

# 地震电磁信号传播的控制模拟实验

黄清华

(北京大学地球与空间科学学院地球物理学系, 计算地球动力学重点实验室, 北京 100871. E-mail: [huangq@pku.edu.cn](mailto:huangq@pku.edu.cn))

**摘要** 在考虑地理的相似性模型和波导模型的基础之上, 提出了一种探讨地球内部所产生的地震电磁信号在地壳与大气层中的传播特征的室内模拟实验方法, 并通过一些控制实验评估了背景电磁场、地形、边界条件、“源”(位置、强度、频率)、介质电性等对实验结果的影响, 讨论了该模拟实验方法的可信性及可扩展性. 该方法为地震电磁学中的难题之一的电磁信号传播问题提供了一种直观的研究途径.

**关键词** 电磁信号传播 地震电磁学 波导模型 模拟实验

与地震的孕育和发生相关联的地球电磁学研究在近二十年来取得了突飞猛进的发展, 并已逐步发展形成了一门新兴的边缘学科——地震电磁学. 尤其是中国、日本、俄罗斯、希腊、美国等国的学者, 在地震电磁学研究方面已经积累了宝贵的观测资料和经验, 取得了一些有创意的研究成果, 也因此令一部分学者对利用电磁学手段来从事地震预报研究产生了乐观的预期<sup>[1-9]</sup>.

然而, 由于实际的地震孕育过程的高度复杂性以及地球内部结构的非均匀性, 一些地球电磁学观测结果迄今尚未得到合理的解释. 因此, 地震电磁信号的“源”的物理机制以及信号传播的研究不仅已成为目前地震电磁学研究的两大难题, 也是该领域的两大研究热点. 在地震电磁信号的发生源方面, 国内外学者分别从室内实验、野外小尺度实验及理论模型等角度开展了一些有创意的研究工作<sup>[10-13]</sup>. 本文不拟讨论地震电磁信号的发生源的问题, 而是研究前面所提及的另一难题——地震电磁信号的传播问题.

据作者所知, 目前国内尚未见到从事与地震孕育有关的地球电磁信号传播研究的报道, 国外从事相关研究者也少见报道. Dosso等<sup>[14]</sup>曾通过模拟实验和导电地球介质的电磁感应原理来研究俯冲带附近观测到的磁场变化特征, 但并未研究地震电磁信号的传播. 自从Varotsos及合作者<sup>[3]</sup>提出了利用地震电信号(SES)来预报地震的VAN(希腊的三位物理学家Varotsos, Alexopoulos and Nomicos的首字组合)方法之后, 引起了支持者和反对者的激烈辩论<sup>[15]</sup>, 其中争议之一在于信号的选择性(Selectivity)、敏感性(Sensitivity)、远距离传播特征等有关地震电磁信号传

播的问题令人费解. 为此, Varotsos等<sup>[16]</sup>曾在均匀的地壳模型中引入一个导电通道这一特例来解释地震电磁信号在离震源较远处可被检测到的现象. 但实际地壳中这样的导电通道是否客观存在呢? 迄今尚有待来自地下构造研究方面进一步的证据支持. 作者及合作者则通过模拟实验方法对地震电磁信号的传播问题进行了一些探索性的研究工作, 并对部分与地震相关的电磁学观测现象给出了较合理的解释<sup>[17,18]</sup>. 然而, 在以往的研究中仅考虑了地表地理条件所引起的电导率非均匀性对电磁信号传播的影响, 而未能对“模型地壳”的介质电性等条件对实验结果的影响进行定量的评估. 这可能会在一定程度上令人对前述模拟实验方法的可信性及其应用前景表示怀疑. 因此, 有必要针对该研究提出并进行一些控制实验, 探讨诸如背景电磁场、地形、边界条件、“源”(位置、强度、频率)、介质电性等条件对实验结果的影响. 这些研究一方面可检验以往研究结果的可靠性和采用该研究方法来评估与地震孕育相关的电磁信号在地壳内和大气层中的传播特征的可行性, 另一方面也可为今后进一步从事相关研究工作提供重要的参考依据.

为此, 本文以1995年1月17日在日本神户发生的7.2级地震为例, 通过对该地震的模拟及相应的控制实验研究, 来探讨前述模拟实验方法的可信性、可行性及其应用前景. 本文之所以选择神户地震作为研究对象, 一方面是因为该地震是日本近几十年来灾害最大、最有代表性、最值得深入研究的一次地震<sup>[19]</sup>, 另一方面也是因为有一些可能与该地震相关

1) Huang Q. Theoretical and experimental study on seismoelectric signals and earthquake-related phenomena. Ph D Thesis, Osaka Univ, 1999. 1~107

的电磁现象的观测报告<sup>[8,20,21]</sup>, 其中不少观测资料尚未得到合理的解释.

### 1 模拟实验方法

由于本文所要研究的是与地震孕育过程有关的地球电磁信号的传播问题, 而这部分信号源自震源或孕震区, 该信号既可能直接在地壳传播, 也可能通过陆地进入到大气中后而在大气层中传播, 因此, 可以预期该信号将在地壳和大气层中传播. 该过程可以用电磁信号在图 1 所示的波导模型中的传播来予以描述. 也就是说, 当同时考虑了前述波导模型和地理相似性原理之后, 电磁信号在地壳和大气层中的传播过程可以利用图 2 所示的模拟实验方法在室内进行模拟. 具体而言, 通过信号发生器在“模型地壳”内某处(“源”)产生特定频率的电磁信号, 同时通过与检测处理系统和控制装置相连接的可移动的探头来接收“模型地壳”表面的电磁信号, 整个实验过程均通过与信号发生器、接收器、控制设备等相连接的个人电脑来予以控制. 因此, 以此模拟实验的方法可直接在“模型地壳”表面“监测”特定源的电磁信号在地壳与大气层中的传播状况.

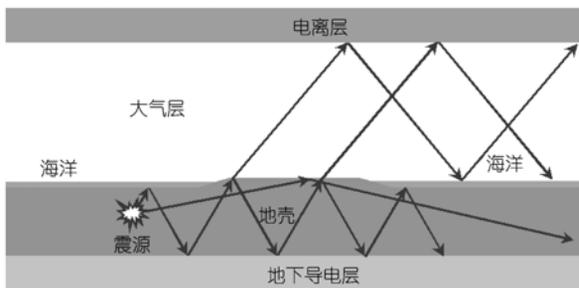


图 1 波导模型示意图

尽管实际的地壳厚度因地而异, 电离层高度也随空间和时间而出现起伏, 在本文的模型中假定地壳厚度和电离层高度为常数. 这种假定一方面是为了简化的目的, 即尽量减小不必要的复杂干扰对实验的影响, 以便能更简洁地探讨本文所感兴趣的因素对电磁信号在地壳和大气层中的传播过程的影响; 另一方面是因为本文所研究的区域局限于一个相对局部的小范围内, 地壳厚度和电离层高度随空间的变化并不太大, 因此, 令这两个参数为常数的假定是合理的.

在本模拟实验研究中, 采用的比例尺为 1:1,360,000, 其中, 以一块花岗岩板或黏土板模拟的

“模型地壳”的尺寸为 610 mm × 610 mm × 22 mm (相当于实际的 830 km × 830 km × 30 km, 以下如无说明, 模型数据后面括号内的数值均代表相当于实际模拟对象之值), 即本实验选取的地壳厚度为 22 mm (30 km); 在“模型地壳”表面绘制一幅以 1995 年神户地震的震中为中心的地图, 其中的海洋部分通过覆盖金属铝箔来模拟; 分别以金属铝板来模拟地壳底部的导电层和电离层, 选取的电离层高度为 73 mm (100 km); “源”位于“模型震源”(“模型地壳”中心下方 7.3 mm (10 km)) 处; 信号源使用的是 MWSG-18SX 型信号发生器, 产生的信号频率从 100 MHz 至 10 GHz, 该频率段相当于实际野外的 73.5~7350 Hz, 正好覆盖了许多有报道的地震电磁信号的频率范围<sup>[7,8]</sup>, 接收器采用的是 R3271 型频谱分析仪; 检测通过一台 MP3300 型两轴绘图仪来实现, 检测范围为 400 mm × 280 mm (544 km × 381 km).

### 2 控制实验及结果

#### 2.1 背景电磁场

为了评估本实验中背景电磁干扰的影响, 有必要对实验条件下的背景电磁场进行实测. 为此, 利用图 2 所示的实验方案, 在“无源”(断开信号发生器)的情况下进行实验. 结果在“模型地壳”表面检测到如图 3 所示的电磁信号. 从该图中可以看出, 背景电磁信号几乎覆盖了整个“模型地壳”表面, 分布杂乱无章, 信号整体较弱, 且波动不大, 其强度主要介于 -95~-100 dBm 之间. 由于本实验中所使用的信号接收系统的检测下限大约为 -100 dBm, 因此, 无法区别比 -100 dBm 更弱的电磁干扰. 上述关于背景电磁场的实测结果表明, 在本模拟实验采用的现有实验装置条件下, 只有在被检测的电磁信号比 -95 dBm 更强时才有实际意义.

#### 2.2 地形的影响

为了评估地形条件对本实验中电磁信号传播的影响, 有必要在实验中引入“模型地形”, 并对引入“模型地形”前后实验的结果进行比较分析. 由于海水是一种良导体, 本实验将满足地理相似性原理的地图绘于“模型地壳”表面, 并在其中的“海洋”部分铺上导电材料(金属铝箔), 以达到引入“模型地形”的目的. 在未考虑地形因素时, 在“模型地壳”表面检测到的低频(频率低于相应波导的截止频率)电磁信号主要集中在源的附近, 且强度随距离的增大而衰减;

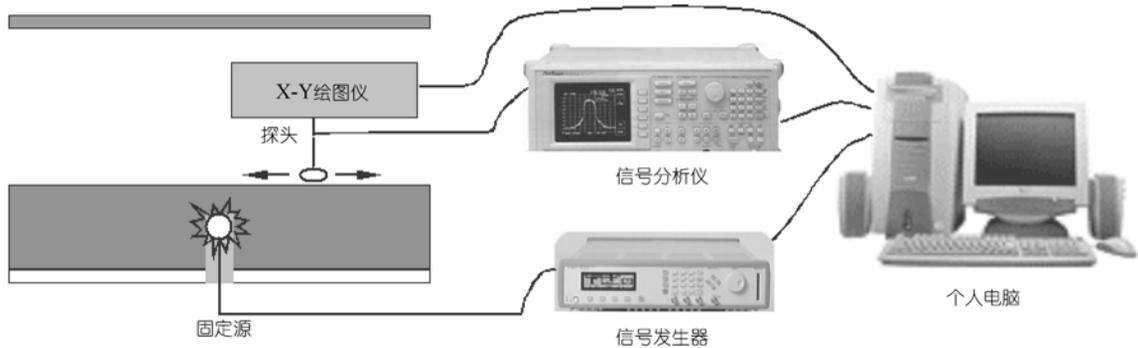


图2 模拟实验示意图

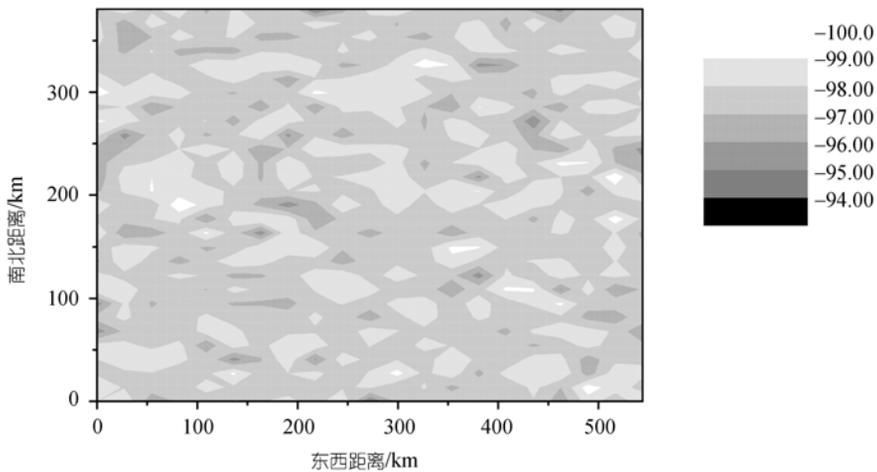


图3 在“模型地壳”表面检测到的背景电磁场的空间分布图

图中给出的实验检测范围为 400 mm × 280 mm，所模拟的区域相当于 544 km × 381 km。为便于与实际的神户地区对比，图中的坐标已根据比例尺换算为模拟区域的大小

而在引入“模型地形”且保持其他实验条件不变的情况下进行实验时，由于复杂地形所造成的电阻率分布的高度不均匀性，电磁信号不再单纯局限于源区，还可能出现在离“源”较远的部分地区。这种地表电阻率非均匀分布被认为是对观测资料中的低频电磁信号的选择性特征的一种合理解释<sup>[17,18]</sup>。

### 2.3 边界条件、“源”(位置、强度、频率)的影响

由于本实验所采用的是有限的“模型地壳”，因此，与实际的地壳相比，可能会由于边界效应而对实验产生影响。为了评估边界条件对本实验中电磁信号传播的影响，本实验通过选择比检测区域更大的“模型地壳”来减小边界效应，同时还采用导电的“模型地壳”边界来比较不同边界对实验结果的可能影响。结果表明导电边界和自由空气边界下得到了相似的电磁场空间分布，所不同的只是在导电边界情形下的电磁信号稍强一些。

本实验还通过对“源”的选择来评估不同的位置、强度和频率对实验的影响。结果表明对应于不同位置(深度)以及不同强度的“源”均得到了相似的电磁场空间分布图像，只是在深度较浅、强度较强的情形下检测到的电磁信号稍强一些。而对“源”的频率的控制实验则表明电磁场空间分布图像依赖于“源”的频率，当频率低于相应波导的截止频率时主要表现为随距离的增大而衰减，而当频率高于相应波导的截止频率时则主要呈现出环状的传播图像。

### 2.4 介质电性的影响

为了评估“模型地壳”的介质电性对本实验中电磁信号传播的影响，本实验分别选择了具有不同电性的花岗岩和黏土所构成的“模型地壳”。图4给出的是模拟神户地震高频电磁场在上述两种不同的“模型地壳”表面(两者均引入了“模型地形”)的空间分布的例子。结果表明两种情形下电磁信号均表现出某种

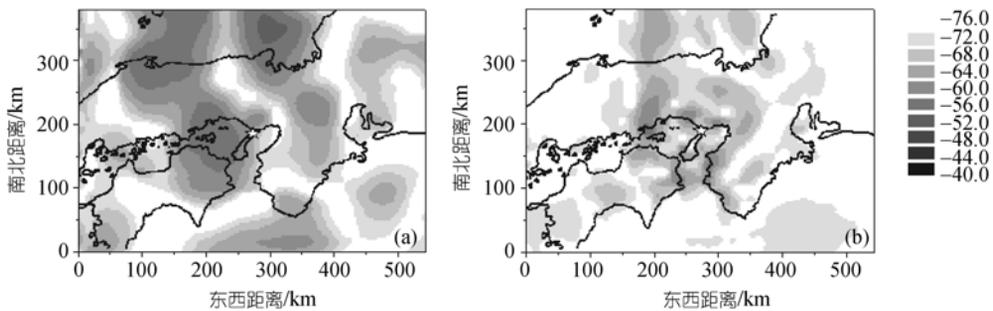


图 4 引入“模型地形”之后,在“模型地壳”表面检测到的高频电磁场的空间分布图  
图中的显示范围及坐标说明同图 3。(a)花岗岩“模型地壳”;(b)黏土“模型地壳”

程度的远距离传播特性,且在“模型地壳”表面得到了大致相似的电磁场空间分布,只是在黏土“模型地壳”(图 4(b))情形下的电磁信号相对稍弱一些.这主要是由于电磁信号在导电性相对较好的黏土“模型地壳”中的损耗较大的缘故所致.

### 3 讨论与结论

作者及合作者针对地震电磁信号的传播问题所开展的模拟实验研究表明,该模拟实验方法可以较合理地解释部分与地震相关的电磁学观测现象<sup>[17,18]</sup>. Tzanis和Vallianatos<sup>[22]</sup>认为该模拟实验研究考虑了电磁信号在地球-电离层波导中的传播问题,并通过包括采用导电材料表征海洋等地表电性不规则分布的影响在内的模拟实验模型展示了VLF(very-low-frequency)-ELF(extremely-low-frequency)信号的远距离传播的可行性;相应的研究结果增强了VLF-ELF观测资料的可信度.前述模拟实验方法也为地震电磁信号的选择性特征给出了一种合理的解释<sup>[12,22,23]</sup>.

本研究通过实施一些控制实验来检验以往研究结果的可靠性.结果表明边界条件和“源”的位置、强度等对检测到的电磁信号的分布特征影响甚微,但对信号的绝对大小有一定的影响.“源”的频率则直接影响到电磁信号的分布,低频时信号随距离的增大而衰减,高频时信号则呈现出环状的传播图像.该结果不仅与电磁信号在波导中传播的理论预测相吻合,而且也与作者及合作者以往针对希腊和台湾所开展的模拟实验研究结果一致.

对地形的控制实验表明地形条件直接影响着电磁信号的分布特征.这种电磁信号依赖于地表电阻率非均匀分布的现象在以往针对希腊和台湾所开展的模拟实验研究中也得到确认,而且被用于解释实际观测资料中的低频电磁信号的选择性特征<sup>[17,18,22,23]</sup>.

对“模型地壳”介质电性的控制实验表明不同介质电性条件下得到的电磁信号的分布图像大致相似,但由于实验用花岗岩和黏土存在不同的电性非均匀性,而且由于引入的“模型地形”所导致的地表电阻率非均匀性的影响,因此得到的电磁信号的分布图像较简单的环状分布(高频场合)更复杂;同时,由于黏土的电导率比花岗岩的高,对应的电磁信号的衰减大,因此,检测到的信号强度相对较弱.

模拟实验中背景电磁场的研究结果为今后相关的实验研究提供了两条改进方案:首先,在背景电磁场一定的前提下,可通过选用更高性能的仪器(例如,高功率信号发生器、高分辨率信号接收器)等对策来增强实验中检测到的信号的强度,从而提高实验的信噪比;其次,通过实施电磁屏蔽的方式来降低背景电磁场,结合选用高分辨率信号接收器等手段,可提高实验的检测精度.以上两点不仅能进一步提高模拟实验结果的可靠性,而且使今后的实验既能直接模拟VLF-ELF信号,也可直接模拟以往的实验所不能模拟的ULF(ultra-low-frequency)信号,这将克服以往只能通过对VLF信号的模拟实验结果的定性推理来解释ULF现象的不足<sup>[17,22]</sup>,从而为有大量报道的ULF频段的地震电磁观测资料的解释提供直接的实验依据.

本模拟实验方法是在同时考虑了波导模型和地理相似性原理的基础上提出来的.如同其他物理模拟实验一样,如何保证模型在几何及物理上的合理相似性是必须考虑的一个关键问题.由于在引入地理相似性原理的同时选择了同样的比例尺来构建模型,因此,本模拟实验在几何上严格满足相似性.模拟信号的频率则根据其与波长的关系选择同样的比例尺来保证频率也严格满足相似性.但本模拟实验

中电性参数的物理相似性只能近似得以满足, 因为我们对地下电性结构的认识非常有限, 而且本文给出的只是一个简化的近似模型, 实际的结构可能更复杂. 尽管有时简化模型更有利于把握研究对象的主要特征, 但如果条件允许的话, 今后也可选择有较详细地下电性结构研究资料的区域来开展更接近于实际的模拟实验研究.

需要指出的是, 即使模型能满足所有的合理相似性, 也依然难以弥补室内实验与野外实际的距离. 因此, 关于电磁信号传播的野外实际研究是非常有意义的. 遗憾的是, 由于这类野外实际研究耗资巨大, 且大多只能针对特定的频率来研究传播问题, 因此, 能否具体实施并覆盖较宽的频段还有待于进一步的研究.

本文针对地震电磁信号的传播问题开展了控制模拟实验研究, 但由于地震电磁信号的发生源问题仍是一个处于探索之中的难题, 再加上观测资料表明电磁信号与地震震级并不一定满足常理所预期的正相关关系, 因此, 现阶段的模拟实验研究难以合理地定量模拟实际地震的震源强度. 迄今为止的模拟实验研究重点关注的是信号的相对大小和空间分布特征. 不过, 随着对地震电磁信号发生机制的认识的不断加深, 通过简化模型来直接定量地模拟震源强度的模拟实验也将逐步成为可能.

致谢 本工作受国家自然科学基金项目(批准号: 40474024)国家重点基础研究发展规划项目(批准号: 2004CB418404)和教育部新世纪优秀人才支持计划项目(批准号: NCET-04-0010)联合资助.

### 参 考 文 献

- 钱家栋, 林云芳主编. 地震电磁观测技术. 北京: 地震出版社, 1995. 1~326
- 丁鉴海, 卢振业, 黄雪香编著. 地震地磁学. 北京: 地震出版社, 1994. 1~409
- Varotsos P, Alexopoulos K. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I. Tectonophysics, 1984, 110(1-2): 73~98[DOI]
- Fraser-Smith A C, Bernardi A, McGill P R, et al. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the Ms7.1 Loma Prieta earthquake. Geophys Res Lett, 1990, 17(9): 1465~1468
- Kopytenko Yu A, Matishvili T G, Voronov P M, et al. Detection of ultra-low-frequency emissions connected with the Spitak earthquake and its aftershock activity, based on geomagnetic pulsations data at Dusheti and Vardzia observatories. Phys Earth Planet Inter, 1993, 77(1~2), 85~95[DOI]
- Du A, Huang Q, Yang S. Epicenter location by abnormal ULF electromagnetic emissions. Geophys Res Lett, 2002, 29(10):1455, DOI: 10.1029/2001GL013616
- Hayakawa M, Molchanov O A. Seismo Electromagnetics, Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling. Tokyo: Terra Scientific Pub Comp, 2002. 1~477
- Nagao T, Enomoto Y, Fujinawa Y, et al. Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobe earthquake. J Geodyn, 2002, 33(4~5): 401~411[DOI]
- Uyeda S, Hayakawa M, Nagao T, et al. Electric and magnetic phenomena observed before the volcano-seismic activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan. Proc Nat Acad Sci USA, 2002, 99(11): 7352~7355[DOI]
- 郭自强, 罗祥麟, 钱书清, 等. 矿山爆炸中的电磁辐射. 地球物理学报, 1999, 42(6): 834~840
- 郝锦绮, 钱书清, 高金田, 等. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常. 地震学报, 2003, 25(1): 102~111
- Freund F. Charge generation and propagation in igneous rocks, J Geodyn, 2002, 33(4-5): 543~570[DOI]
- Huang Q. One possible generation mechanism of co-seismic electric signals. Proc Japan Acad, 2002, 78(B7): 173~178
- Dosso H W, Nienaber W, Chen J. Laboratory electromagnetic modeling of the subducting Juan de Fuca plate. Phys Earth Planet Inter, 1989, 53(3-4): 221~227[DOI]
- Geller R. Debate on VAN. Geophys Res Lett, 1996, 23(11): 1291~1452[DOI]
- Varotsos P, Sarlis N, Lazaridou M, et al. Transmission of stress induced electric signals. J Appl Phys, 1998, 83(1): 60~70[DOI]
- Huang Q, Ikeya M. Seismic electromagnetic signals (SEMS) explained by a simulation experiment using electromagnetic waves. Phys Earth Planet Inter, 1998, 109(3~4): 107~114[DOI]
- Huang Q, Ikeya M. Experimental study on the propagation of seismic electromagnetic signals (SEMS) using a mini-geographic model of the Taiwan strait. Episodes, 1999, 22(4): 289~294
- Ouchi T, Huang Q. Relationship between faults and generation of inland shallow earthquakes: Enlightenment of the M 7.2 southern Hyogo prefecture earthquake. Acta Seismol Sin, 1998, 11(4): 413~420
- Electromagnetic Research Group for the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake. Tectonoelectric signals related with the occurrence of the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake (M7.2) and preliminary results of electromagnetic observation around the focal area. J Phys Earth, 1997, 45(2): 91~104
- Matsumoto H, Ikeya M, Yamanaka C. Analysis of barber-pole color and speckle noises recorded 6 and a half hours before the Kobe earthquake. Jpn J Appl Phys, 1998, 37(11B): L1409~L1411[DOI]
- Tzani A, Vallianatos F. A critical review of electric earthquake precursors. Annali di Geofisica, 2001, 44(2): 429~460
- Orihara Y, Noda Y, Nagao T, et al. A possible case of SES selectivity at Kozu-shima Island, Japan. J Geodyn, 2002, 33(4~5): 425~432[DOI]

(2005-01-04 收稿, 2005-04-15 收修稿稿)