquake monitoring and prediction in China. By taking the grounded cables as two-end grounded resistors and simplifying the medium of geoelectric observation sites into horizontally inhomogeneous three-layered medium, a coupled physical model is built up in this paper. Based on this model, influences of two-end grounded cables on georesistivity observation are simulated under different electric structures by using the finite element analysis software ANSYS. Furthermore, the effects of interference factors, such as position, azimuth and buried depth of electrodes, on georesistivity observation are analyzed. And the interference mechanisms are also discussed. Besides, some existing interferences are also presented to give out a comparative

* 基金项目 陕西省地震局青年科研基金课题(201203)、陕西省地震局启航与创新基金课题(201304)、中国地震局监测预报司震情跟踪青年课题(2013020402)和中国地震局地震科技星火计划项目(XH13023Y)共同资助.
收稿日期 2014-02-24 收到初稿, 2014-04-08 决定采用修改稿.
* 通讯作者 e-mail: shifuqiang121@163.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

study. The results showed that the first, the grounded cables can cause local adjustment of the symmetric underground electric field distribution generated by the current electrode, affecting normal georesistivity observation; the second, the effects of grounded cables on georesistivity observation, mainly depend on position of cables and their azimuth; the third, the effects tend to be reduced obviously with buried depth of electrodes increasing; and the forth, the difference of the electric structures determine the magnitude of interference. The simulation results are of significance as a reference to analyzing the similar resistivity anomalies, choosing the evaded distance of the interference source and the reform of the observing system.

Key words: georesistivity; two-end grounded cable; horizontally inhomogeneous three-layered medium; interference; numerical simulation

引言

地电阻率观测作为一项重要的地震前兆观测手段，受到国内外大量学者关注(Scholz *et al*, 1973; Park *et al*, 1993; Lu *et al*, 1999, 2004; Yang *et al*, 2002; Balasco *et al*, 2004). 在实验研究中也发现了被认为是地震前兆的地电阻率异常信息(Brace, Orange, 1968; Wang *et al*, 1975, 1978; 陈峰等, 2000; 郝锦绮等, 2002). 我国自1966年邢台地震后开展地电阻率连续观测以来，已经形成了由近百个定点连续观测台站组成的地电阻率观测网. 在观测网内也监测到过中强地震的可能前兆异常信息，并开展了一年尺度的预测实践(叶青等, 2005). 长期的监测预报工作积累了大量震例总结(钱复业, 赵玉林, 1980; 钱家栋, 1993; Du *et al*, 2000; 杜学彬, 2010)，也认识到了地震前兆机制的复杂性. 结合地下介质各向异性以及震源特征，国内外学者开展了大量关于地电阻率地震前兆异常的探索研究工作(Qian *et al*, 1996; Busby, 2000; 杜学彬等, 2007, 2008;).

近年来，随着我国农村经济结构的快速转型以及城市化进程的高速发展，过去多年定点连续观测的很多地电台都出现了各种各样的干扰，归纳起来主要分为8类(汪志亮等, 2002): ① 仪器系统干扰; ② 观测系统漏电干扰; ③ 工业游散电流随机干扰; ④ 高压线路干扰; ⑤ 风扰或磁扰; ⑥ 地埋金属管线干扰; ⑦ 大型水库和蓄水干扰; ⑧ 年变干扰. 针对这些类型的干扰源，人们采取井下地电观测方法(杨兴悦等, 2012)以及发展无人值守台站和可控源观测系统等途径抑制干扰影响. 田山等(2009)提出将三向石油测井技术移植到地震地电阻率观测来提高地电阻率的抗干扰能力; 解滔等(2012)研究了布极区地表、井下地电观测中抑制地表杂散电流的干扰影响; 方炜等(2010)结合实际观测理论计算了高压直流输电对地电场观测的影响; 张世中等(2013)通过测试分析，研究了城市轨道交通对地电阻率观测的影响; 安张辉等(2010, 2011)阐述了希尔伯特-黄变换(HHT)方法在地电观测数据处理中的可靠性和应用前景，并利用该方法分析了城市轨道交通对地电观测的干扰; 解滔等(2013)利用数值模拟方法定量分析了地埋钢缆线对宝昌地电阻率观测的影响; 张秀霞等(2009)以及卫定军和李春贵(2009)分别介绍了新沂台和固原台地电阻率观测受蔬菜大棚搭建的干扰情况. 本文以偶极接地线为例，重点研究布极区内以蔬菜大棚等为代表的偶极接地线对地表、井下地电阻率观测的固定干扰影响.

偶极接地线缆是金属管网类干扰的一种，主要表现为布极区内以蔬菜大棚等为代表的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

两端与大地连接，中间架空的一类固定干扰源．其金属线一般较长（从几十米到几百米不等），横贯地表，两端直接与大地相连，中间辅以混凝土柱、木棒等支撑，如图 1 所示．这类干扰使得地电阻率连续观测出现下降、上升或年变形态畸变并随着干扰的持续呈现趋势性变化，表现出来的形态与地震前兆异常形态（杜学彬，2010）类似．同时在异常调查落实中也存在着一些矛盾的现象．以偶极接地线干扰为例，在江苏新沂地电台（张秀霞等，2009）表现为“下降”，而在宁夏固原地电台（卫定军，李春贵，2009）却表现为“上升”，并且同一观测点不同测道的变化形态和大小也不尽相同．此外这类干扰还在北京延庆台、天津宝坻台、河北昌黎台、辽宁新城子台以及陕西周至台等均有出现①．现场实验结果表明，平行测线埋设的地下管线对地电阻率观测的影响最为显著，而斜交或垂直敷设的次之或不明显（汪志亮等，2002）．目前针对偶极接地线缆这类特殊干扰影响地电阻率观测的定量分析研究的报道尚不多见．

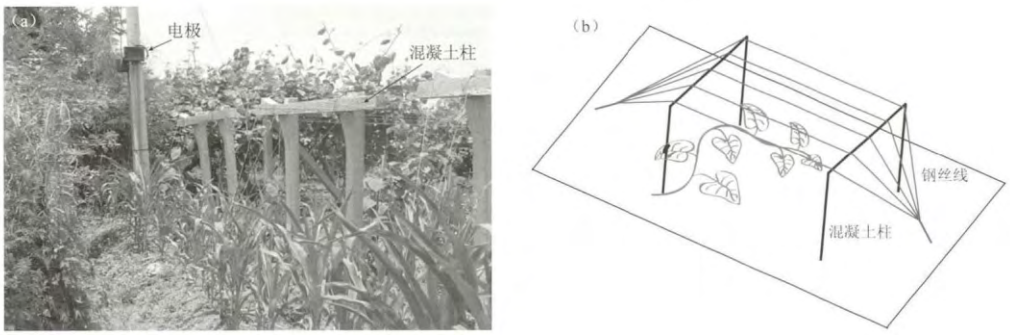


图 1　测区内金属线缆布设情况(a)及其简化模型(b)

Fig. 1　The layout of the metallic cables (a) and its simplified model (b) in surveying area

本文将日常观测中存在的布极区内以蔬菜大棚金属构架为代表的固定干扰源简化为偶极接地装置，建立了偶极接地线干扰地电阻率观测的耦合物理模型，利用数值模拟方法系统地分析计算了偶极接地线干扰地电阻率测量的干扰机制，并与现有观测资料进行对比验证分析．该分析结果对今后认识类似干扰提供了可靠的分析处理方法．

1　物理模型构建

基于数值模拟技术的地震电信号研究已成为解释地震电信号资料，探索地震电信号产生机制，以及影响因素分析的新方法（Huang，Lin，2010；黄清华，林玉峰，2010）．本文旨在分析偶极接地线这种特定干扰对地电阻率观测的影响，为此在建模时没有考虑自然电场的产生机制，而是将地电测区等效为内部无初始电场分布的水平 3 层导电介质：第一层厚度为 h_1，电阻率 ρ_1；第二层厚度为 h_2，电阻率 ρ_2；第三层电阻率 ρ_3．A 和 B 为供电电极，M 和 N 为测量电极，对称分布于 x 轴上，且 4 个电极埋深均为 h，如图 2a 所示．设 PQ 为地电测区一组偶极接地线，跨度为 L；P 和 Q 为两端接地点，P 点的位置参数为 x，到测线的垂直距离为 s．接地线 PQ 走向的延长线与 x 轴的正方向夹角为 α（$0°\leqslant\alpha\leqslant90°$）．令线缆两端接地电阻分别为 R_1 和 R_2，线缆自身电阻为 R_f（图 2b）．因此一组接地线干扰系统可以

① 据 2013 年全国电磁会商会相关单位资料报告．

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

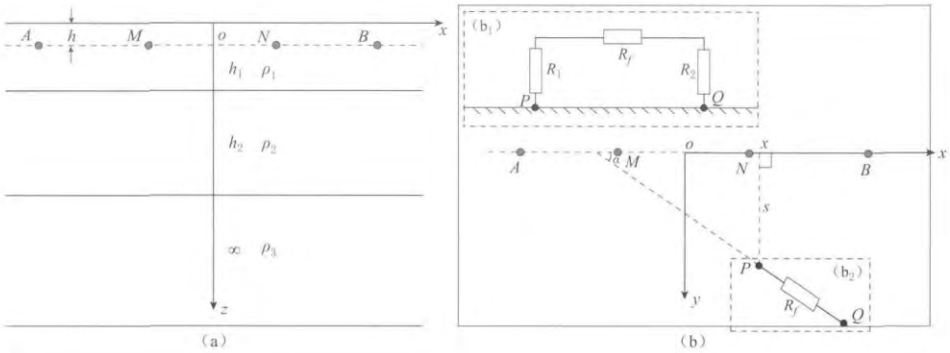


图 2 水平 3 层介质中对称四极装置(剖面)(a)和偶极接地线模型示意图(俯视)(b)

图(b)中左上角(b_1)小图为其右下角(b_2)小图中接地线 PQ 的细节结构示意图

Fig. 2 (a) Schlumberger array of apparent resistivity observation in horizontally inhomogeneous three-layered medium; (b) The physical model of two-end grounded cable. And the part (b_1) in the upper-left corner is the details of grounded cable PQ shown in part (b_2) in the lower-right corner

简化为两端接地的等效电阻体 R_0. 定义 R_0 为地电阻率观测的干扰电阻，则

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_f. \tag{1}$$

模拟过程采用直流恒压供电方式，在地电阻率正常观测时，通过测量 M 与 N 之间的电势差 U_{MN} 以及供电电流 I，地电阻率由公式 $\rho_s = K(U_{MN}/I)$ 计算可得，其中 K 为装置系数. 当接地线干扰发生后，测量电极 M 与 N 之间的电势差为 U'_{MN}，回路中的供电电流为 I'. 由于极距固定，电极埋深固定，所以装置系数 K 不变. 则干扰后实际测量的地电阻率为 $\tilde{\rho}_s = K(U'_{MN}/I')$. 令 $\eta = \tilde{\rho}_s/\rho_s$ 为接地线干扰地电阻率观测的影响系数，则

$$\eta = \frac{U'_{MN}}{U_{MN}} \frac{I}{I'}. \tag{2}$$

当 $\eta > 1$ 时，偶极接地线对地电阻率的干扰表现为增加；当 $\eta < 1$ 时，偶极接地线对地电阻率的干扰表现为减小；当 $\eta = 1$ 时，偶极接地线对地电阻率的影响可以忽略不计.

2 模拟计算及实例分析

ANSYS 软件是美国 ANSYS 公司研制的大型的集结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的通用有限元模拟软件. 在航空航天、机械土木、轻工日化、能源化工、地矿水利等领域有着广泛的应用. 根据所研究问题的情况，建模时可以在软件内选择对应的单元类型，如模拟桁架结构的 LINK10 单元、模拟壳体变形的 SHELL43 单元、模拟力-电-磁-热的 SOLID5 单元、模拟电路的 CIRCUIT124 单元等百余种单元类型. 本文根据图 2a，利用 ANSYS 电磁场耦合实体单元(SOLID5)建立了水平层状结构的三维有限元计算模型. 在全国 100 多个地电台站中，大多数台站的供电极极距约为 1.2 km，为了有效地减小截断边界对地下电场线分布的影响(汤井田，公劲喆，2010)，本文经过反复试验，选取大小(长×宽×高)为 10 km×10 km×5 km 的模型模拟无限半空间的地下介质(关于几何尺寸对模拟结果稳定性的影响，解滔等(2013)作了详细的论证，本文模拟试验过程与之类似，不再赘述). 该模型在纵向分为 3 层，分别表示分层介质不同层的电性属性. 以常见的 4 种 3 层电性结构为例，本文采用 $AB = 1200$ m 的对称四极温纳装置($MN = 400$ m). 其中 A，B，M，

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

N 点的坐标分别为(−600 m，0，h)、(600 m，0，h)、(−200 m，0，h)和(200 m，0，h)，供电采用偶极直流电源，在供电电极 A 和 B 两点分别施加荷载电压 $U_A=100$ V、$U_B=-100$ V. 求解给出电势差 ΔU_{MN} 和电流 I 的正常理论值；然后利用 ANSYS 电路单元(CIRCUIT124)创建干扰电阻 R_0，将 R_0 两端耦合于已建立的电性结构模型表面上的 P 点和 Q 点来模拟偶极接地线，耦合自由度为电压，同时选取干扰电阻跨度 $PQ=200$ m；通过改变接地线位置参数 s，α，x 及电极埋深 h，求解给出干扰后测量电极 M 与 N 之间的电位差 $\Delta U'_{MN}$ 和流过供电电极 A 和 B 两点的电流 I'；进而根据式(2)计算出偶极接地线对地电阻率观测的影响. 本文计算所采用模型的电性结构参数见表 1.

表 1　模型的电性结构参数

Table 1　Physical parameters of the electric structures for the three-layered model

断面类型	参数	第一层	第二层	第三层
H 型	ρ/(Ω·m)	160	30	80
	h/m	15	176	
Q 型	ρ/(Ω·m)	160	80	30
	h/m	15	176	
A 型	ρ/(Ω·m)	30	80	160
	h/m	15	176	
K 型	ρ/(Ω·m)	30	160	40
	h/m	15	176	

2.1　影响系数 η 随位置 x 的变化

以地表观测为例：取电极埋深 $h=2$ m；根据对称性简化取方位角 $\alpha=0°$，45°和 90°；假定接地线分布于测线附近($s=0$ m)且干扰电阻 $R_0=20$ Ω·m. 通过平移改变位置参数 x 模拟偶极接地线对地电阻率的影响. 模拟计算结果如图 3 所示.

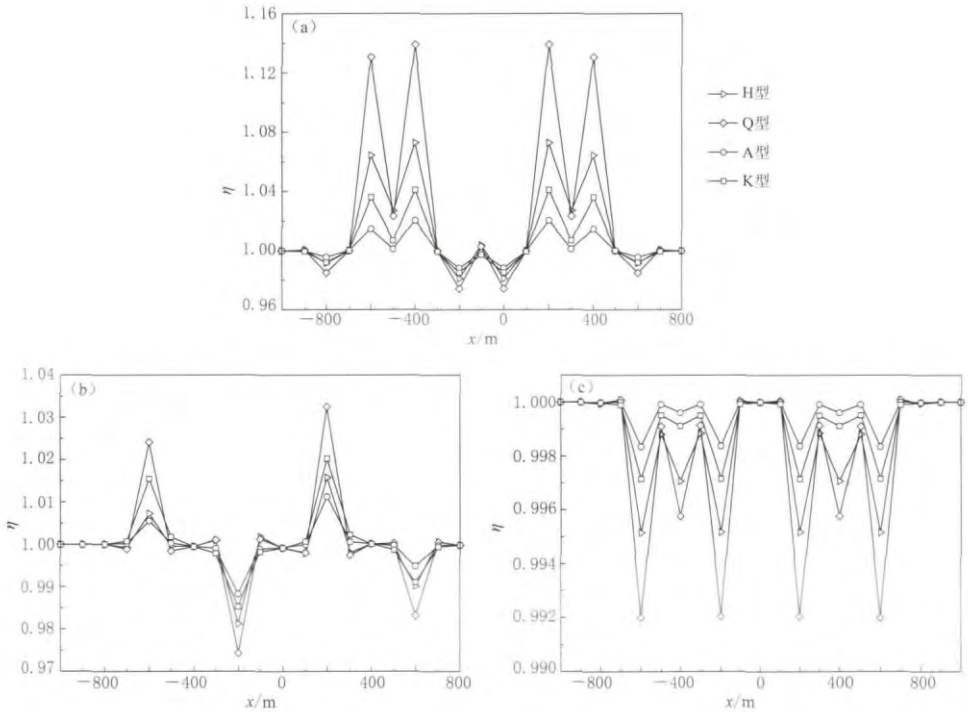


图 3　影响系数 η 随位置参数 x 的变化关系. (a) $\alpha=0°$；(b) $\alpha=45°$；(c) $\alpha=90°$

Fig. 3　Relationship between the influence coefficient η and positional parameter x (a) $\alpha=0°$；(b) $\alpha=45°$；(c) $\alpha=90°$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图 3 可见，偶极接地线对地电阻率的影响主要源自于测区内的干扰，当接地线位于测线两端的测区外时(接地线 PQ 两端点远离供电极约 200 m)，这种影响可以忽略不计. 当接地线平行于测线时($\alpha=0°$)，对地电阻率的干扰主要表现为增加，且增加幅度较大，最大可达到 10%的水平；当接地线垂直于测线时($\alpha=90°$)，对地电阻率的干扰主要表现为减小，且减小幅度较小，最大不超过 1%的水平；当接地线与测线斜交时，接地线对地电阻率的干扰会表现出随电极分布增大、减小交替出现的情况，变化幅度约为 5%的水平. 这与汪志亮等(2002)现场实验结果在定性趋势上吻合. 对比不同电性结构的模拟结果发现，偶极接地线对地电阻率观测的影响是增加还是减小，主要取决于其相对测线的位置 x 以及方位角 α，与测区电性结构关系不大. 这是因为接地线搭建后，线缆会将地表 P 点与 Q 点导通，人工电场的分布发生变化，进而影响地电阻率 ρ_s 在原装置下的测量值.

电性结构的差异性决定干扰幅度的大小，对于 H 型和 Q 型这两类表层电阻较大的电性结构而言，电流主要分布于地下低阻层，表层电流密度较小. 而测量又在地表进行，因此当偶极接地线将地表的 P 点与 Q 点导通后，地表微弱的对称性电场分布将对干扰非常敏感，发生大幅度调整，使得地电阻率观测值发生较大幅度的变化；反之，对于 A 型和 K 型这两类下伏高阻层的电性结构而言，表层电流密度较大，对干扰出现的敏感度很小，故地电阻率变化幅度较小. 同时从另一个角度也可看出，A 型和 K 型电性断面相对于 H 型和 Q 型能够较好地抑制来自地表的干扰，这与解滔等(2012)对地表电流干扰的分析结果相同.

2.2 影响系数 η 随电极埋深 h 的变化

同样以表 1 中列举的 4 种电性结构为例，取接地线方位角 $\alpha=0°$，45°和 90°，干扰电阻 $R_0=20\ \Omega\cdot$m，跨度为 200 m. 通过改变测量电极 M，N 和供电电极 A，B 的埋深 h 来模拟偶极接地线对地震地电阻率观测的影响. 由图 3 可知，接地线对地电阻率观测的影响的最大值集中在供电电极和测量电极附近，因此本文仅取位置参数 $x=200$ m (P 点在测量电极 N 处)，且线缆位于测线附近($s=0$ m)进行讨论分析. 模拟计算结果如图 4 所示.

图 4 显示了数值模拟给出的影响系数随电极埋深的变化关系. 总体而言，增加电极埋深可以显著减小地表接地线搭建对地电阻率观测的影响. 合理的电极埋深选择取决于电性结构的差异性. 对于 H 型和 Q 型这两类下伏低阻层的电性断面而言，在第一层介质中($h<15$ m)增大电极埋深便可显著地减小线缆搭建对地电阻率干扰的影响系数，当埋深穿透第一层介质时，降幅可达 10%左右；继续增大电极埋深到第二层介质，地表接地线对地电阻率观测的影响将继续降低，但影响系数的衰减速率急剧减小. 因此，对于 H 型和 Q 型电性断面而言，尽管在第一层介质中增大电极埋深可以显著减小接地线缆的影响，但是由于其引起的干扰幅度较大，当电极埋设于第一层介质的底面还没有达到预期效果的时候，需要在第二层介质中大幅度增大电极深埋，甚至需要埋到第三层介质中. 而对于 A 型和 K 型两类表层电阻较小的电性断面而言，尽管在第一层介质($h<15$ m)中增大电极埋深时，影响系数变化速度缓慢不明显，降幅约为 0.5%，但是在第二层介质中增加电极埋深，影响系数衰减速率将迅速加大；加之，接地线对 A 型和 K 型结构的电性断面地电阻率观测影响幅度较小，因此在第二层介质中增加电极埋深便可显著提高地电阻率连续观测的质量和抗干扰能力.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

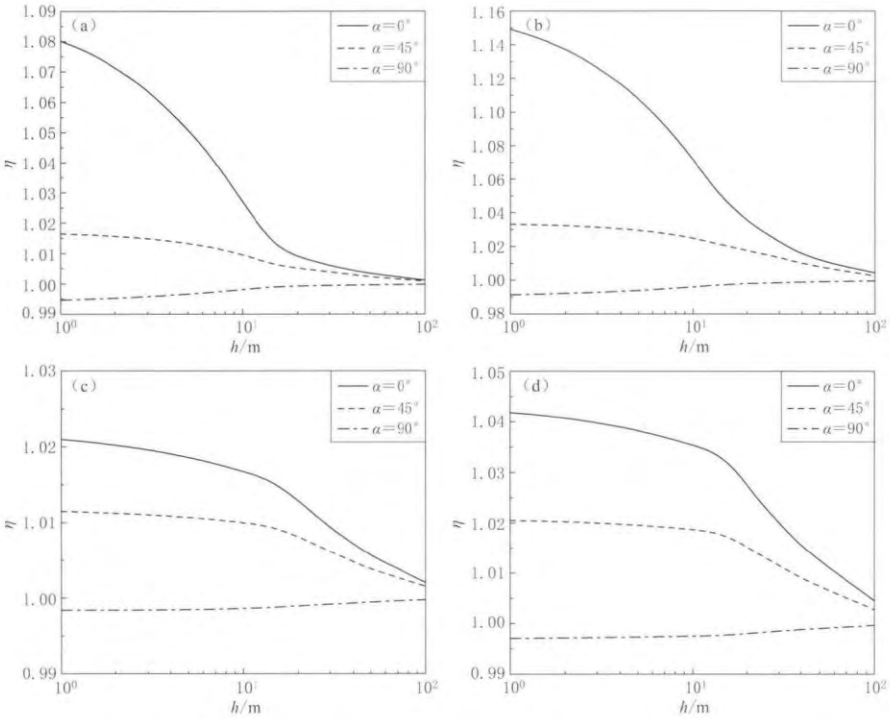


图 4　影响系数 η 随电极埋深 h 的变化关系. (a) H 型；(b) Q 型；(c) A 型；(d) K 型

Fig. 4　Relationship between the influence coefficient η and buried depth h

(a) H-type；(b) Q-type；(c) A-type；(d) K-type

2.3　实例分析

卫定军和李春贵(2009)以及张秀霞等(2009)分别根据相关台站的异常落实工作介绍了接地金属线缆干扰地电阻率观测的情况. 本文利用已建立的耦合物理模型，通过数值模拟分析偶极接地线对固原台和新沂台地电阻率观测的影响. 电性结构参数由拟合核函数法反演测深曲线给出. 反演结果表明，新沂台台址下方为 3 层 K 型断面介质，而固原台台址下方为 4 层 HK 型断面介质(图 5).

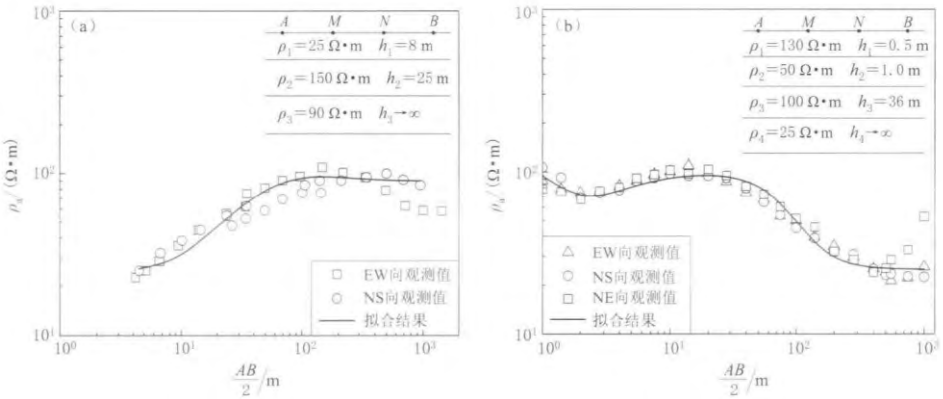


图 5　垂直向电测深数据解释. (a) 新沂台；(b) 固原台

Fig. 5　Interpretation of vertical electric soundings data for the stations Xinyi (a) and Guyuan (b)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

新沂台电极埋深 $h=3$ m，极距 $AB=1000$ m，$MN=240$ m，台址下方介质为表层电阻较小的 K 型断面．地电测区内于 2007 年 9—11 月开始搭建偶极接地线，搭建区域如图 6a 所示．每根线长约 100 m，主要分布于 NE 测道的供电极 A_2 与测量极 M_2 之间，呈 EW 走向．张秀霞等(2009)指出，2007 年 8 月后新沂台 N45°E 和 EW 向受到线间漏电影响，观测数据无法反映真实变化．2007 年 12 月 21 日更换 3 个测向的埋地电缆，更换前后只有 NS 向数据未发生变化．所以他们并没有给出这两道干扰的影响量，本文没有对此作进一步分析，仅以 NS 向实际测值为对比研究对象．经实测新沂台线缆接地电阻约为 1.7—6.0 Ω(张秀霞等，2009)，本文近似取接地电阻为 $R_1=R_2=1.5$ Ω．利用图 5a 反演给出的参数建立耦合物理模型，模拟给出接地线对新沂台 NS 向地电阻率的影响系数，模拟结果与实际观测结果的对比情况见表 2．

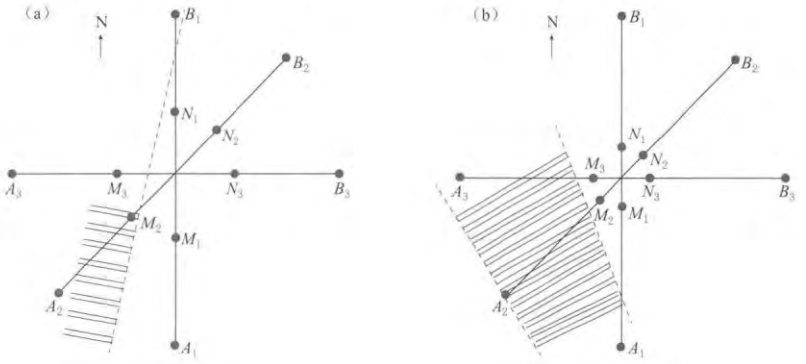


图 6 测区电极和金属线分布示意图．(a) 新沂台；(b) 固原台

Fig. 6 Schematic diagram of the arrangement of electrodes and metallic cables for the stations Xinyi (a) and Guyuan (b) in the surveying area

表 2 新沂台和固原台偶极接地线干扰地电阻率观测的模拟结果与实测结果对比

Table 2 Comparison of the simulated and observed georesistivities at the stations Xinyi and Guyuan under the influence of two-end grounded cables

台站名称	测项	时间段 年-月-日	实际观测			模拟结果	
			干扰前 /(Ω·m)	变化量 /(Ω·m)	变化率	η	变化率
新沂台	NS	2007-10—2008-01	79.37	↓0.94	↓1.18%	0.9892	↓1.08%
	NE					0.9056	↓9.44%
	EW					0.9957	↓0.43%
固原台	NS	2008-03-12—2008-04-14	23.92	↓0.06	↓0.25%	0.9980	↓0.20%
	NE		24.32	↑1.48	↑6.10%	1.1311	↑13.11%*
	EW		23.82	↑0.24	↑1.00%	1.0109	↑1.09%

注：表中数值前的“↑”表示增加，“↓”表示减小．*13.11%是由图 5b 中固原台 EW 向测深反演介质模型计算给出，而以 NE 向反演介质模型重新计算该值约为8.00%．

固原台位于山坡前，台址下方为表层电阻较大的 4 层 HK 型断面，极距为 $AB=1000$ m，$MN=200$ m．地电测区内 2008 年 3 月 22 日开始搭建接地线缆，搭建区域如图 6b 所示．总体上线一端固定于供电电极 A_2 附近，另一端固定于测量电极 M_2 附近，与 NE 向地电阻率测线近乎平行，线缆长约 350 m．由于固原地表干燥且表层电阻大，本文近似取干扰电阻 $R_0=25$ Ω，由图 5b 反演参数建立耦合物理模型，模拟给出接地线对固原地电阻率观测的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

影响系数，模拟结果与实际观测结果对比情况见表 2.

经对比发现，对于新沂台 NS 测项以及固原台 NS 测项和 EW 测项，模拟计算结果与实测结果吻合良好，能够为蔬菜大棚、铁丝网等偶极接地装置干扰地电阻率观测的定量计算以及干扰排查等提供有力依据. 但模拟结果对固原台 NE 向预测偏大，这主要是由于地下电性结构的各项异性差异造成的. 本文计算采用的电性结构是由 EW 向测深反演给出. 由图 5b 可以看出，NE 向底层存在高阻层，而根据 EW 向反演给出的电性结构并不能反映 NE 向底层的高阻结构. 因此，对于 NE 向地电阻率的实际观测，由于下伏高阻层的存在，人工电流将趋于地表，使得地表电流密度大于本文模型计算结果；进而降低了其对地表干扰感应的灵敏度，抑制了干扰的大幅度增加. 故本文模型预测值偏大. 为此，我们以 NE 向测深反演结果建立干扰物理模型，其它参数和条件不变. 模拟结果表明，蔬菜大棚对固原台 NE 向地电阻率观测的影响约为 8%. 综上，本文建立的耦合物理模型不但解释了“同为蔬菜大棚干扰，新沂台表现为‘下降’，而固原台表现为‘上升’”，并且在定量上也吻合良好.

3　讨论与结论

农村经济结构的转型和城市化进程的发展给地震地电阻率观测带来的影响已不容忽视，探索新的、基于物理模型的定点连续观测地电阻率数据处理方法对于异常判别和地震监测预报实践显得更加重要. 本文将台站下方介质简化为水平 3 层介质，将偶极接地线简化为电阻体，建立耦合物理模型，就偶极接地线这类特定干扰作了比较详细的模拟研究，并结合实际观测资料作了对比分析研究，从理论上分析给出了偶极接地线对定点连续观测单极距地电阻率观测的影响机制，主要包括：

1）本文根据实际调查和理论分析建立了偶极接地线干扰地电阻率观测的耦合物理模型，并结合常见电性结构综合分析了线缆分布、线缆方位角以及电极埋深等对地电阻率的干扰. 结果表明，偶极接地线对地电阻率的干扰是增大还是减小主要由地表电势的重分布造成，与线缆分布的位置、方位角等有关，电性结构的差异决定干扰幅度的大小. 该结果对于相关地震前兆观测台站的异常判别分析以及台站改造具有一定的指导意义.

2）根据图 4 模拟结果可知，不同电性结构下地表干扰随电极埋深的变化关系也不尽一致. 在第一层介质增加电极埋深，当表层电阻较大时，地表接地线干扰的影响系数快速衰减；而当表层电阻较小时，影响系数的衰减速率很慢，甚至不明显. 因此在采用深埋电极观测时，避免盲目参考借鉴，需要根据当地实际的电性断面选择合适的电极埋深和避让距离可以有效地减小接地线搭建对地电阻率的干扰.

3）在实例分析中的物理模型参数由拟合核函数法反演给出，尽管忽略了实际水平向不均匀性，但从模拟结果来看，本文基于测深反演结果，由电磁耦合单元的块导体和电路单元电阻体耦合建立的水平均匀层状介质耦合物理模型，能够反映台站下方介质的电性性质. 将该模型应用于已确定干扰的新沂台和固原台地电阻率异常，通过对比发现，本文建立的耦合物理模型能够从定量的角度解释分析受接地线干扰，新沂台地电阻率观测值趋势下降而固原台地电阻率观测值趋势上升的原因. 同时也体现出基于物理模型的数值模拟方法在处理地震地电阻率观测中存在的“虚假异常”方面的优势.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

宁夏回族自治区地震局卫定军、江苏省地震局李飞和河北省地震局张国苓为本文提供了相关资料，在工作中与中国地震台网中心解滔进行了有益的讨论和交流，审稿专家为本文的修改提出了宝贵的建议．作者在此一并表示诚挚的谢意．

参 考 文 献

安张辉，元丽华，李宁，范莹莹，谭大诚，陈军营，郑国磊．2010．HHT 方法在地电场数据处理中的应用[J]．地球物理学进展，**25**(2)：525—532．

An Z H，Yuan L H，Li N，Fan Y Y，Tan D C，Chen J Y，Zheng G L．2010．Discussion on the application of HHT method to geoelectric field data processing[J]．*Progress in Geophysics*，**25**(2)：525—532 (in Chinese)．

安张辉，杜学彬，元丽华，谭大诚，陈军营．2011．HHT 方法在受城市轨道交通干扰地电场观测数据中的应用[J]．地震学报，**33**(2)：243—251．

An Z H，Du X B，Yuan L H，Tan D C，Chen J Y．2011．Application of Hilbert-Huang transform to geo-electric data disturbed by urban track traffic[J]．*Acta Seismologica Sinica*，**33**(2)：243—251 (in Chinese)．

陈峰，修济刚，安金珍，廖椿庭，陈大元．2000．岩石电阻率变化各向异性与微裂隙扩展方位实验研究[J]．地震学报，**22**(3)：310—318．

Chen F，Xiu J G，An J Z，Liao C T，Chen D Y．2000．Research on dependence of resistivity changing anisotropy on microcracks extending in rock with experiment[J]．*Acta Seismologica Sinica*，**22**(3)：310—318 (in Chinese)．

杜学彬，李宁，叶青，马占虎，闫睿．2007．强地震附近视电阻率各向异性变化的原因[J]．地球物理学报，**50**(6)：1802—1810．

Du X B，Li N，Ye Q，Ma Z H，Yan R．2007．A possible reason for the anisotropic changes in apparent resistivity near the focal region of strong earthquake[J]．*Chinese Journal of Geophysics*，**50**(6)：1802—1810 (in Chinese)．

杜学彬，叶青，马占虎，李宁，陈军营，谭大诚．2008．强地震附近电阻率对称四极观测的探测深度[J]．地球物理学报，**51**(6)：1943—1949．

Du X B，Ye Q，Ma Z H，Li N，Chen J Y，Tan D C．2008．The detection depth of symmetric four-electrode resistivity observation in/near the epicentral region of strong earthquakes[J]．*Chinese Journal of Geophysics*，**51**(6)：1943—1949 (in Chinese)．

杜学彬．2010．在地震预报中的两类视电阻率变化[J]．中国科学：地球科学，**40**(10)：1321—1330．

Du X B．2011．Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction[J]．*Science China：Earth Sciences*，**54**(1)：145—156．

方炜，张国强，邵辉成．2010．高压直流输电对地电场观测的影响[J]．地震地质，**32**(3)：434—441．

Fang W，Zhang G Q，Shao H C．2010．Study on the impact of HVDC to geoelectric field observation[J]．*Seismology and Geology*，**32**(3)：434—441 (in Chinese)．

郝锦绮，冯锐，周建国，钱书清，高金田．2002．岩石破裂过程中电阻率变化机理的探讨[J]．地球物理学报，**45**(3)：426—434．

Hao J Q，Feng R，Zhou J G，Qian S Q，Gao J T．2002．Study on the mechanism of resistivity changes during rock cracking[J]．*Chinese Journal of Geophysics*，**45**(3)：426—434 (in Chinese)．

黄清华，林玉峰．2010．地震电信号选择性数值模拟及可能影响因素[J]．地球物理学报，**53**(3)：535—543．

Huang Q H，Lin Y F．2010．Numerical simulation of selectivity of seismic electric signal and its possible influences[J]．*Chinese Journal of Geophysics*，**53**(3)：535—543 (in Chinese)．

钱复业，赵玉林．1980．地震前地电阻率变化十例[J]．地震学报，**2**(2)：186—197．

Qian F Y，Zhao Y L．1980．The examples of changes in earth-resistivity prior to strong earthquakes[J]．*Acta Seismologica Sinica*，**2**(2)：186—197 (in Chinese)．

钱家栋．1993．与大震孕育过程有关的地电阻率变化研究[J]．中国地震，**9**(4)：341—350．

Qian J D．1993．A study on the changes in geoelectrical resistivity associated with preparatory process of great earthquakes in China[J]．*Earthquake Research in China*，**9**(4)：341—350 (in Chinese)．

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

汤井田，公劲喆. 2010. **三维直流电阻率有限元-无限元耦合数值模拟**[J]. **地球物理学报**，**53**(3)：717—728.

Tang J T，Gong J Z. 2010. 3D DC resistivity forward modeling by finite-infinite element coupling method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*，**53**(3)：717—728 (in Chinese).

田山，刘允秀，聂永安，马骥，庞群英，杜学彬. 2009. **地震地电阻率观测改进方法研究：电测井技术的移植应用与数值模型分析**[J]. **地震学报**，**31**(3)：272—281.

Tian S，Liu Y X，Nie Y A，Ma J，Pang Q Y，Du X B. 2009. Improved method of earth resistivity observation：Transplant application and numerical model analysis of electric well logging technique[J]. *Acta Seismologica Sinica*，**31**(3)：272—281 (in Chinese).

汪志亮，郑大林，余索荣. 2002. **地震地电阻率前兆异常现象**[M]. **北京：地震出版社**：51—79.

Wang Z L，Zheng D L，Yu S R. 2002. *Geoelectric Resistivity Precursor Anomalies of Earthquake*[M]. Beijing：Seismological Press：51—79 (in Chinese).

卫定军，李春贵. 2009. **搭建蔬菜大棚对固原地电台视电阻率观测影响的分析**[J]. **地震地磁观测与研究**，**30**(2)：77—82.

Wei D J，Li C G. 2009. Analysis about influence of green house on apparent resistivity observation at Guyuan seismic station[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*，**30**(2)：77—82 (in Chinese).

解滔，杜学彬，陈军营，安张辉，谭大成，范莹莹，刘君. 2012. **井下地电阻率观测中地表电流干扰影响计算**[J]. **地球物理学进展**，**27**(1)：112—121.

Xie T，Du X B，Chen J Y，An Z H，Tan D C，Fan Y Y，Liu J. 2012. Calculation for the influence from the surface disturbance current in the deep-well geoelectrical resistivity observation[J]. *Progress in Geophysics*，**27**(1)：112—121 (in Chinese).

解滔，卢军，李美，王中平，王亚丽. 2013. **地埋钢缆对宝昌台地电阻率干扰的定量分析**[J]. **地球物理学进展**，**28**(2)：724—734.

Xie T，Lu J，Li M，Wang Z P，Wang Y L. 2013. Quantitative analysis of disturbance caused by burned wirerope in Baochang geoelectric resistivity station[J]. *Progress in Geophysics*，**28**(2)：724—734 (in Chinese).

杨兴悦，杨立明，康云生，安海静，郝臻，武银，王燕. 2012. **天水地震台井下地电观测系统介绍及其分析**[J]. **地震研究**，**35**(1)：92—97.

Yang X Y，Yang L M，Kang Y S，An H J，Hao Z，Wu Y，Wang Y. 2012. Introduction and analysis of geo-electrical observation system in underground well at Tianshui station[J]. *Journal of Seismological Research*，**35**(1)：92—97 (in Chinese).

叶青，杜学彬，陈军营，谭大成，马占虎. 2005. 2003 **年大姚和民乐-山丹地震** 1 **年尺度预测**[J]. **地震研究**，**28**(3)：226—230.

Ye Q，Du X B，Chen J Y，Tan D C，Ma Z H. 2005. One-year prediction for the Dayao and Minle-Shandan earthquakes in 2003[J]. *Journal of Seismological Research*，**28**(3)：226—230 (in Chinese).

张世中，石航，王兰炜，胡哲，刘大鹏，魏连生，鞠永. 2013. **地电台站受城市轨道交通干扰的测试分析与抗干扰措施研究**[J]. **地震学报**，**35**(1)：117—124.

Zhang S Z，Shi H，Wang L W，Hu Z，Liu D P，Wei L S，Ju Y. 2013. Test analysis on disturbances caused by urban rail transit at geoelectric stations and measures to reduce its influence[J]. *Acta Seismologica Sinica*，**35**(1)：117—124 (in Chinese).

张秀霞，李飞，杨冯威，孙春仙，肖飞. 2009. **蔬菜大棚对新沂地震台地电阻率的影响**[J]. **地震地磁观测与研究**，**30**(**增刊**)：32—36.

Zhang X X，Li F，Yang F W，Sun C X，Xiao F. 2009. About the effect of the vegetable shelter for the earth resistivity at Xinyi seismic station[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*，**30**(Suppl.)：32—36 (in Chinese).

Balasco M，Colangelo G，Lapenna V，Loddo M，Siniscalchi A，Telesca L. 2004. Measuring apparent resistivity in a seismically active area of southern Italy[J]. *Phys Chem Earth*，*Parts A/B/C*，**29**(4/5/6/7/8/9)：329—337.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Brace W F, Orange A S. 1968. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding[J]. *J Geophys Res*, **73**(4): 1433—1445.

Busby J P. 2000. The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations[J]. *Geophys Prospect*, **48**(4): 677—695.

Du X B, Xue S Z, Hao Z, Zhang S Z. 2000. On the relation of moderate-short term anomaly of earth resistivity to earthquake[J]. *Acta Seismological Sinica*, **13**(4): 393—403.

Huang Q H, Lin Y F. 2010. Selectivity of seismic electric signal (SES) of the 2000 Izu earthquake swarm: A 3D FEM numerical simulation model[J]. *Proc Japan Acad: Series B*, **86**(3): 257—264.

Lu J, Qian F Y, Zhao Y L. 1999. Sensitivity analysis of the Schlumberger monitoring array: Application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan, China[J]. *Tectonophysics*, **307**(3/4): 397—405.

Lu J, Xue S Z, Qian F Y, Zhao Y L, Guan H P, Mao X J, Ruan A G, Yu S R, Xiao W J. 2004. Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the Longmen Shan in Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **145**(1/2/3/4): 87—97.

Park S K, Johnston M J S, Madden T R, Morgan F D, Morrison H F. 1993. Electromagnetic precursors to earthquakes in the ULF band: A review of observations and mechanisms[J]. *Rev Geophys*, **31**(2): 117—132.

Qian F Y, Zhao Y L, Huang Y N. 1996. Calculation of the parameters of georesistivity anisotropy and case history of earthquake precursors[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **9**(4): 617—627.

Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P. 1973. Earthquake prediction: A physical basis[J]. *Science*, **181**(4102): 803—810.

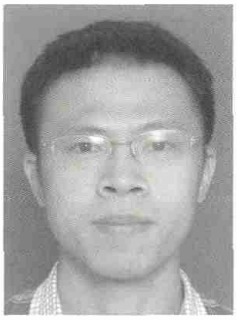
Wang C Y, Goodman R E, Sundaram P N, Morrison H F. 1975. Electrical resistivity of granite in frictional sliding: Application to earthquake prediction[J]. *Geophys Res Lett*, **2**(12): 525—528.

Wang C Y, Sundaram P N, Goodman R E. 1978. Electrical resistivity changes in rocks during frictional sliding and fracture[J]. *Pure Appl Geophys*, **116**(4/5): 717—731.

Yang C H, Cheng P H, You J I, Tsai L L. 2002. Significant resistivity changes in the fault zone associated with the 1999 Chi-Chi earthquake, west-central Taiwan[J]. *Tectonophysics*, **350**(4): 299—313.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

作者简介



卢江波　湖南大学土木工程学院在读博士研究生. 2009 年湖南大学土木工程学院桥梁与隧道专业毕业，获工学学士学位；2009 年 9 月至今，湖南大学土木工程学院桥梁与隧道专业硕博连读. 主要从事预应力孔道注浆质量检测与评估等方面的研究.

马洁美　中国地震局地球物理研究所助理研究员. 2003 年北京信息工程学院电子信息技术专业毕业，获工学学士学位；2006 年中国地震局地球物理研究所地球探测与信息技术专业毕业，获理学硕士学位. 现主要从事地震观测技术及地震计振动检测方面的研究.

石富强　陕西省地震局助理工程师. 2011 年兰州大学工程力学专业毕业，获工学硕士学位. 曾从事工程问题的力学建模与仿真研究，现主要从事地震地电学及地震活动相关分析方面的研究工作. 陕西省地震学会会员.

黄星　北京工业大学环境与能源学院在读博士研究生. 2011 年北京大学地球与空间科学学院毕业，获理学学士学位；2014 年中国地震局地震预测研究所固体地球物理专业毕业，获硕士学位. 主要从事青藏高原接收函数各向异性方面的研究.

注：冀战波、连尉平、潘常周等的简介分别见本刊 Vol. 36，No. 3；Vol. 30，No. 6；Vol. 29，No. 5.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net