



Engineering Achievements

极低频探地工程——无线电磁法

陆建勋^a, 卓贤军^a, 刘勇^b, 赵国泽^c, 底青云^d

^a China Ship Research and Development Academy, Beijing 100101, China
^b Wuhan Maritime Communication Research Institute, Wuhan 430079, China
^c Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China
^d Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

1. 引言

超低频 (SLF, 30~300 Hz) 电磁技术最早被应用于军事对潜深水通信。20 世纪 50 年代, 为了加强战略导弹核潜艇的隐藏性和安全性, 美国和苏联开始研究超低频通信, 以解决陆地指挥中心与数千千米外百米以下潜艇之间的通信问题。1969 年, 美国海军在威斯康星州克拉姆湖花岗岩低电导率地区建成了超低频试验台 (WTF), 1972

年, 与 4600 km 外水下 102 m 的潜艇进行通信的试验获得成功。20 世纪 80 年代, 美国将 WTF 台升级为正式工作台, 并在密执安州新建了 MTF (Michigan test facility) 台。同期, 苏联在科拉半岛低电导率地区建造了 Zevs 台, 实现了对核潜艇的水下战略指挥通信[1-5]。

20 世纪 90 年代, 美国和俄罗斯开始研究更低频率 (0.1~30 Hz) 的通信问题, 并将研究拓展到地球物理、空间物理等领域, 提出了国际极低频研究计划 (图 1)。

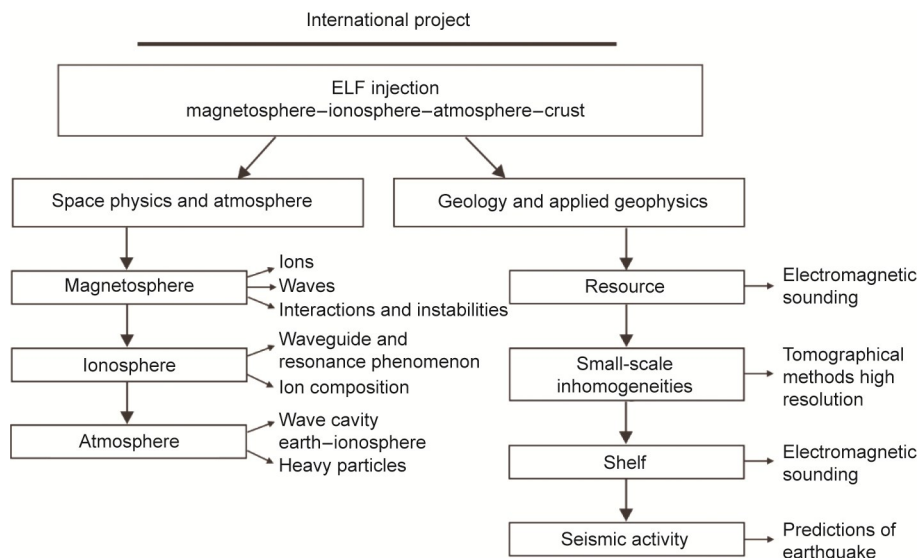


图 1. 国际极低频研究计划。

根据中国无线电频率划分标准, 0.1~300 Hz 频率范围包括了至低频 (TLF, 0.03~0.3 Hz)、极低频 (ELF, 0.3~30 Hz) 和超低频频段, 为了便于表达, 本文将其统称为极低频。

20世纪90年代, 在引进俄罗斯技术的基础上, 中国建立了第一个极低频试验台, 为我国极低频电磁技术的理论和应用研究提供了一个良好平台。2000年, 陆建勋院士与马宗晋院士首先在中国工程院开展了《利用极低频/超低频无线电波进行地震预报及地下资源探测系统的方案研究》, 深入研究了极低频电磁波的地-电离层波导传播技术[6-7], 针对现有人工源电磁法[如可控源音频大地电磁法 (CSAMT)]所用的移动发射源功率小, 存在信号覆盖范围小 (10~20 km)、探测深度浅 (1~1.5 km) 的缺点[8], 提出了应用固定大功率发射台信号, 将发射的电磁波中通过地-电离层波导传播的部分应用于人工源电磁法中, 使得实际可应用的信号半径扩大到几千千米、探测深度提高到10 km, 大大拓展了现有人工源电磁法的应用范围。为了区别于其他电磁法, 我们将该方法命名为无线电磁法, 简称WEM法。

为了更好地研究和应用WEM法, 发挥其在资源探测和地震预测等方面的作用, 提出了WEM法所需基础设施的建设方案——极低频探地 (WEM) 工程[9]。2005年, 利用试验台对WEM法进行了资源探测和地震预测试验, 初步验证了WEM法在资源探测和地震预测方面的应用效果[10-11]; 2006年, 该项目被列为“十一五”国家重大科学技术基础设施建设项目之一。

2. 工程总体情况

2.1. 工程目标

WEM工程的目标如下:

(1) 建造极低频发射台站等试验设施, 发射的0.1~300 Hz 高信噪比极低频电磁信号基本覆盖中国国土和领海区域;

(2) 利用极低频电磁波穿透介质和大面积覆盖的传播机理, 开展WEM法的理论和方法研究, 以及地下资源探测和地震预报等方面的探索性研究和工程试验研究;

(3) 探求复杂构造深部找矿新理论、地震电磁异常前兆新规律和机理, 促进资源探测和地震预测领域具有重大科学意义的原创性成果的产生;

(4) 推动地球物理学、空间物理学和无线电物理学等基础学科的发展。

2.2. 工程主要成果

工程完成了极低频发射台及与资源探测和地震预测相配套的基础设施建设, 深入研究了WEM法的原理和工程应用, 并应用建成的基础设施开展了地下资源探测、地震预测、大陆架信号测试等试验, 取得多项成果。

2.2.1. 建成了世界上首座民用大功率极低频发射台

在华中低电导率地区建立一座大功率发射台 (简称WEM台), 配备两条基本正交的发射天线, 其中, 东西向天线长约80 km, 南北向天线长约60 km, 天线为两端接地的电力线, 每条天线各配一台500 kW的发射机 (发射台部分设备见图2), 发射工业和信息化部无线电管理局批准的0.1~300 Hz范围内的98个频率信号, 其信号的频率准确度优于 3×10^{-8} , 频率稳定度优于 3×10^{-8} 。WEM台发射的稳定、高信噪比信号满足资源探测、地震预测及其他前沿领域的研究和应用需要 (图3)。

发射台建成后, 在全国范围内 (北至黑龙江漠河, 西至新疆奎屯) 对发射台发射的0.1~300 Hz信号强度进行了测试。测试结果表明, WEM台发射0.5~300 Hz信号覆盖半径可达2000~3000 km, 信噪比为10~20 dB; 0.1~0.5 Hz信号覆盖半径为1000~2000 km, 信噪比为10~20 dB (表1)。

2.2.2. 地下资源探测研究和应用成果

与现有人工源电磁法不同, WEM法是一种新型人工源电磁法。针对WEM法的特点, 开展了极低频电磁波传播机理的理论研究和WEM法在资源探测中的应用研究, 建立了极低频电磁波传播的电离层-大气层-地壳耦合模型和WEM数据处理平台, 实现超大范围组网式三维极低频电磁波深部资源探测, 以获取10 km深度范围内高精度和高分辨率的电性结构, 为油气、矿产资源的评估和找矿提供可靠的依据[12-15]。

工程建设期间, 在内蒙古曹四夭钼矿区、河南省泌阳盆地、川东重庆明月峡构造区以及四川遂宁地区等金属矿、油气区进行了探测试验 (图4、图5), 验证了WEM法在金属矿产和油气资源中的探测能力。

2.2.3. 地震预测研究和应用成果

在首都圈和南北地震带南段地震重点灾害预防区建成了各由15个固定台站和两个流动台组成的极低频地震电磁观测网 (表2、表3), 可以同时观测WEM台人工源和天然源极低频电磁信号; 依托已有的国家地震专网, 建立了地震服务子系统, 具备数据传输与监控、数据管理、数据处理与应用等功能, 可以实时监测首都圈和南

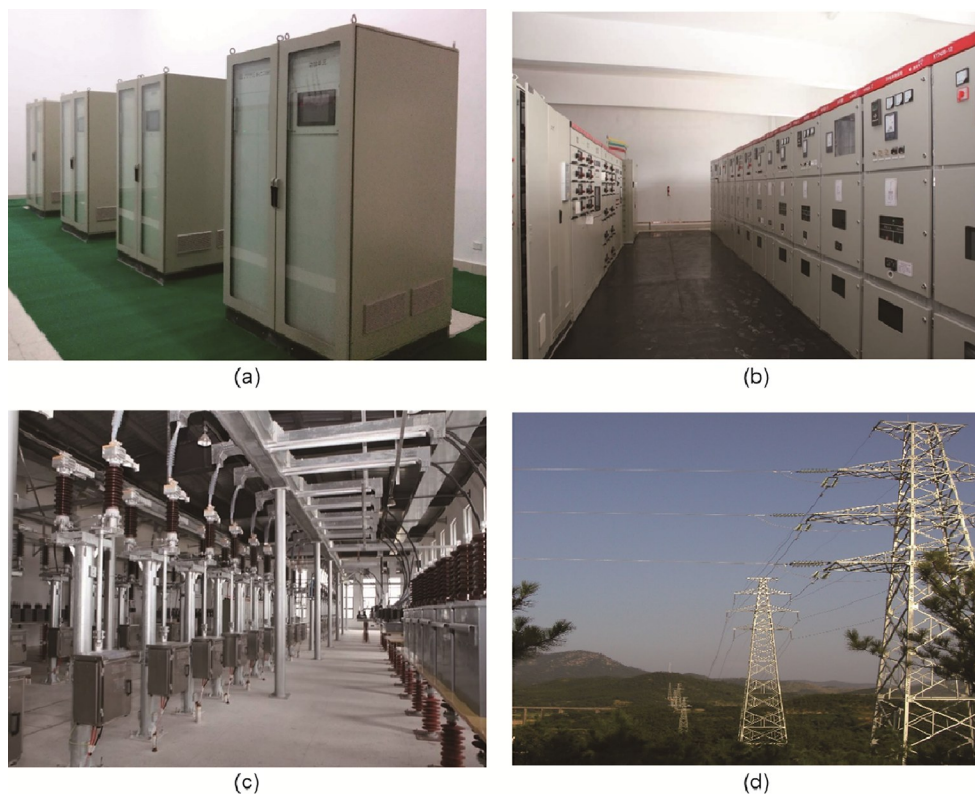


图2. WEM发射台部分设备图。(a) 2×500 kW发射机；(b) 控制机柜；(c) 天线调谐室；(d) 馈线塔。

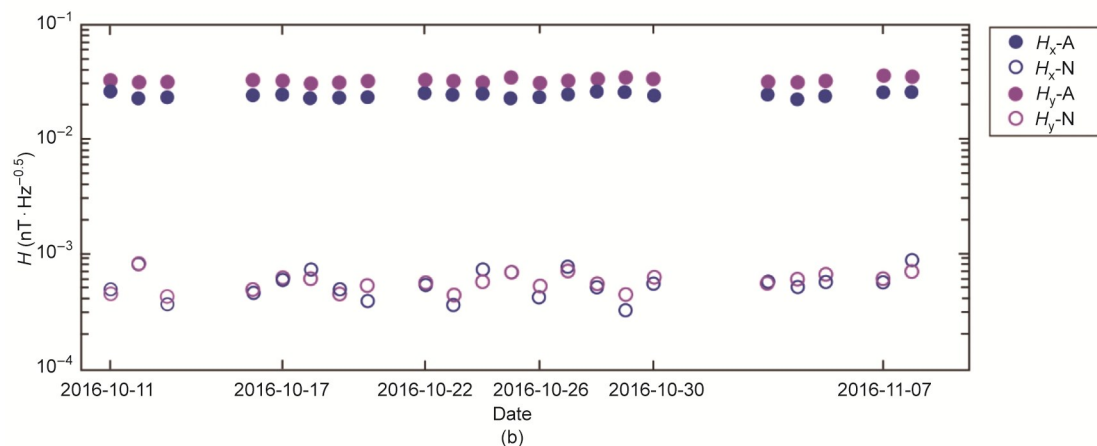
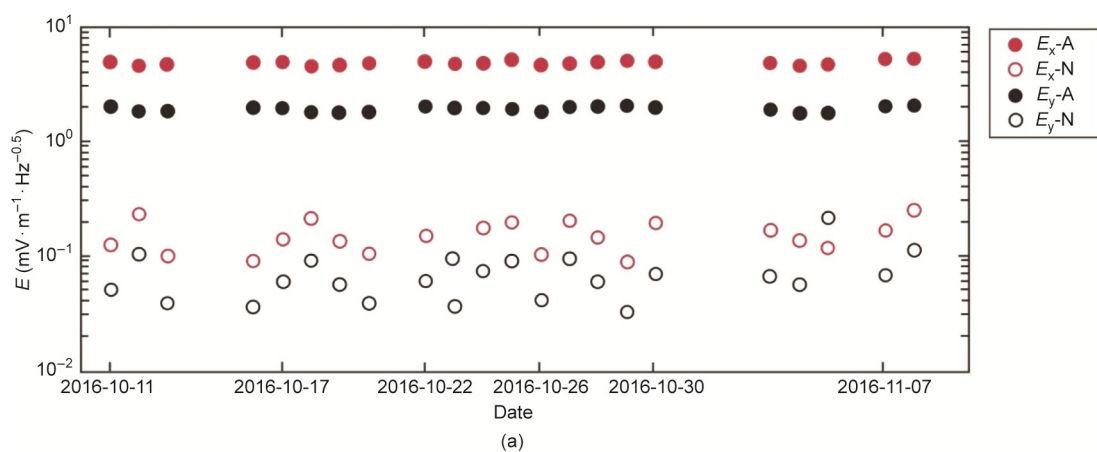


图3. WEM台和天然源辐射的电 (a) 磁 (b) 场功率谱密度的对比。E: 电场; H: 磁场; x: 南北向接收; y: 东西向接收; A: WEM台; N: 天然源。

表1 WEM台发射信号实际测试结果

Frequency (Hz)	Coverage radius of transmitting signals (km)	SNR (dB)
0.1—0.5	500—1000	20
	800—2000	10
0.5—10	2000	20
	3000	10
10—300	3000	20
	> 3000	10

北地震带南段地下电性介质结构和电磁场的动态变化(包括电磁时间序列、频谱和视电阻率等参数),用于研究地震与电磁异常的关系和机理,提高地震监测预测能力[16—18]。

2015年以来,地震电磁台网观测产出大量观测数据,包括2017年3月27日云南漾濞5.1级地震、2017年8月8日四川九寨沟7.0级地震的余震以及2017年9月30日四

川青川5.4级地震等,可以清楚观测到地震前后电磁场或电性结构的变化,如漾濞5.1级地震数周前开始出现的74 Hz的电阻率和阻抗相位脉动式增大的现象(图6),四川青川5.4级地震前8天接收到的WEM台4 Hz电磁信号功率谱的变化幅度明显增大的现象(图7)。目前,地震电磁数据已进入地震预测数据库,作为地震预测参数之一。

2.2.4. 其他前沿领域研究和应用成果

根据极低频研究国际计划,极低频电磁技术可以广泛应用于地球物理、空间物理等领域。在WEM工程建设过程中,开展了大陆架信号测试试验,在中国南海海域水下300 m接收到WEM台发射的信号,为利用WEM法进行大陆架资源探测奠定了基础,进一步拓展了极低频电磁技术应用领域,推进极低频电磁技术的发展。

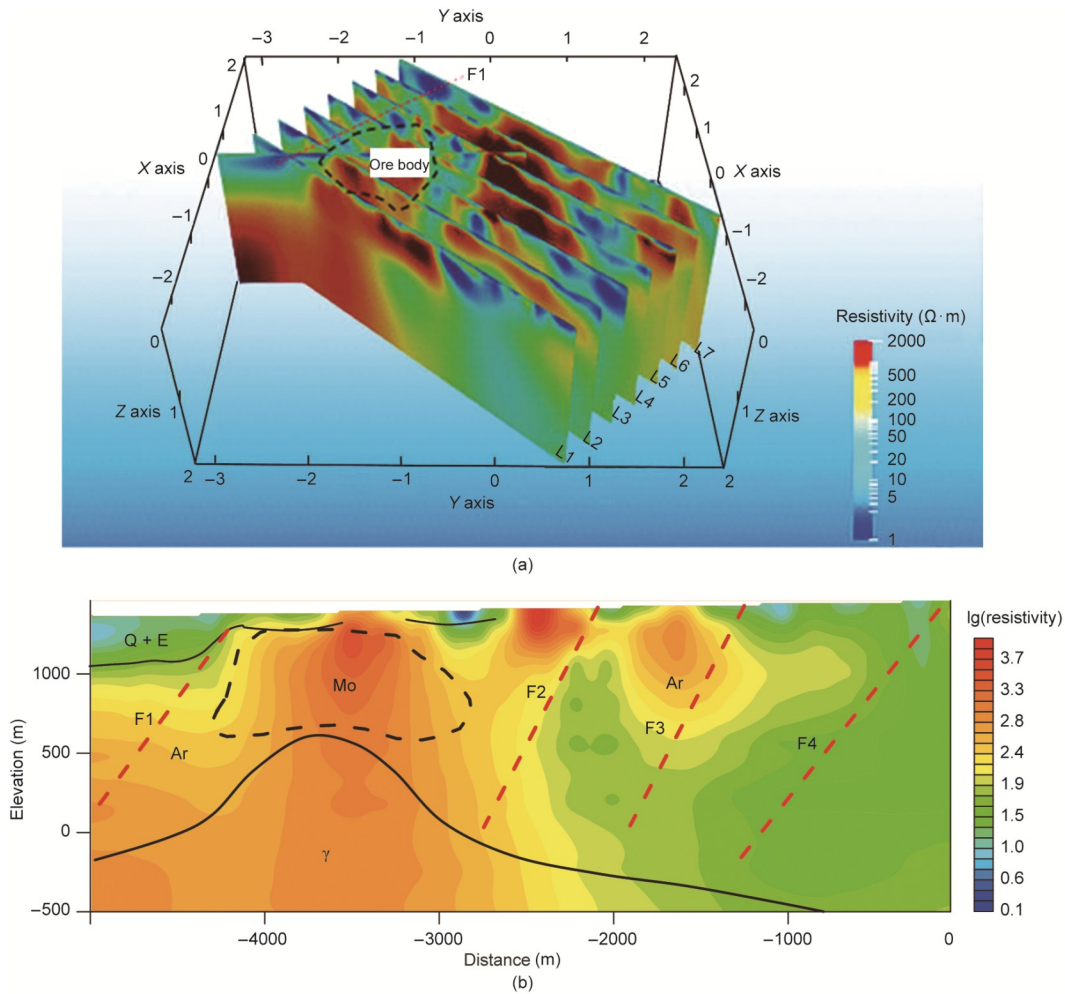


图4. 内蒙古曹四天钼矿WEM探测综合解释结果。(a)电阻率三维切片图,图中黑色虚线为矿体的平面展布范围;(b)横切片的反演断面,图中黑色虚线为钼矿的埋藏深度范围。L1~L7为测线编号;F1~F4为断层编号;Q为第四系地层;E为早第三系地层;Mo为钼矿体;Ar为太古宙地层; γ 为花岗岩。

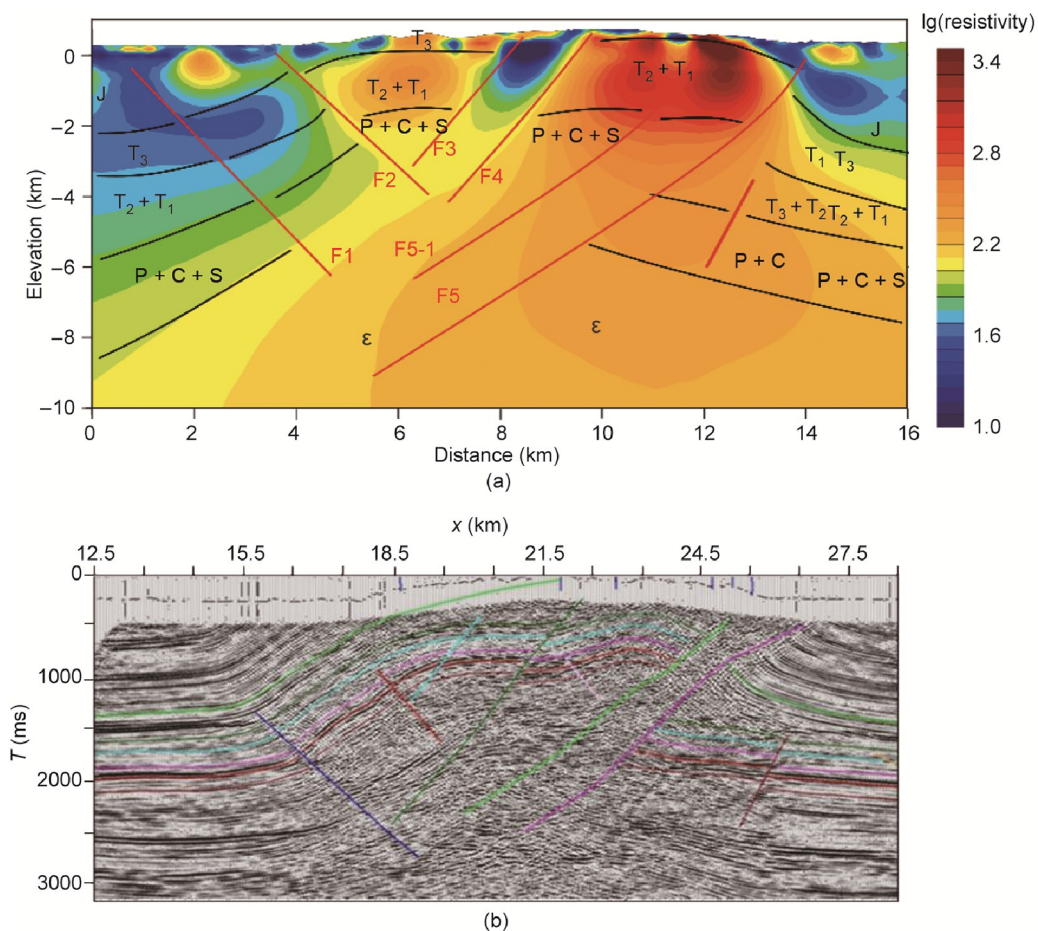


图5. 重庆明月峡油气构造WEM探测结果(a)与地震法测量断面(b)的比较。J为侏罗系地层；T为三叠系地层，1、2、3代表三叠纪的早、中、晚三个阶段；P为二叠系地层；C为石炭系地层；S为志留系地层；ε为寒武系地层。

表2 首都圈15个地震电磁台站的位置

Station	Longitude (°)	Latitude (°)
BD (Baodi)	117.398	39.697
SX (Shexian)	113.642	36.544
HL (Huailai)	115.522	40.443
FN (Fengning)	116.573	41.200
WA (Wenan)	116.453	38.846
WD (Wudi)	117.680	38.018
AQ (Anqiu)	119.218	36.374
LY (Laiyang)	120.721	36.988
JX (Juxian)	118.895	35.543
DT (Datong)	113.713	40.086
XX (Xiaxian)	111.224	35.107
DX (Daixian)	113.057	39.064
HH (Huhhot)	111.563	40.849
YK (Yingkou)	122.604	40.683
DL (Dalian)	121.764	39.577

表3 南北地震带南段15个地震电磁台站的位置

Station	Longitude (°)	Latitude (°)
CZ (Chongzhou)	103.518	30.806
JG (Jiange)	105.560	32.205
BZ (Bazhong)	106.745	31.841
JL (Jiulong)	101.513	28.996
PD (Pingdi)	101.836	26.201
MB (Mabian)	103.539	28.836
JGU (Jinggu)	100.734	23.502
MD (Mouding)	101.532	25.302
YX (Yuxi)	100.181	25.698
QJ (Qiaojia)	102.943	26.910
JS (Jianshui)	102.761	23.651
ML (Mengla)	101.528	21.426
XP (Xinping)	101.906	24.103
YJ (Yingjiang)	114.558	41.407
LJ (Lijiang)	100.174	26.977

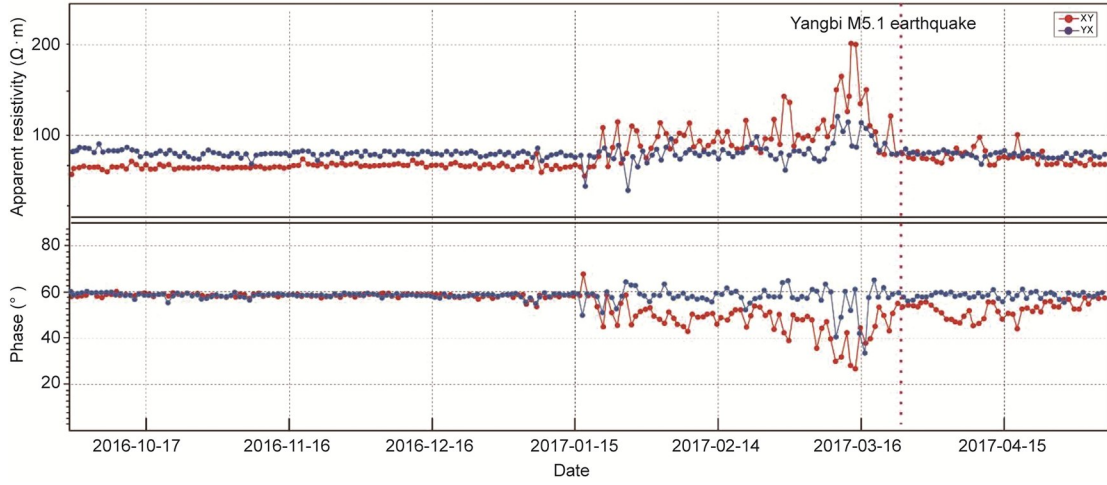


图6. 漾濞地震前后74 Hz的视电阻率(上)及阻抗相位(下)的波动变化。XY: 南北向视电阻率; YX: 东西向视电阻率; M5.1: 震级为里氏5.1级。

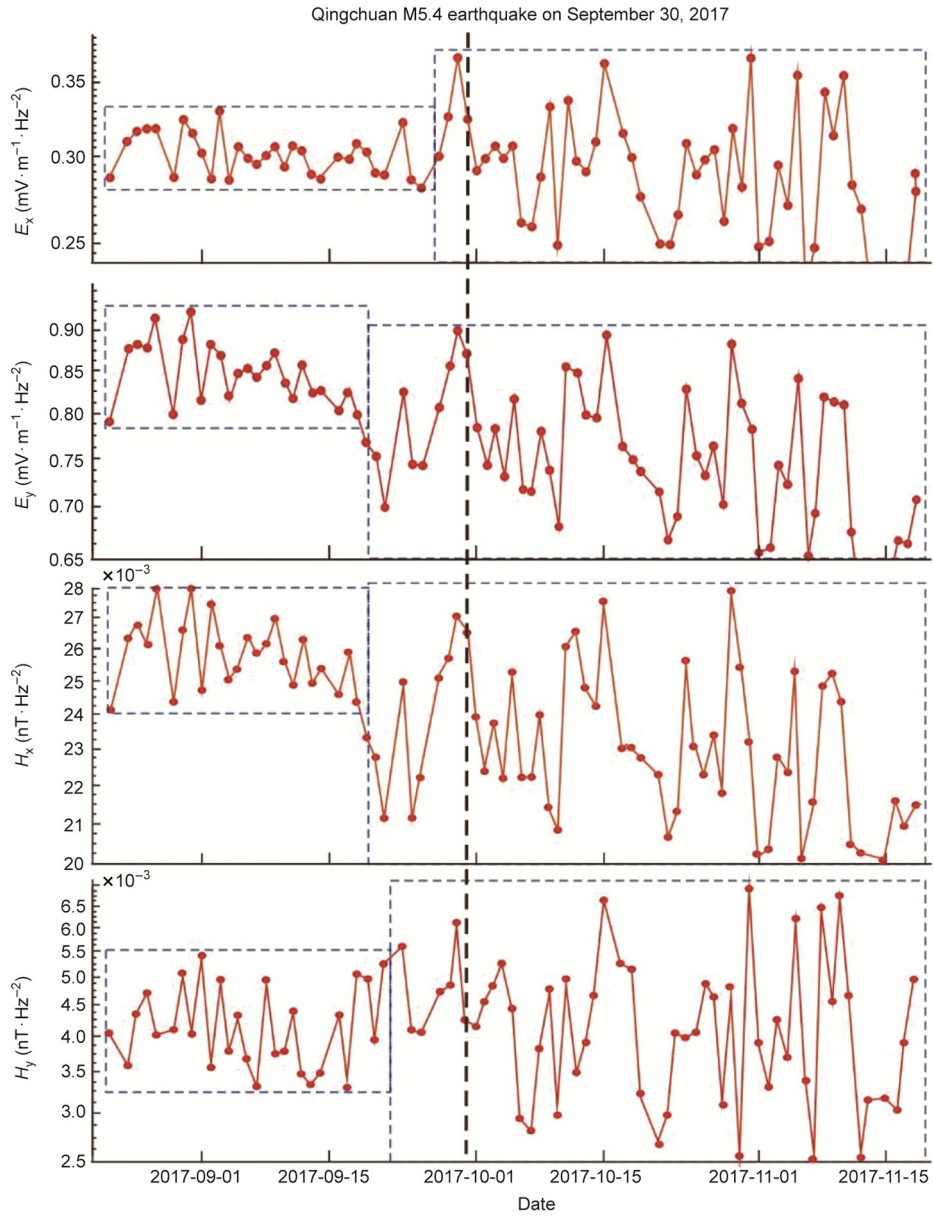


图7. 青川地震前后4 Hz电磁波功率谱的波动范围变化。M5.4: 震级为里氏5.4级。

3. 关键技术与创新点

WEM工程的关键技术与创新如下:

(1) 应用地-电离层波导传播技术, 提出了极低频无线电磁法。该方法兼有天然源电磁法和现有人工源电磁法的优点, 具有抗干扰能力强, 测量深度大、精度高和施工简便的优点, 为地下资源探测、地震预测和其他前沿领域的研究提供了一种新的科学技术平台。

(2) 攻克了极低频大功率级联合成、双频段高精度信号生成和极低频天线复杂参数匹配调谐等关键技术, 解决极低频大功率高效输出和辐射难题, 成功研制了极低频发射系统, 发射的高精确、高稳定的极低频电磁信号满足预测探测、地震预测及其他前沿领域的研究。

(3) 开展极低频电磁波传播机理的理论研究, 提出了适合极低频电磁波传播的电离层-大气层-地壳耦合模型, 解决了超大范围组网式三维极低频电磁波深部资源探测难题, 首次实现了人工源大面积、远距离、大深度的油气矿产资源探测。

(4) 应用极低频电磁地震观测台网, 解决了电磁场连续观测、快速诊断等技术难题, 提出了空间电磁场和地下结构监测的四维动态变化的WEM地震电磁观测方法, 提高了与地震活动相关的电磁异常信息的识别和捕捉能力, 在地震电磁监测和预报实践中取得了显著效果, 填补了中国在人工源交变电磁监测和天然源极低频段电磁监测方面的空白。

(5) 提出了极低频水下广域探测方法。通过理论计算和 underwater 接收试验, 首次验证了极低频大面积、大深度穿透海水的功能, 为实现“透明海洋”、进行海洋资源探测及其他探测应用奠定了基础。

4. 工程的应用与发展

WEM工程的建设, 为极低频电磁技术的研究和应用提供了软硬件设施, 将促进极低频电磁技术的发展, 提高资源探测能力和地震预测水平, 也为研究地下深层地质、空间物理和无线电物理等提供一种有力的新科学研究手段, 具有广阔的应用前景。

4.1. 促进电磁探测技术的发展

电磁法正从天然源电磁法(无源)发展到人工源电磁法(有源), 电磁数据处理手段从一维、二维向三维发展。WEM法的信号由一个固定的发射源统一发射, 便于大面积组网式观测, 具有信噪比高、覆盖面积大等特点, 为三

维电磁勘探技术的发展提供了理想的条件, 将明显地提高地下资源探测精度和地震电磁监测地震预测水平。WEM法将推动人工源三维电磁技术的发展, 促进地下资源勘探和地震电磁监测技术实现跨越式发展。

4.2. 提高地下资源探测水平

WEM法的信号具有信噪比高、覆盖面积大、探测深度大等特点, 通过控制发射不同频率的电磁信号对地质剖面或区域实行分层扫描, 形成二维或三维的电性结构图像, 将明显地提高地下资源探测精度。这对于复杂地区和深部地区的油气、矿产资源的勘探和开发具有重要的作用[19]。

WEM台发射的高信噪比信号和背景场经过海水衰减后依然保持高信噪比, 因此, WEM法也完全适用于大陆架区域的海洋资源的勘探, 为中国大陆架地区的石油、矿产资源的勘探开发和地质调查提供一种新手段。

4.3. 提高地震电磁监测和地震预测水平

WEM台提供的稳定高精度电磁场信号覆盖范围大, 可以在某些地震频发区域长期组网接收, 同时观测所在区域地壳结构的电性参数变化信息, 以及电磁信号在传播过程中携带的大气层和电离层信息, 为我们提供了一种同时捕捉地下深层地震活动和相关电离层变化(即“源和场”的异常信息)的综合技术手段, 可以在很大程度上提高对异常的识别和捕捉能力, 为确定地震发生地点、时间和震级提供一种最新的科学研究工具[20]。

4.4. 促进相关领域的发展

WEM工程是“深地、深海、深空”研究的重要设施, WEM台发射的稳定高信噪比极低频电磁信号, 为空间物理、大气物理、地质、应用地球物理及军事通信等领域的研究提供了新的技术手段, 将推动地球物理学、空间物理学和无线电物理学等基础学科的发展。

5. 结论

WEM工程提出的WEM法及其应用, 涉及无线电、地球物理等诸多学科, 取得多项突破性进展, 是原创性工程技术之一。在工程验收过程中, 与会专家给予了高度的评价, 认为“该项成果是中国无线电通信技术与地球物理学交叉融合的创新产物, 突破了0.1~30 Hz的极低频发射难题, 成果原创性强, 整体技术性能处于国际领先水平。”

致谢

感谢中国工程院对极低频探地工程立项和二期工程关键技术研究的支持。

References

- [1] Galjs J. Terrestrial propagation of long electromagnetic waves. Oxford: Pergamon Press; 1972.
- [2] Rowe H. Extremely low frequency (ELF) communication to submarine. *IEEE Trans Commun* 1974;22(4):371–85.
- [3] Bannister PR. Summary of the Wisconsin test facility effective earth conductivity measurements. *Radio Sci* 1976;11(4):405–11.
- [4] Bannister P, Williams F, Dahlvig A, Kraimer W. Wisconsin test facility transmitting antenna pattern and steering measurements. *IEEE Trans Commun* 1974;22(4):412–8.
- [5] Bannister PR, Williams FJ. Results of the August 1972 Wisconsin test facility effective earth conductivity measurements. *J Geophys Res* 1974;79(5):725–32.
- [6] Lu J, editor. ELF & SLF wireless technology. Harbin: Harbin Engineering University Press; 2011. Chinese.
- [7] Yuan Y. Propagation and noise of SLF & ELF electromagnetic waves. Beijing: National Defense Industry Press; 2011. Chinese.
- [8] Di Q, Wang R. Forward and inversion of CSAMT method and its application. Beijing: Science Press; 2007. Chinese.
- [9] Zhuo X, Lu J, Zhao G, Di Q. The extremely low frequency engineering project using WEM for underground exploration. *Eng Sci* 2011;13(9):42–50. Chinese.
- [10] Zhao G, Lu J. Monitoring & analysis of earthquake phenomena by artificial SLF waves. *Eng Sci* 2003;5(10):27–33. Chinese.
- [11] Zhuo X, Zhao G, Di Q, Bi W, Tang J, Wang R. Preliminary application of WEM in geophysical exploration. *Prog Geophys* 2007;22(6):1921–4. Chinese.
- [12] Di Q, Wang M, Fu C, Li D, Xu C, Zhuo X. Research on electromagnetic wave propagation characteristics of “earth-ionosphere” mode. Beijing: Science Press; 2013. Chinese.
- [13] Di Q, Xue G, Fu C, Wang R. An alternative tool to controlled-source audio-frequency magnetotellurics method for prospecting deeply buried ore deposits. *Sci Bull* 2020;65(8):611–5.
- [14] Di Q, Tian F, Suo Y, Gao R, Li S, Fu C, et al. Linkage of deep lithospheric structures to intraplate earthquakes: a perspective from multi-source and multi-scale geophysical data in the South China Block. *Earth Sci Rev* 2021;214:103504.
- [15] Di Q, Fu C, Xue G, Wang M, An Z, Wang R, et al. Insight into skywave theory and breakthrough applications in resource exploration. *Natl Sci Rev* 2021;8(12):nwab046.
- [16] Zhao G, Wang L, Tang J, Chen X, Zhan Y, Xiao Q, et al. New experiments of CSELF electromagnetic method for earthquake monitoring. *Chin J Geophys* 2010;53(3):479–86. Chinese.
- [17] Zhao G, Bi Y, Wang L, Han B, Wang X, Xiao Q, et al. Advance in alternating electromagnetic field data processing for earthquake monitoring in China. *Earthq Sci* 2015;45(1):22–33.
- [18] Zhao G, Zhan Y, Wang L, Wang J, Tang J, Xiao Q, et al. Electromagnetic anomaly before earthquakes measured by electromagnetic experiments. *Earthq Sci* 2009;22(4):395–402.
- [19] Guo X, Hu D, Li Y, Duan J, Zhang X, Fan X, et al. Theoretical progress and key technologies of onshore ultra-deep oil/gas exploration. *Engineering* 2019;5(3):458–70.
- [20] Ding J, Shen X, Pan W, Zhang J, Yu S, Li G, et al. Seismo electromagnetism precursor research progress. *Chin J Radio Sci* 2006;21(5):791–801. Chinese.