

# 汶川地震前后地球化学和地球物理异常

姓名：田 仁 飞

**摘要：**5.12 汶川地震造成了惨重的人员伤亡和巨大的财产损失，是地球深部地质作用过程在浅部（地表）响应的直接后果。本文总结了汶川地震后，在地表发现或观测到的地球化学特征、地球物理特征，以期了解这些特征的变化规律，为今后的中长期地震预报提供有参考价值的基础资料。

## 1.引言

2008年5月12日14时28分，在青藏高原东缘龙门山地区发生了汶川8级强烈地震，成为继2001年11月14日昆仑山口西8.1级地震之后在中国大陆发生的又一次强烈地震，造成了惨重的人员伤亡和巨大的财产损失。据中国地震局汶川地震科学考察队利用川西流动宽频带地震台阵记录到的近场地震波确定了2008年汶川8.0级地震震源深度： $18.66 \pm 0.49$  km。这是地球深部地质作用过程在浅部响应，导致大量的地表破裂、房屋倒塌、交通和通讯中断，从而造成了大量的人员伤亡和巨大的经济损失。

地震是地应力达到一定极限，从而地壳快速释放能量，在释放能量的过程中会造成振动。释放能量越大，振动越强烈，在地表的响应越明显。此次汶川地震发生后，大量的科研人通过实地考察、各地震台站的数据收集，以及模拟实验等研究了汶川地震的产生机制，为今后类似地震的中长期预报提供了大量可供借鉴资料。

## 2.汶川地震前后浅部地球化学特征

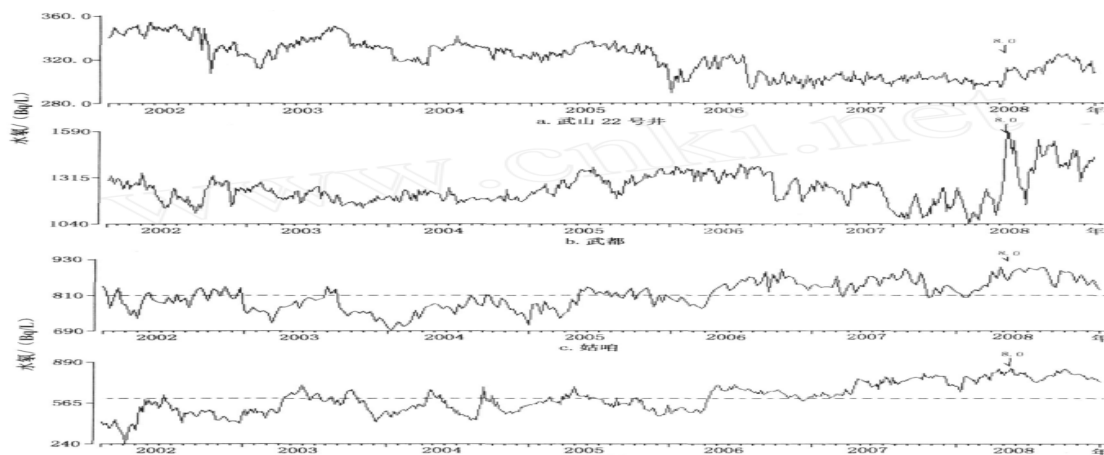
长期的观测结果表明，氡等流体地球化学组分存在显著的震前异常变化。虽然汶川大地震发生前，未见有报道汶川地区的氡等地球化学异常，但是，大地震发生后，很多科研工作者收集了四川、陕西、青海、宁夏、福建、江苏等地震台站测量氡气变化规律，可以较为明显的发现在地震发生时刻及前后具有较大的异常。

刘耀炜等（2009）通过观测汶川地震后氡气观测值的变化，初步分析了汶川地震氡观测值震后效应的特征：认为氡射气具有对地震波响应的特点，也提出了研究地球化学组分变化与含水层动力过程的关系等问题。谷懿等（2009）运用活动断裂（带）剖面上的土壤氡浓度测量，为地震后大成都地区活动断裂的相对活动性提供了科学评价依据。张世民等（2009）利用周至深井测量了氡气、地温、水位等变化，通过初步分析认为汶川地震前，该台氡气观测有一定的前兆显示。

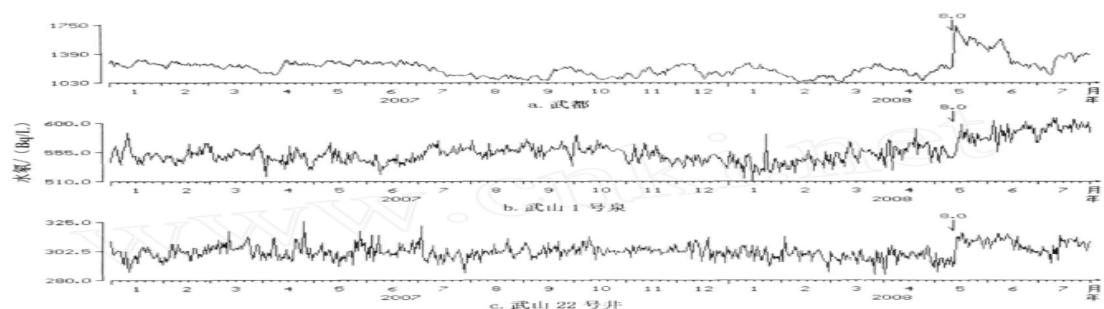
张昱等（2009）收集了甘肃地区、四川和青海部分地区的水氡资料，同样认为在汶川地震前有部分水氡测点的资料存在明显的震前异常，而且变化时间早，持续时间长，同步性很好。

从现有这些资料来看，无论是从水氡变化规律无论是从时间（年变化、月变化，日变化），还是从地理位置（相对震中的距离），都有一定的异常显示。

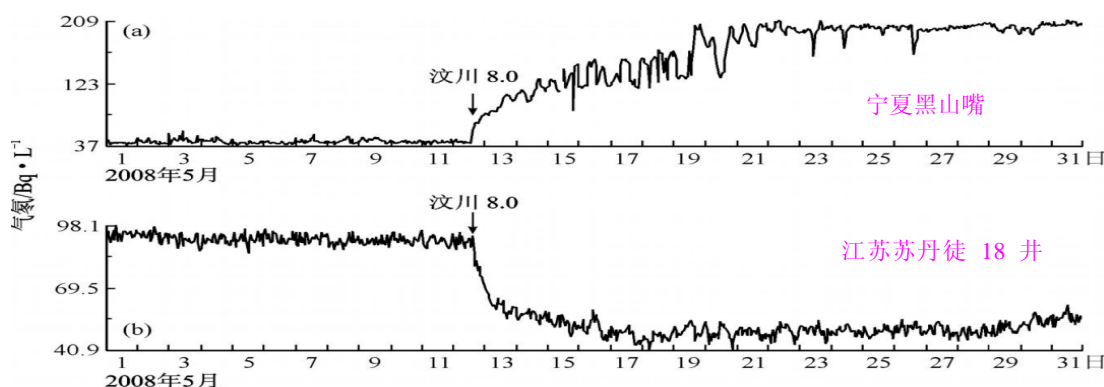
### (1) 氡值的随时间变化规律



(a) 年变化



(b) 月变化



(c) 日变化

图 1 汶川地震前后水氡变化曲线

从图 1 中可以看出，地震前后，氡值的变化比较明显的，具有一定的大震前的指示性，特别是在 (c) 图日变化的氡值变化曲线上，发震时刻，曲线发生了突跳，认为可以利用其做临震预报是可行的。

## (2)震后，断裂带上氡值的变化规律

地震后，谷懿等人在汶川地震震区测量了几条比较典型的断裂带上测量了氡值的变化规律，结果表一。

表一 断裂剖面测量数据处理结果

断裂名称	平均值	背景值 $R_n B$	异常阈值 $R_n F$	最大值 $R_n E_{max}$	异常阈值比背景值 $R_n F / R_n B$	最大值比背景值 $R_n E_{max} / R_n B$
北川断裂虹口剖面	205.9	188.7	416.1	687.0	2.20	3.64
彭灌断裂小渔洞剖面	133.0	133.0	198.8	226.7	1.50	1.71
彭灌断裂中坝剖面	165.8	165.8	259.8	248.0	1.57	1.50
彭灌断裂白鹿剖面	99.5	99.5	169.8	191.0	1.71	1.92
新津-蒲江断裂剖面	59.0	52.6	118.5	194.1	2.25	3.69

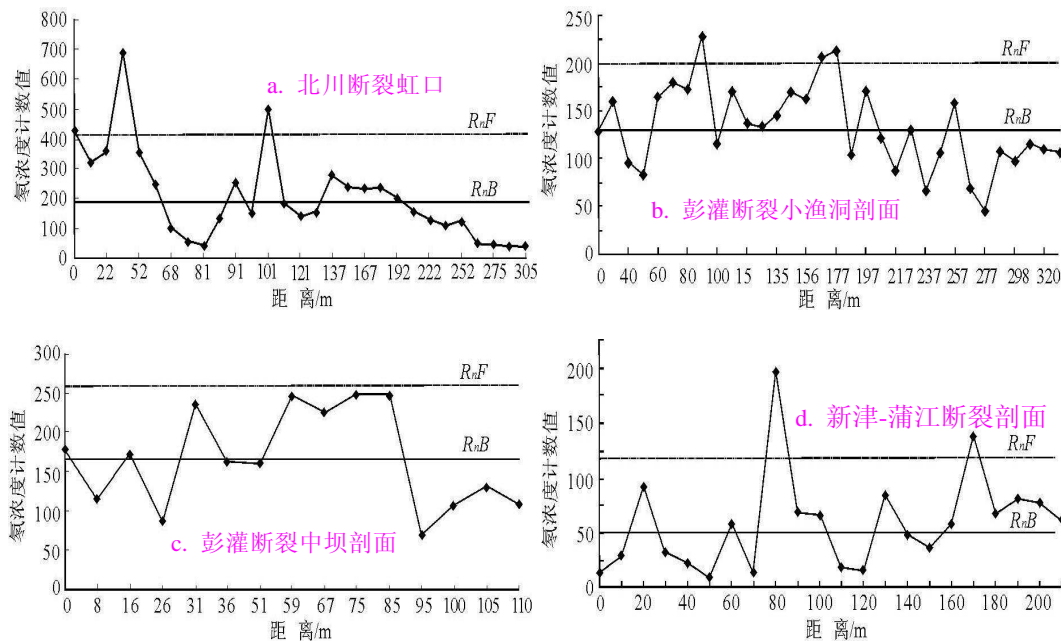


图 2 各典型断裂面上氡变化曲线

从表 1 可以看出，在所测量的 5 个有效断裂剖面中，北川断裂剖面测量土壤氡浓度的背景值最大，远高于该地区非断裂带氡浓度计数值（30~50）；彭灌断裂带上测量剖面背景值其次，也高于该地区非断裂带氡浓度背景值；新津—蒲

江断裂测量结果最低，与该地区非断裂带氦浓度背景值一致。说明大成都地区断裂受汶川地震的影响较大，且距地震震中越近，断裂活动区域受构造运动影响越大，地质活动越剧烈，其剖面土壤氦浓度测量背景值越大。

综合图 2 的测量结果，认为震后大成都地区断裂活动相对比较稳定，大成都地区断裂带的活动性处于中等或偏弱的水平，无活动性极强的断裂。

### 3.汶川地震前后浅部地球物理特征

到目前为止，通过观测地球物理异常特征，对地震进行中长期预报、短震、临震预报研究工作，虽然没有取得突破性成果，但是，地球物理异常特征也被大家公认为能够为地震预报和监测提供有利的科学依据。目前，世界各国都有地震监测台站，其中，观测的主要的参数就有地球物理异常特征（包括重、磁、电、震），这些物理特征都是地球深部地质作用过程在浅部的直接响应结果。

本文简要总结了汶川地震前后，部分台站观测到的重力异常、磁异常、电阻率异常和地震波变化异常等特征。

#### (1)汶川地震前后，重力异常变化规律

王谦身等(2008)根据重力资料给了四川西部成都盆地、龙门山、松潘等地地壳厚度，并根据重力均衡理论分析了重力均衡与汶川地震的相关性。张季生等(2009)分析了龙门山及邻区重力异常与汶川地震的关系。申重阳等(2009)利用流动重力观测数据，分析了汶川地震震区区域重力场动态变化特征和孕震机理。韦进等(2009)收集了汶川地震震前成都台的重力资料，分析了重力的高频扰动。谢汝一等(2009)分析了汶川地震前后冀鲁豫地区重力场变化规律的。

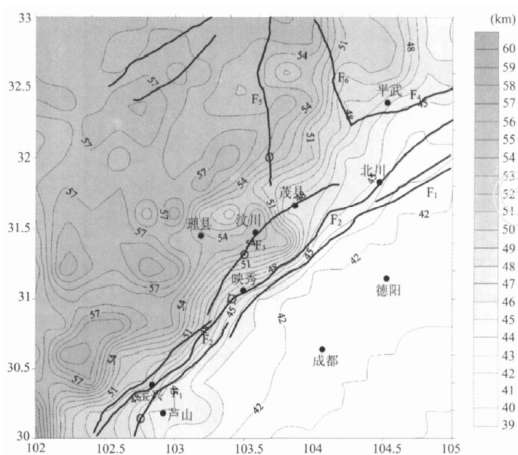


图 3 理论均衡地壳厚度 D 的分布<sup>5</sup>

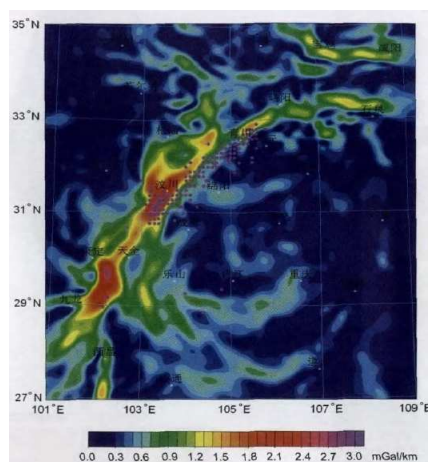


图 4 龙门山及邻区局部重力异常水平梯度图<sup>6</sup>

由图 3 可见, 在四川盆地地区,  $D$  值为  $40\sim 42\text{km}$  左右;到绵竹以西的龙门山、九顶山地区  $D$  值急剧增大到  $50$  多  $\text{km}$ , 并一直延续到西部马尔康一带,而在邛崃山地及西南部山地的  $31.2^\circ \text{N}, 102.9^\circ \text{E}$  和  $30.6^\circ \text{N}, 102.2^\circ \text{E}$  两地,甚至达到近  $60\text{km}$  之多。由  $D$  值等值线的分布特征可见,在四川盆地西缘龙门山系一带,呈现近北东向的高梯度带( $3.5\sim 4 \text{ km}/10'$ ), 在汶川地区最高达  $7\sim 8 \text{ km}/10'$ , 并与龙门山断裂带系走向基本一致。

重力异常水平梯度是反映重力场沿水平方向变化大小的物理量。从龙门山地区局部重力异常水平梯度图(图 4)可看出, 龙门山重力梯度带主体走向为北东  $35^\circ$ , 在天全南分为两个分支。不同地段的重力变化大小不同, 在都江堰附近, 重力梯度带宽度最大为  $80\text{km}$ (以大于  $1.0\text{mGal}/\text{km}$  来计算), 重力水平梯度变化最大, 达到  $2.4\text{mGal}/\text{km}$ 。而在邛崃康定之间和平武以南,重力梯度带宽度只有  $30\sim 40\text{km}$  左右, 重力水平梯度变化最大只有  $1.0\sim 1.2\text{mGal}/\text{km}$ 。龙门山重力梯度带平面特征较为复杂, 说明龙门山构造带的深部结构比较复杂, 在主干断裂附近存在一些局部断裂。

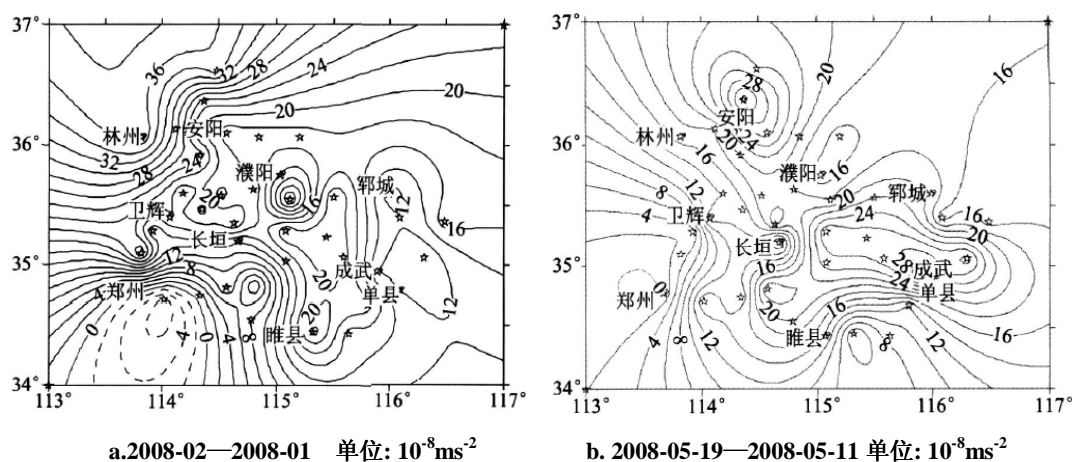


图 5 冀鲁豫测网重力变化等值线图

对比图 5, 地震前 (a) 和地震后 (b) 可知: 汶川地震前几个月,重力场呈现出有序的变化:与相邻期相比,最大的下降量达  $43\times 10^{-8}\text{ms}^{-2}$ ;与起始期相比,最大的下降量达  $109\times 10^{-8}\text{ms}^{-2}$ 。震后重力场为普遍性的恢复性上升变化。

### (2)汶川地震前后, 磁异常变化规律

通过前人的研究, 认为磁异常与地震具有一定的相关性。这里的磁异常通常指两个方面, 一是地磁异常, 二是电离层的扰动形成的磁异常。张季生等(2009)分析了龙门山及邻区地磁异常与汶川地震的关系。张建国等(2009)利用我国地磁

观测台网每天的子夜均值资料,运用高性能计算技术,建立了中国大陆地磁场动态演化模型。利用该模型,研究了2008年5月12日汶川810级地震前后中国大陆地磁异常场动态演化。张学民等(2009)研究分析了在汶川地震前出现的地面电磁与电离层中观测到的中、短临电磁异常特征。丁跃军等(2009)分析了四川金河台、剑阁台和河南郑州二砂台的电磁波曲线变化特征,认为与电磁波的变化与汶川地震有关。

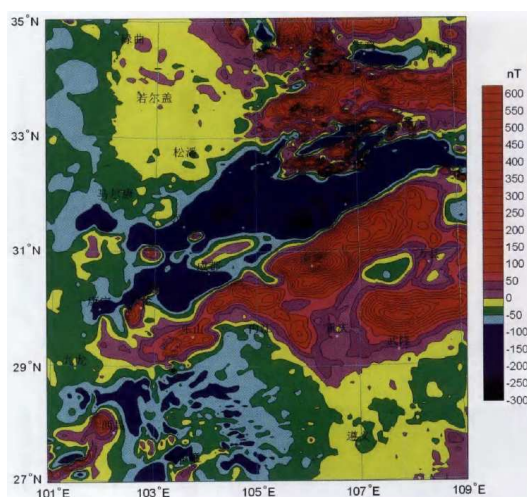


图6 龙门山及邻区局航空磁异常<sup>6</sup>

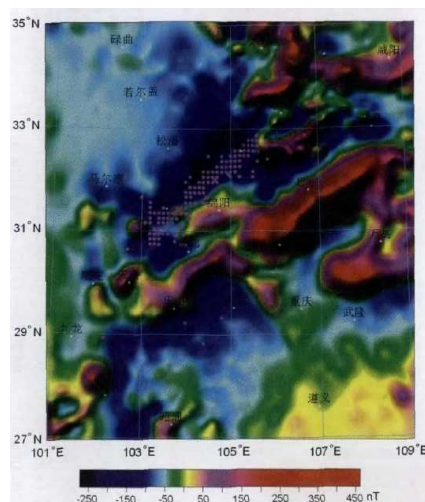
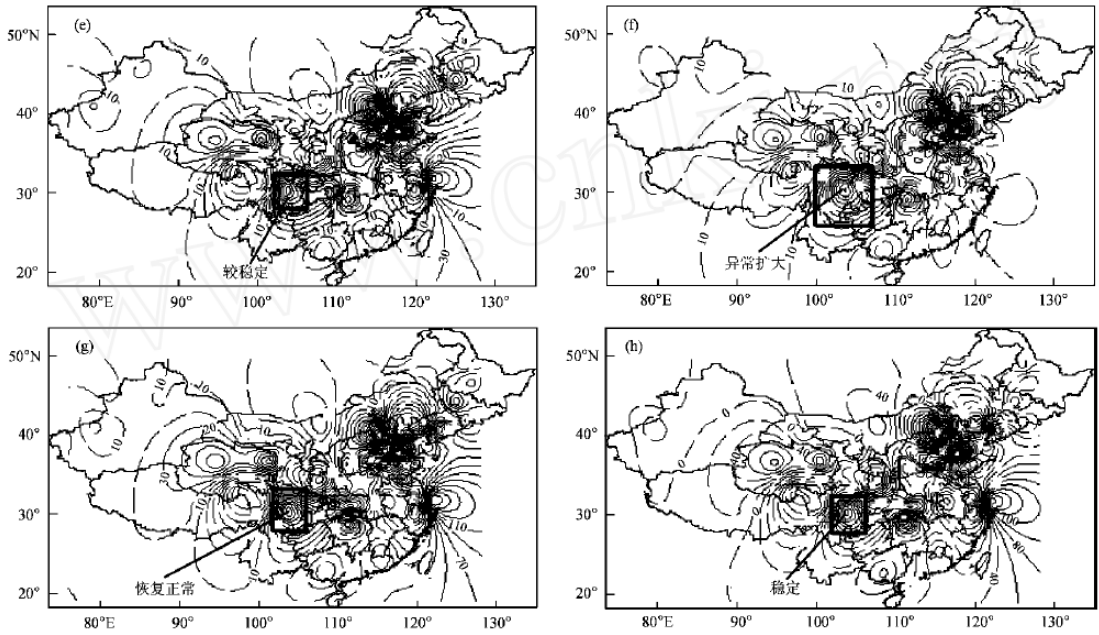


图7 龙门山及邻区局磁力化极异常图<sup>6</sup>

以龙门山构造带为界,西部为弱负异常区,异常强度为 $-25 \sim -75$  nT,异常弱且平稳(见图6)。在龙门山构造带青川—汶川—都江堰为负异常区,走向为北东向,长约200 km,异常最小值为 $-280$  nT左右。在都江堰附近出现局部正异常与彭灌变质杂岩体中基性岩脉有关。都江堰以南—成都—邛崃为负异常区,该异常强度最小值为 $-200$  nT左右。天全附近的局部正异常与宝兴—雅斯德杂岩体中的变质中基性岩体有关。龙门山构造带以东,万源—南充—乐山武隆磁场区以高值正异常为主,异常强度达550 nT,呈带状或块状分布,其展布方向主要为北东向。在其东北部出现走向为北东向的负异常,其最小值为 $-280$  nT,推测为该高值正异常的伴生异常。从卫星磁异常图可看出,该异常为全国最强的卫星磁异常。由龙门山及邻区航空磁力化极异常图(图3)可以看出,地震主要发生在青川—汶川—都江堰一带的负异常区。在都江堰以南—成都—邛崃一带的负异常区,没有地震发生。



(e) 5月6日; (f) 5月10日(g) 5月12日; (h) 5月20日

图8 汶川地震前、后中国大陆地磁异常场等值线变化图

从图1可以看出: 汶川地震前的5月6日, 汶川地区地磁场正异常区范围很小、较稳定, 5月10日, 正异常区范围再次扩大, 5月12日异常区恢复正常, 汶川地震发生。震后一个月时间, 汶川地区正异常区较小且稳定。这恰好遵循了“平静→异常→短时平静→发震→平静”的地震孕育、发展和发生的规律。

除了地磁异常外, 电磁异常在汶川地震前后也有一定的变化规律。

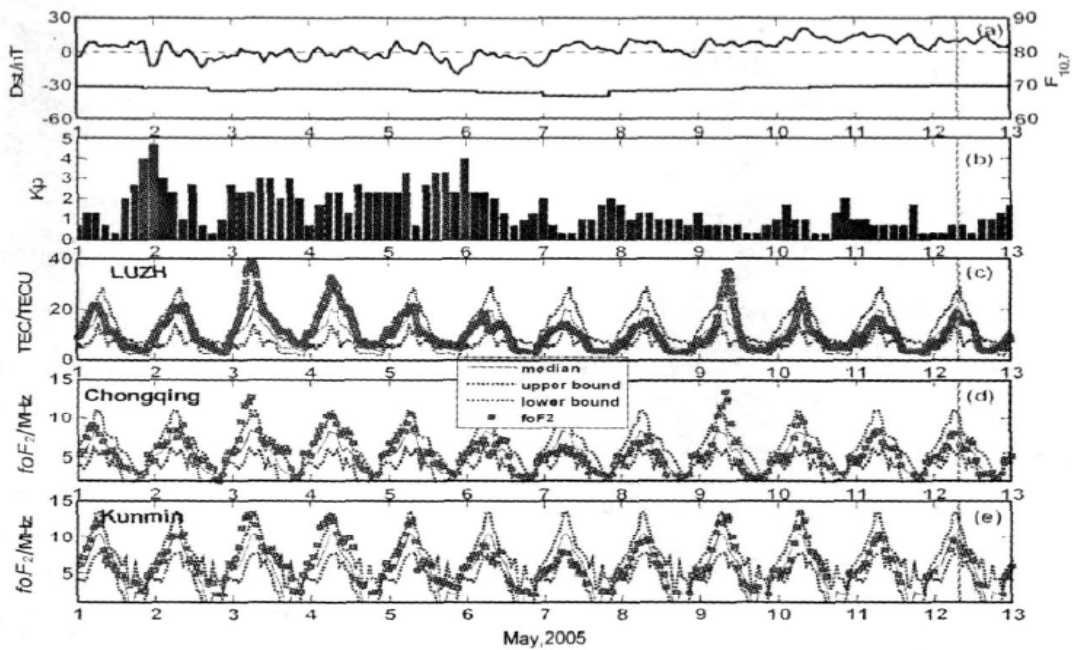


图8 利用GPS和电离层测高仪得到的TEC和foF2曲线

利用全球定位系统 GPS 的双频发射可以确定两个频率的 GPS 信号在电离层介质中传播的总时延量之差,在一级近似条件下,由这一时延差可以反演得到整个射线路径上电离层的总电子含量(TEC)汶川地震前收集到了泸州(LUZH) GPS 测点反演得到的 TEC 观测资料(图 8 中后三张图中小方框散点为观测值,虚线为上下四分位线,中间细实线为中位线),可以看到该测点 TEC 总体在 1~5 日日变幅度比较大,而 6、7 日日变幅相对减弱了 40%左右,10~12 日变化幅度与 1~6 日相当。同时在这段时间内有两个明显的日变幅增大的现象分别出现在 3 日和 9 日,增加幅度接近 100%。与 Kp 指数等进行对比,3、4 日的 TEC 增加可能与一系列电离层亚暴有关,而 9 日的快速增加可能与汶川地震孕育过程对电离层产生的扰动有关。电离层垂向探测仪垂直向上发射频率随时间变化的无线电脉冲,然后在同一地点接收这些脉冲在电离层的反射信号,测量出电波传播往返的传递时延,从而获得反射高度与频率的关系曲线,得到频高图或垂测电离图。根据国际的统一规定,垂直探测站从频高图度量出 E、F1、F2 和 Es 层的临界频率和最小虚高等参数,通过适当的换算可从频高图得出电子密度随高度的分布。在此收集了重庆和昆明台测高仪的 f<sub>o</sub>F<sub>2</sub> 资料,与泸州 TEC 绘制在同一张图中(如图 8 所示),结果显示这两个台的 F2 层临界频率的变化特征基本与泸州 TEC 一致,显示了 3 日和 9 日的快速增加,6~7 日幅度减弱的现象,在空间电磁状态稳的情况下(Dst ≥ -10; Kp < 3 说明电磁环境平静),6 日以后异常现象应该与汶川地震有关。

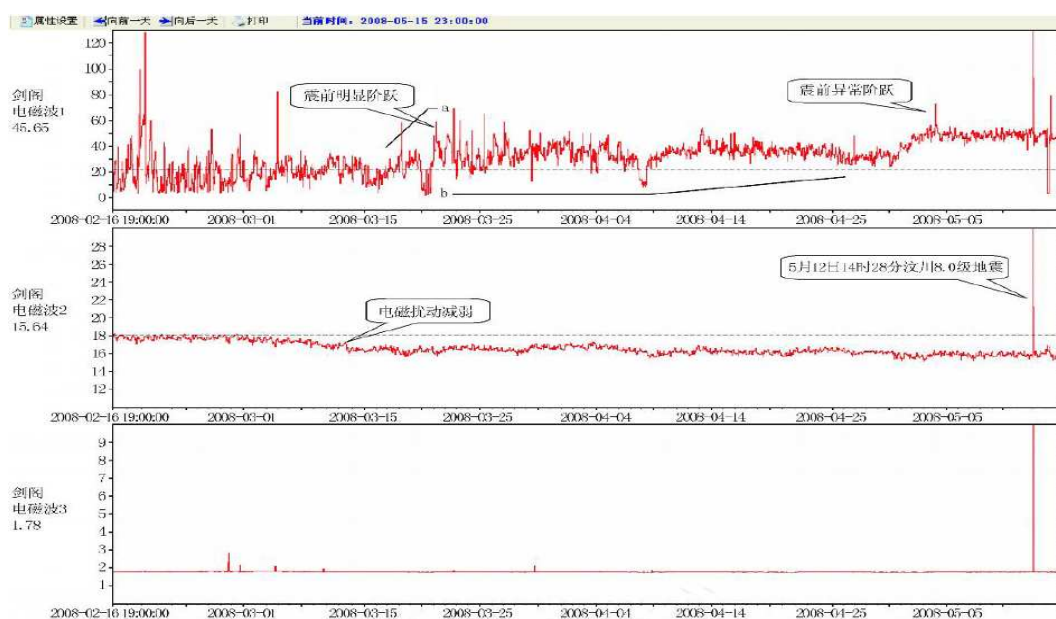


图 9 四川剑阁台电磁分钟时序图(距主震区 100 km)

图9的1通道反映岩石挤压脉冲,图中a线段表示挤压持续存在,时间长且量值很大。出现了3个台阶,第一个台阶15 mV,第二个台阶35 mV,第三个台阶在2008年5月3日达到了50 mV(约2.5nT)。2通道反映岩石破碎脉冲,b线段表示2008年3月中旬振幅相对减小且一直存在。3通道为辅助观察通道,从曲线可以看出,外界干扰很小。

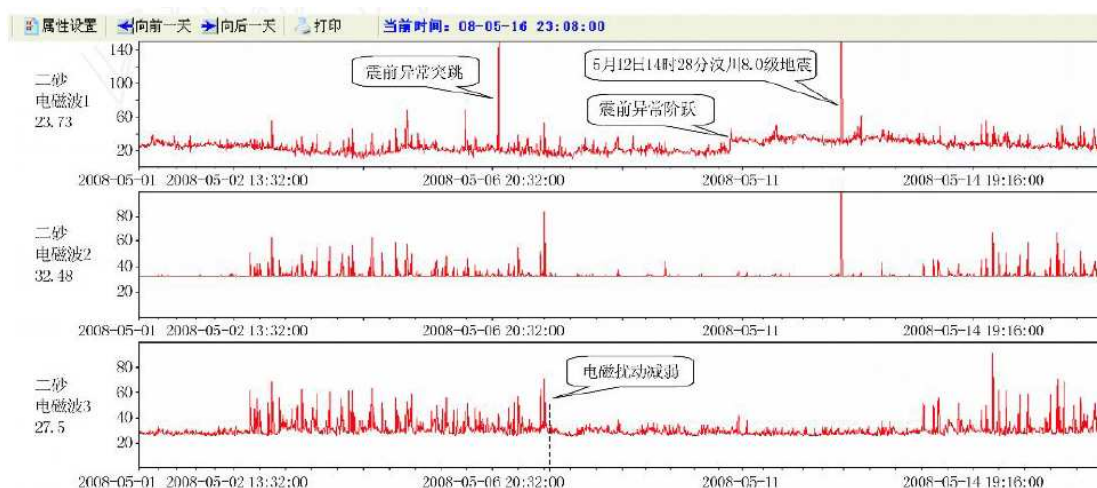


图10 郑州二砂台2008年5月6日—5月16日电磁波时序图(距主震区1000km)

图10的通道反映岩石挤压脉冲,2008年5月6日左右产生电磁异常突跳;2008年5月10号左右又出现异常阶跃。先后共出现两个台阶,第一个台阶大于140 mV,第二个台阶达到40 mV(约2 nT)。2通道反映岩石破碎脉冲,从波形信息来看,岩石破碎期从2008年5月2日开始到2008年5月7日止,之后达到了相对平衡,出现了异常平静。3通道为辅助观察通道,从曲线可以看出,5月12日前后基本无变化。

### (3)汶川地震前后,电阻率变化规律

通过前人大量研究认为:大地震引起的地电阻率异常的原因,可表现为两种形式,一种主要由震源区作用引起的近震中台站异常变化,另一种则为大范围区域应力场与震源区共同作用引起的较远区域的台站异常变化,并且随着离震源区的距离增加而影响减小。关华平等(2008)和张学民等(2009)利用四川及邻近地区的地电阻率观测,分析了汶川8.0级地震前后的地电阻率异常现象。认为地电阻率异常的方向性及台站空间分布特征反映了异常信息与构造走向及地震孕育机制之间的密切关系。

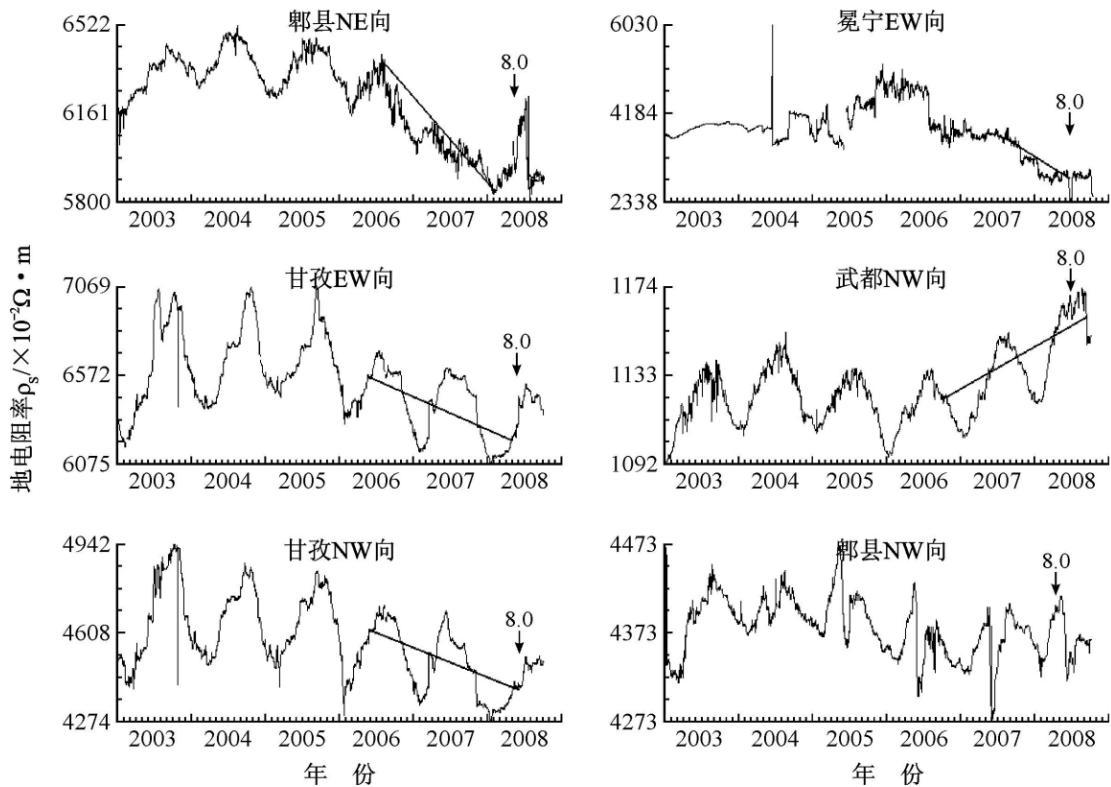


图 11 地电阻率中长期趋势异常变化曲线

从图 11 中可以明显看到，郫县观测台两个测向都存在规则的年变化，NE 向变化相对更为稳定，而 NW 向电阻率在雨季经常出现快速上升和突降的变化。2000—2008 年 NE 向电阻率可以分为三个变化阶段，2000—2003 年初电阻率年变幅度相当，平均形态没有明显的上升或下降。2003 年台站改造使用数字化观测仪器，两个测向都有一个明显的抬升，电阻率整体增加，但一直到 2005 年底，年变形态没有大的改变。最后一个阶段，从 2006 年开始，在年变高值没有恢复的情况下加速下降，2007 年年变消失，2008 年初达到最小值，然后开始转折回升，2008 年 5 月 12 日汶川地震发生在曲线的恢复过程中。整个异常在 NE 向非常明显，2006 年以来的下降幅度达到 7.2%，NW 向没有类似的现象出现。位于鲜水河断裂带附近的四川西部的甘孜观测台(震中距 330 km)也观测到趋势下降异常，异常同样起始于 2006 年，持续了 2 年多的时间，EW 向下降幅度为 4.5%，SN 向下降幅度为 3.3%，但该台年变规律没有被打破，是叠加在年变上的趋势下降。距震中 310km 的四川冕宁观测台 EW 向测项，自 2007 年 5 月初开始下降，至震前下降幅度达 22%，但该台背景变化不是很稳定，阶变时有发生，所以如此大幅度的下降异常可能并不完全与汶川地震有关。位于甘

肃的武都观测台，距汶川震中 290 km，NW 向测项从 2006 年 8 月开始至地震前出现趋势上升，上升幅度为 2.5 %。

#### (4)汶川地震前后，地震波变化规律

地震发生时，其能力将以地震波的形式传播出去，从而造成地下、地表破坏。作为地震监测的主要手段之一的地震波，往往不是直接监测常规的 P 波，S 波，面波等地震波，而是测量地脉动、振动加速度等等。杨立明（2009）选取武都、文县、迭部等地震台汶川地震前后的连续的地脉动波形记录，进行分析，认为地脉动波形记录的频谱与汶川地震及其余震有一定的相关性。于海英等（2009）收集了汶川地震发震时刻全国各地部分台站的加速度值，对其进行研究，分析汶川大地震强震动特性。

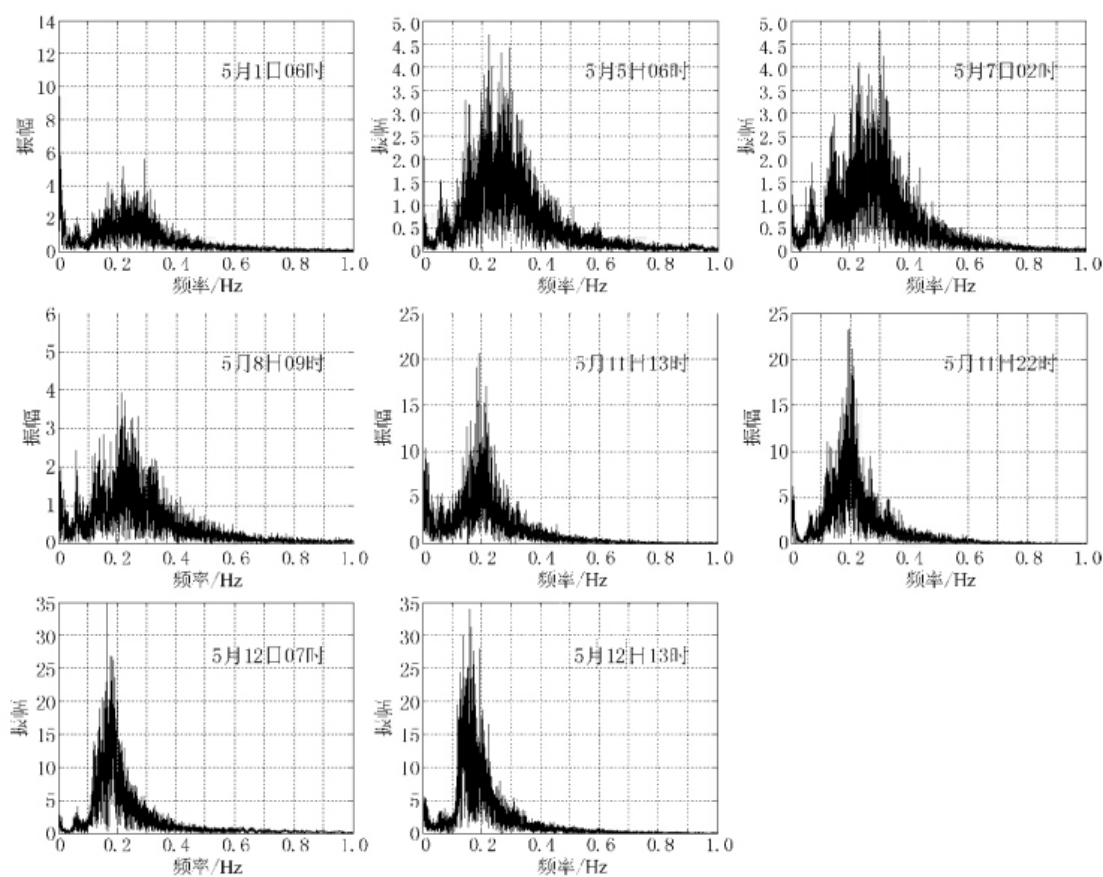


图 12 汶川地震前武都地震台整点观测序列傅里叶谱

由图 12 可以看出，5 月 1 日 00 时至 5 月 8 日 09 时，傅氏谱的振幅值在 4 左右波动，5 月 11 日 13 时以后幅度值则随时间单调增大。实际上，开始增大的时间大致在 5 月 10 日 19 时左右。同时，可以看出，随着汶川地震时间逼近，谱振幅峰值存在向 0.15 Hz 频段附近偏移的特征。求取图 1 所示每一时

段 0.1~0.3Hz 频段内幅度值包络线的极大值，作为该时段的频率幅度值，得到频率幅度值变化的时间过程如图 13 所示。

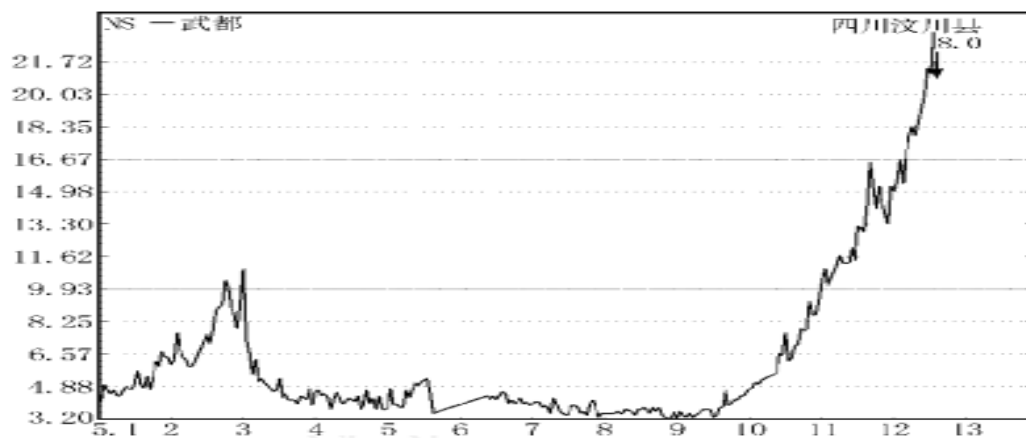


图 13 汶川地震前武都地震台整点观测序列傅里叶谱 0.1~0.3 Hz 频段振幅变化时间进程

由图 13 可以看出，在汶川地震发生时刻，振幅频谱包络达到了极大值。

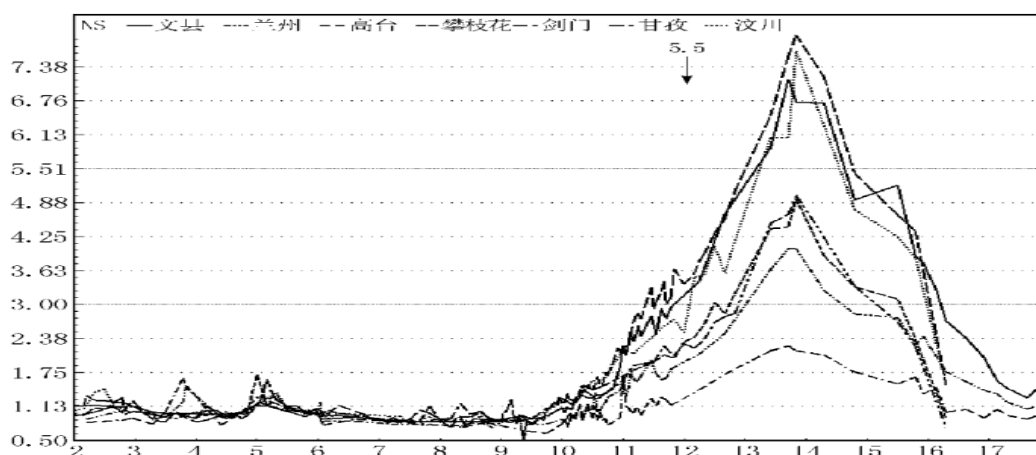


图 14 9月12日武都5.5级地震前四川台网、甘肃台网部分台站0.1~0.3Hz频段振幅归一化计算结果

由图 14 可见，归一化计算结果较为清晰的表明了该次地震前甘肃台网、四川台网的变化过程，表现出距离震中近的台站出现的时间早，幅度大，距离震中远的台站出现的晚，幅度小，具有一定的方向性等特征。

地面运动加速度大小和强震动持续时间长短直接决定了地震的破坏力，汶川地震获得的大量强震动数据可以用来更好地确定宏观震中，为震害评估和救灾提供依据。



图 15 汶川 8.0 级地震峰值加速度分布

图 15 是汶川地震加速度分布图，(a)、(b)、(c)分别为东西、南北、竖向分量峰值加速度分图，它们能够较好地描绘震害的分布情况。较大的加速度峰值沿发震断层分布，集中在靠近断层的狭长区相同断层距的上盘峰值加速度值明显高于下盘值，且衰减缓慢；发震断层破裂前方的地震动加速度峰值大，上下盘效应和方向性效应较明显。

#### 4. 结语

地球深部地质作用过程在浅部的响应形式是多种多样的，除了以上讨论的地球化学异常和地球物理异常外，还有地表破裂，滑坡、泥石流等地质现象。这里讨论的只是冰山一角。本文以汶川地震为实例，几乎概括了国内学者对汶川地震前后地球化学和地球物理异常研究的最新成果，是具有较好参考价值的基础资料。

## 参考文献

- 1.刘耀炜,任宏微.汶川 8.0 级地震氦观测值震后效应特征初步分析[J].地震, 2009,29(1): 121-131
- 2.谷懿,葛良全,王广西等.汶川地震震后大成都地区断裂带活动性氦气测量分析评价[J].工程地质学报,2009,17(3):296-300
- 3.张世民,方炜,舒优良等.汶川地震前周至深井观测数据的异常特征[J].防灾科技学院学报,2009,11(1): 20-27
- 4.张昱,刘小凤,常千军.汶川地震的异常及其震后效应特征分析[J].高原地震, 2009,21(3):22-27
- 5.王谦身,滕吉文,张永谦.龙门山断裂系及邻区地壳重力均衡效应与汶川地震[J].地球物理学进展, 2008,23(6):1664-1670
- 6.张季生,高锐,曾令森等.龙门山及邻区重、磁异常特征及与地震关系的研究[J].地球物理学报, 2009, 52(2): 572~577
- 7.韦进,郝洪涛,康开轩等.汶川地震前成都台重力的高频扰动[J].大地测量与地球动力学,2009,29(增刊):15-24
- 8.申重阳,李辉,孙少安等.重力场动态变化与汶川 Ms8.0 地震孕育过程[J].地球物理学报, 2009, 52(10): 2547~2555
- 9.谢汝一,李清林,秦建增等.汶川 8.0 级地震前后冀鲁豫地区重力场变化研究[J].大地测量与地球动力学,2009,29(1):27-30
- 10.张建国,刘晓灿,唐庭梅等.汶川地震前后中国大陆地磁场动态演化特征初步研究[J].地震研究,2009,32(3):231-235
- 11.张学民,丁鉴海,申旭辉等.汶川 8 级地震前电磁扰动与电磁立体监测体系[J].电波科学学报,2009,24(1):1-8
- 12.丁跃军.汶川地震与电磁扰动现象[J].国际地震动态, 2009, 367(7):8-18
- 13.关华平,张学民,李美.汶川地震前的地电阻率异常分析[J].国际地震动态,2008,30(11):144
- 14.张学民,李美,关华平.汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析[J].地震,2009,29(1):108-115
- 15.杨立明.汶川地震临震地脉动记录特殊频率波动现象及其重现性初步研究[J].国际地震动态,2009,361(1):14-19
- 16.于海英,王栋,杨永强.汶川 8.0 级地震强震动加速度记录的初步分析[J].地震工程与工程振动,2009,29(1):1-13