

美国的震磁观测与研究^{*}

袁浩浩, 顾左文, 陈 斌, 王 粲, 狄传芝, 高金田

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 美国地质调查局(USGS)与各有关大学,在美国西部、特别在圣安德列斯断层及其临近地区布设了包括地磁在内的地球物理观测网,用以监测该地区的地震活动。地磁观测资料的分析结果显示:5.2~7.3级地震,在离震中3~50 km的观测点与台站上,得到地磁总强度的变化异常幅度为0.3~6 nT。震磁研究结果表明:某些地震存在震磁前兆信息,因此震磁效应的观测研究是探索地震预测的一种手段。深入分析了2004年9月28日帕克菲尔德6.0级地震前后7个台站的地磁数据,结果表明:该地震的同震震磁效应为-0.4~0.3 nT,这是由压磁机制引起的;而该地震较长时间的震磁异常为-5.0~1.0 nT,该异常与局部地质构造及其活动、应力变化状况、地下介质的电磁性质等因素有关。

关键词: 地磁观测;震磁效应;地震预测研究实验场;火山磁效应;圣安德列斯断层

中图分类号: P318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2014)01-0163-07

0 引言

美国西部,尤其是圣安德列斯断层系所展布的地带,是美国地震活动最强烈的地区(Kanamori, 1983),其震害也最严重,因此也是美国地震预测探索研究的实验场。圣安德列斯断层是一条活动断层,该断层及其临近地区经常发生地震、蠕变等构造活动,1906年旧金山8.0级大地震就发生在这条断层附近。为监测该断层及其临近地区的构造活动与探索研究地震预测(Press *et al.*, 1965; Allen, 1982),自1960年起,美国地质调查局(USGS)与各有关大学的研究单位,在圣安德列斯断层及其临近地区布设了一系列地球物理观测,其中包括地震、地倾斜、蠕变、大地测量、地磁、地电、重力、地下水位与水氡等,形成了一个比较完整的观测系统。

本文概述了圣安德列斯断层的震磁观测与研究,2004年帕克菲尔德6.0级地震的震磁信息以及火山磁效应,讨论了相关的问题,并展望了今后的震磁研究前景。

1 圣安德列斯断层的震磁观测与研究

1.1 地磁观测网

从1973年开始,USGS在包括圣安德烈斯活动断层在内的美国西部布设了由28个永久台、61个临时台与131个测点组成的地磁观测网,以测定和监视与地下应力变化有关的构造磁效应与震磁效应(Mueller *et al.*, 1981)。

地磁永久台的间距为7~40 km,使用自动记录的磁力仪(灵敏度为0.25 nT,精度为0.5 nT),每10 min取样一次(1980年以前为每1 min取样一次)。各台站同步观测地磁总强度。地磁观测数据用遥测技术自动传输到门洛帕克的USGS,用于计算相邻两台的差值、日均差值及其标准偏差。对于相距小于20 km的两台的差值,静日的标准偏差为0.75 nT,扰日的标准偏差不大于1.5 nT。

地磁临时台的间距为5~15 km,每年观测1~2次。其观测方法为:每次观测时,每5个台站为一组,5套自动记录的磁力仪(灵敏度为0.25 nT,精度为0.5 nT)分别安装于每组中的5个台,在5

^{*} 收稿日期:2013-08-26.

基金项目: 国家国际科技合作项目《远东地区地磁场重力场及深部构造观测与模型研究》(2011DFB20210)与公益性行业科研专项项目《中国地震科学台阵探测——南北地震带南段》(201008001)联合资助。

~10 天内每 10 min 同步取样一次地磁场总强度。一组台站观测结束后,将其中 4 套磁力仪移至下一组台站观测,而另外一个台站(同时属于此两组)则继续观测,因而此台在这两组台站观测时段中均有地磁记录,可以起到衔接这两组台站观测的作用。进行常规的数据处理,求出相邻两台的平均差值与标准差值,发现 5~10 天相邻两台地磁记录同步差值的标准偏差约为 1.0 nT。

地磁测点的间距为 10~20 km,每年测量 1~2 次,使用一对 G-816 磁力仪(灵敏度为 1.0 nT,精度为 1.0 nT),在相邻两个测点上用人工读数方法于 10 min 之内同步取样 75 个地磁场总强度的数据。然后,计算每对相邻测点 10 min 观测值的平均差值及其标准偏差,标准偏差通常为 0.75 nT,个别测点的标准偏差可达 1.5 nT。

由于 USGS 的工作重点放在帕克菲尔德地震预测试验场的监测工作之上以及经费等原因,上述地磁测网亦作了调整。作为连续观测的地磁台站由 28 个调整为 12 个,停止了地磁临时台的观测与地磁测点的测量工作(Mueller, Johnston, 1998)。

1.2 震磁效应的观测与研究

自 1973 年以来,圣安德烈斯断层附近的地磁观测网,已经获得了一些较为可靠的震磁效应结果。在 1974 年 6 月欧文斯 3.8~4.3 级地震前后,在离震中约为 5 km 的测点上,观测到幅度约为 2 nT 的地磁异常变化(Johnston *et al.*, 1976)。

1974 年 11 月霍利斯特 5.2 级地震,在离震中约 15 km 的 SJN 台上,于震前 1 个多月记录到幅度约为 1.8 nT 的地磁异常变化(Smith, Johnston, 1976)。应用多道预测滤波方法,分析了地磁数据,降低了地磁噪声水平,结果显示,该地震前有 2 个台站(SNJ 与 ANZ)存在地磁异常变化(Davis *et al.*, 1980)。研究表明,该震磁异常可归因于地壳内应力变化引起的压磁效应(Johnston, 1978)。

为了研究 1979 年 8 月 6 日凯奥蒂湖 5.9 级地震的构造磁效应,Davis 和 Johnston (1983)应用多道预测滤波方法,分析了 1974~1980 年的地磁观测资料,结果表明,1978~1979 年地磁场总强度变化较大,其中在该震中南边约 30 km 的 AN 台与 50 km 的 HA 台观测到幅度约为 3 nT 的异常变

化,然而,离该震中仅几公里的 CO 台却无明显的地磁异常变化。

1986 年 7 月 8 日北棕榈泉 5.9 级地震期间,记录到同震震磁效应(Johnston, Mueller, 1987),在距该地震震中分别为 3 km 的 OC 台与 9 km 的 LS 台,其局部磁场分别降低了 1.3 nT 与 0.3 nT。

1992 年 6 月 28 日发生了兰德斯 M_L 7.5 地震。该地震前后的地磁观测资料显示,在震中距分别为 17.1 km 与 24.2 km 的两个台站,其局部磁场分别下降 1.2 nT 与 0.7 nT。这个结果与该地震的简化震磁模式相一致(Johnston *et al.*, 1994)。

2 2004 年帕克菲尔德 6.0 级地震的震磁信息

2.1 帕克菲尔德地震预测研究试验场

帕克菲尔德位于旧金山与洛杉矶的中部,是圣安德列斯断层系的地震与构造活动区之一。1857~1966 年,在帕克菲尔德地区发生了 6 次 6 级以上的地震。美国地震学家在深入研究之后认为,该地区在 1993 年之前将发生一个 6 级地震,其概率高达 95%。为预测这个 6 级地震,1985 年 USGS 在帕克菲尔德建立了地震预测试验场。在靠近所预测的帕克菲尔德 6 级地震未来震中的地方(约 60 km × 60 km),布设了由 80 多套各种类型的地震仪、10 个蠕动台、14 个应变台、4 个倾斜台、7 个地磁台、17 个地下水井、18 条边的激光测距网、80 条边的大地测距网、35 条边三角测距网的大地测量等前兆仪器,进行了长期、连续、精确的观测与测量。

在帕克菲尔德地震预测试验场,USGS 有 7 个地磁台,应用自动记录的磁力仪(灵敏度为 0.25 nT,精度为 0.5 nT),每 10 min 取样一次,各台站同步观测地磁总强度。磁力仪的探头放置于深埋地下的木桩并离地 2 m 高处,探头处的磁场梯度小于 1 nT/m。地磁数据通过 GOES 卫星的数字传输技术传输到门洛帕克的 USGS,用于计算处理(Johnston *et al.*, 2006)。

直到 1993 年年底,预测中的帕克菲尔德 6.0 级地震还没有发生,USGS 宣布“关闭”了这个地震预测的“窗口”。但其监测工作并没有“关闭”,

设置在帕克菲尔德地震预测试验场的台网继续坚持地震前兆的监测工作 (Lindh, 2003)。2004 年 9 月 28 日, USGS 在帕克菲尔德地震预测研究试验场守候多年的 6.0 级地震终于发生 (Fletcher *et al*, 2006; Langbein *et al*, 2005)。由上述多种仪器设备构成的前兆台网记录下了一次 6.0 级地震从发震前至发震时乃至发震后最为翔实的全过程, 取得了地震活动性、地应力、地磁场、地电场、地下水和地震引起的强烈地面运动等的完整记录 (Bakun *et al*, 2005; Lindh, 2005)。

2.2 帕克菲尔德地震的震磁信息

深入分析了设置在帕克菲尔德地震预测研究试验场 7 个地磁台站记录的帕克菲尔德 6.0 级地震前后的地磁数据, 结果表明, 该地震的同震震磁效应为 -0.4 nT , 而该地震较长时间的震磁异常为 -5.0 nT (Johnston *et al*, 2006)。

表 1 列出了这 7 个地磁台站的同震震磁效应。从表可见, 这 7 个台站离震中较近 ($< 32\text{ km}$), 其同震震磁效应较小, 相应的变化量为 $-0.4 \sim 0.3\text{ nT}$ 。

表 1 各台站的同震震磁效应
Tab. 1 Co-seismomagnetic effects at various stations

台站代码	震中距/km	变化量/nT
GDM	3.8	0.3
AGM	14.3	0.1
GRM	30.5	0.2
TFM	5.2	-0.4
VRM	21.0	-0.1
LGM	12.9	0.1
HGM	15.7	0.2

分析显示, 帕克菲尔德 6.0 级地震的同震震磁效应不是由电动磁机制 (Fitterman, 1979) 引起的, 而是由压磁机制 (Sasai, 1991) 引起的。根据该地区的实测结果与估算, 给出了如表 2 所示的压磁模型参数。

表 2 压磁模型的参数
Tab. 2 Parameters used in piezomagnetic model

应力灵敏度 /MPa ⁻¹	磁化强度 /A · m ⁻¹	磁倾角	磁偏角	居里面深度 /km
0.000 2	2	60	15°E	15

根据 Sasai (1991) 与 Johnston 和 Mueller (1987) 所描述的方法, 构建的帕克菲尔德 6.0 级地震的 4 个震磁模型的参数列于表 2。这 4 个震磁模型分别为: 模型 A 是基于均匀滑动的应变所反演的断层模型的震磁模型 (Johnston *et al*, 2005a); 模型 B 为基于均匀滑动的 GPS 位移所反演的断层模型的震磁模型 (Johnston *et al*, 2005b); 震磁模型 C 则是根据 GPS 与强运动的数据联合反演得出的 (Chen *et al*, 2004); 而震磁模型 D 是仅由强地面运动的数据反演得出的 (Liu *et al*, 2006)。这 4 个震磁模型在帕克菲尔德地震预测研究试验场中 7 个地磁台站的计算值列于表 3。对比表 3 中各台站的震磁模型值与观测值, 模型 B 的数值与相应的观测值较为一致, 而模型 D 的数值与相应的观测值的一致性较差。

表 3 各台站的震磁模型值与观测值 (单位: nT)

Tab. 3 Model and observation values of seismomagnetic at various stations (unit: nT)

台站代码	模型 A	模型 B	模型 C	模型 D	观测值
GDM	0.03	0.10	0.03	0.07	0.3
AGM	0.20	0.12	0.07	0.06	0.1
GRM	0.08	0.07	0.05	0.03	0.2
TFM	-0.04	-0.07	-0.05	0.22	-0.4
VRM	-0.08	-0.15	-0.10	-0.02	-0.1
LGM	-0.01	0.05	0.03	0.10	0.1
HGM	0.08	0.23	0.15	-0.22	0.2

表 4 为与帕克菲尔德 6.0 级地震有关的 1993 ~ 2004 年各台站的磁异常。由此可见, 各台站的磁异常在 $-5.0 \sim 1.0\text{ nT}$ 之间, 各台站的磁异常是与局部地质构造及其活动、应力变化状况、地下介质的电磁性质等因素有关。

表 4 1993 ~ 2004 年各台站的磁异常

Tab. 4 Magnetic anomalies at various stations during 1993 ~ 2004

台站代码	震中距/km	变化量/nT
GDM	3.8	0.0
AGM	14.3	-5.0
GRM	30.5	-4.2
TFM	5.2	-1.8
VRM	21.0	1.0
LGM	12.9	-1.1
HGM	15.7	0.0

3 火山磁效应

1980 年 5 月 18 日, 美国圣海伦斯火山发生了大喷发。在这次灾难性的大喷发之前的 10 天, USGS 已在圣海伦斯火山上架设了 3 台磁力仪, 其中两台磁力仪在这次大喷发中损失了。第三台磁力仪位于该主火山口以西约 5 km 处, 在这次大喷发与之后的各次喷发期间一直在连续工作。该台站连续地磁资料的分析表明, 这次火山大喷发时产生了 (9 ± 2) nT 的地磁总强度异常变化。这一火山磁效应是由于伴随火山大喷发的区域应力释放导致的压磁效应引起的 (Johnston *et al*, 1981)。

1980 年 5 月 18 日圣海伦斯火山的大喷发, 还引起了明显的大气层波动与电离层耦合效应, 在离该火山 8 211 km 处的多普勒效应、法拉第旋转现象、电离层电子数与地磁中都有所反映。

为研究该火山大喷发所引起的大尺度地磁扰动, Mueller 和 Johnston (1989) 分析了离该火山 1 493 km 以内的美国 28 个台站的地磁总强度资料。分析结果表明, 该火山大喷发所引起的地磁扰动信号随着地磁台站与该火山之间的距离 L 增加, 地磁扰动信号的出现时间具有规律性的滞后现象: 与该火山之间的距离 $L < 100$ km 的台站, 其地磁扰动信号出现的滞后时间 $\Delta T = 1 \sim 2$ min; 而当 $L = 1\ 362 \sim 1\ 493$ km 时, $\Delta T = 44 \sim 48$ min。这表明, 该地磁扰动信号具有一定的传播速度, 约为 $280 \sim 580$ km/s。而且, 该火山大喷发所引起的地磁扰动幅度 ΔF 随着地磁台站与该火山之间的距离 L 增加, 其 ΔF 出现下降趋势; 当 $L < 100$ km 时, $\Delta F = 10 \sim 20$ nT; 当 $L = 1\ 439 \sim 1\ 493$ km 时, $\Delta F = 5 \sim 6$ nT。Mueller 和 Johnston (1989) 的研究表明, 这种大尺度地磁扰动是由圣海伦斯火山大喷发所激发的电离层扰动引起的。

Davis 等 (1984) 于 1981 年 10 月在圣海伦斯火山附近布设了 5 个台站观测地磁总强度, 最近的台站离火山口约 1 km。同时还有地倾斜与地电的观测。对于 1981 年 10 月 30 日圣海伦斯火山喷发前后, 这三种观测资料的分析结果表明, 最大的磁异常变化约为 5 nT, 地倾斜的变化约为 120 微弧度, 但地电却没有相应的明显异常变化。Davis 等 (1984) 的研究表明, 这次圣海伦斯火山喷发的磁

异常变化的机制是该火山喷发的压磁效应, 而不是电动磁效应, 因为没有观测到与地磁异常变化相对应的地电异常变化。

4 讨论与结论

表 5 给出了美国震磁观测研究的一些震例结果, 其结果显示, 对于 5.2 ~ 7.3 级地震, 在离震中为 3 ~ 50 km 的测点与台站上, 得到地磁总强度的变化异常幅度为 0.3 ~ 6 nT。表 5 中, 1974 年 11 月霍利斯特 5.2 级地震的地磁变化异常出现在该地震之前 40 天, 而其它震例结果都是同震的震磁效应。同震的震磁效应符合发震时刻应力突然释放所引起的压磁效应。研究结果表明, 对于某些地震而言, 存在震磁前兆信息, 因此, 震磁效应的观测研究是探索地震预测的一种手段。

表 5 美国一些地震的震磁效应

Tab. 5 Seismomagnetic effects of some earthquakes in USA

发震时间 /年-月	发震地点	震级	观测点的震中距 /km	地磁异常幅度 /nT
1974-11	霍利斯特	5.2	11	1.8
1979-08	凯澳蒂湖	5.7	30~50	3~6
1986-07	北棕榈泉	5.9	3	1.3
			9	0.3
1989-10	洛马普里塔	7.1	20	1.4
1992-06	兰德斯	7.3	17	1.2
2004-09	帕克菲尔德	6.0	5	0.4
			14.3	5.0

2004 年 9 月 28 日帕克菲尔德 6.0 级地震的发生比预测的时间晚了 11 年, 虽然在震前未检测到、至今仍未分析出有地震前兆, 但是由多种仪器设备构成的前兆台网记录下了有史以来最为翔实从发震前至发震时乃至发震后的全过程的一次地震, 取得了地震活动性、地应力、地磁场、地电场、地下水和地震引起的强烈地面运动等的完整记录 (陈运泰, 2009)。正因为有这么多种观测资料, 才有可能建立了如上所述的 4 个不同震磁模型, 通过这 4 个震磁模型的计算值与实际观测值的比较与分析, 得出了较好的与较差的震磁模型, 从而获得合理的震磁物理机制。

1980 年 5 月 18 日美国圣海伦斯火山大喷发,

产生了 (9 ± 2) nT 的地磁总强度异常变化。这一火山磁效应是由伴随该火山大喷发的区域应力释放导致的压磁效应引起的。该火山大喷发还引起了大尺度的地磁扰动,是由圣海伦斯火山大喷发所激发的电离层扰动引起的。1981年10月30日圣海伦斯火山喷发,在离火山口约1 km的台站,产生了约为5 nT的磁异常变化。该火山喷发的磁异常变化的机制是圣海伦斯火山喷发的压磁效应。

以 Johnston 为首的美国研究组参加了菲律宾 Taal 火山国际合作的监测与研究(袁洁浩等, 2013)。2013年3月,以 Johnston 为首的美国研究组在菲律宾 Taal 火山附近又架设了倾斜仪与调节器。该美国研究组将与日本、法国、希腊、意大利、比利时等国家的研究组继续开展菲律宾 Taal 火山国际合作的监测与研究,可望获得火山磁效应观测研究的丰硕成果。

5 展望

综上所述,美国的震磁观测与研究已获得了长足的进步,在地震预测实验场的监测与研究以及火山磁效应的观测与研究方面都具有宝贵的经验。对于震磁效应与火山磁效应的观测与研究,各国都很重视。美国的这些研究成果与宝贵经验可供世界各国参考与借鉴,从而有助于推进今后的震磁效应与火山磁效应的观测与研究。

今后,USGS 将致力于包括地磁、倾斜、线性的与张量的应变、地电、湖水深度变化、孔隙张量与膨胀应变、火山位移等方面的监测,以了解与研究地震、活动断层破裂与火山活动的机制。根据这些观测资料的综合分析结果,来描述地震、地壳破裂与火山活动的物理模型,确定由这些资料得到的震源物理的意义。

对于震磁效应的观测与研究,相关的专家学者十分关注。中、美、日、俄等国都在地震活动区开展了震磁效应的观测研究,并积极探索地震预测,已获得了良好进展(顾左文等, 2006; Gu *et al.*, 2006; Sasai *et al.*, 2007; Nishida *et al.*, 2007; Currenti *et al.*, 2007; Yoshimura *et al.*, 2008; Mauro *et al.*, 2008; Varotsos, Uyeda, 2008; Johnston *et al.*, 2008; Yamazaki, 2009; 陈斌, 2011)。各国继续开展震磁效应的观测研究,必将推进震

磁研究。

近年来,我国的相关专家学者关注岩石圈磁异常变化与地震的关系,而且在地震活动区与构造活动带,已观测到了与地震活动、地质构造有关的岩石圈磁异常(倪喆等, 2014; 顾春雷等, 2010, 2012; 闫素萍等, 2010)。许多具有破坏性的浅源地震都发生在岩石圈中。在地震的孕育和发生的过程中,会引起局部岩石圈的地质结构、温度与应力状态、介质电磁性质等因素的变化,从而导致岩石圈磁异常。分析岩石圈磁异常变化与地质构造的关系,研究与地震相关的构造活动所产生的岩石圈磁场变化特征,对分析震磁前兆信息与研讨区域地震活动性都具有重要意义。因此,分析研究岩石圈磁异常变化与地震的关系在震磁研究中具有重要意义,今后应当深入地探索与研究。

2001年成立的国际地震与火山电磁研究工作组(EMSEV),一直致力于地震与火山电磁研究的国际学术交流与合作,有力地推进了地震与火山的电磁研究(袁洁浩等, 2013)。从2004年开始至今,EMSEV 一直与菲律宾开展 Taal 火山的监测与研究的国际合作,来自日本、法国、美国、希腊、意大利与比利时等国家的研究小组都参加了该国际合作,充分体现了 EMSEV 国际合作的特色与优势。这种强有力的国际合作研究,有助于攻克科学难题。

2011年11月10日,EMSEV 与俄罗斯科签订了今后4年的科学与技术合作协定。该协定旨在合作研究中亚地区活动断层与发生地震的物理过程期间,为双方提供科学与技术的活动平台,推进应用电磁与其它地球物理方法的新研究,利于解决有关中亚大陆岩石圈的不同活动断层的地震发生与监测并减轻这类地震的基本问题。而且,如果双方同意,该协定的合作时间可以再延长4年。这样稳定而长期的国际合作将有助于解决地震与火山电磁研究的基本问题。

感谢詹志佳研究员在文章修改中提出的宝贵意见。

参考文献:

陈斌. 2011. 自然正交分量方法在地震地磁监测中的应用[J]. 地震研究, 34(4): 466-469.

- 陈运泰. 2009. 地震预测: 回顾与展望[J]. 中国科学(D 辑), 39(12): 1 633 - 1 658.
- 顾春雷, 张毅, 顾左文, 等. 2012. 华北地震区岩石圈磁异常场零值线与中强震震中分布关系[J]. 西北地震学报, 25(2): 174 - 179.
- 顾春雷, 张毅, 徐如刚, 等. 2010. 地震前后岩石圈磁场变化特征分析[J]. 地球物理学进展, 25(2): 472 - 477.
- 顾左文, 张毅, 姚同起, 等. 2006. 九江—瑞昌 $M_s 5.7$ 地震地磁异常的观测与分析[J]. 地震学报, 28(6): 611 - 621.
- 倪喆, 陈双贵, 袁洁浩, 等. 2014. 芦山 7.0 级地震前后岩石圈地磁变化异常的研究[J]. 地震研究, 37(1).
- 闫素萍, 张毅, 张有林, 等. 2010. 东大别构造带地震地磁监测试验区岩石圈磁场特征分析[J]. 地球物理学进展, 25(5): 1599 - 1604.
- 袁洁浩, 顾左文, 陈斌, 等. 2013. 地震与火山电磁研究的国际学术交流与合作[J]. 地震研究, 36(1): 132 - 140.
- Allen C. R. 1982. Earthquake prediction-1982 overview [J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 72(6B): S331 - S335.
- Bakun W. H., Aagaard B., Dost B., *et al.* 2005. Implications for prediction and hazard assessment from the 2004 Parkfield earthquake[J]. Nature, 437: 969 - 974. doi:10.1038/nature04067.
- Chen J., Choi K., King N., *et al.* 2004. Co-seismic slip history and early afterslip of the 2004 Parkfield earthquake[C]. San Francisco, Calif: EOS Trans., AGU 85, 47.
- Currenti G., Del Negro C., Johnston M., *et al.* 2007. Close temporal correspondence between geomagnetic anomalies and earthquakes during the 2002 ~ 2003 eruption of Etna volcano[J]. J. Geophys. Res., 112(B09103), doi:10.1029.
- Davis P., Jackson D., Johnston M. 1980. Further evidence of localized geomagnetic field changes before the 1974 Thanksgiving Day Earthquake Holister, California [J]. Geophys. Res. Lett., 7(7): 513 - 516.
- Davis P., Johnston M. 1983. Localized geomagnetic field changes near active faults in California, 1974 ~ 1980 [J]. J. Geophys. Res., 88(B11): 9 452 - 9 460.
- Davis P., Pierce D., McPherron R., *et al.* 1984. A volcanomagnetic observation on Mount St. Helens, Washington [J]. Geophys. Res. Lett., 11(3): 225 - 228.
- Fitterman D. 1979. Theory of electrokinetic magnetic anomalies in a faulted half-space[J]. J. Geophys. Res., 84(B11): 6 031 - 6 041.
- Fletcher J., Spudich P., Backer L. 2006. Direct observation of earthquake rupture propagation in the 2004 Parkfield, California, earthquake using the UPSAR accelerometer[J]. Bull. Seism. Soc. Am., 96(4B): S129 - S142.
- Gu Z., Zhan Z., Gao J., *et al.* 2006. Seismomagnetic Research in Beijing and Its Adjacent Area, China [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 31(4 ~ 9): 258 - 267.
- Johnston M., Borchardt R., Gladwin M., *et al.* 2005a. High-resolution strain on the San Andreas Fault at Parkfield before, during, and after the September 28, 2004 Parkfield earthquake: implications for fault response, nucleation, earthquake prediction and tremor[J]. Seis. Res. Lett., 76: 217 - 236.
- Johnston M., Borchardt R., Linde A., *et al.* 2005b. Continuous borehole strain and pore pressure in the near field of the September 28, 2004 $M_6.0$ Parkfield earthquake: implications for nucleation, fault response, earthquake prediction and tremor [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 96(4B): S56 - S76.
- Johnston M., Mueller R., Dvorak J. 1981. Volcanomagnetic observations during eruptions May-August 1980, in the Eruptions of Mount St. Helens, Washington [R]. U. S. Geological Survey Prof. Pap., 1250: 183 - 189.
- Johnston M., Mueller R., Sasai Y. 1994. Magnetic field observations in the near-field of the June 28, 1992, $M_L 7.5$ Landers, California earthquake [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 84: 792 - 798.
- Johnston M., Mueller R. 1987. Seismomagnetic observation during the 8 July 1986 magnitude 5.9 North Palm Springs earthquake [J]. Science, 237: 1 201 - 1 203.
- Johnston M., Sasai Y., Egbert G., *et al.* 2006. Seismomagnetic effects from the long-awaited 28 September 2004 $M_6.0$ Parkfield earthquake [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 96(4B): S206 - S220.
- Johnston M., Sasai Y., Egbert G., *et al.* 2008. Reply to "Seismomagnetic effects from the long-awaited 28 September 2004 $M_6.0$ Parkfield earthquake" by P. Varotsos and S. Uyeda [J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 98(4): 2 090 - 2 093.
- Johnston M., Smith B., Mueller R. 1976. Tectonomagnetic experiments and observations in western USA [J]. J. Geomag. Geoelect., 28: 85 - 99.
- Johnston M. 1978. Local magnetic field variations and stress changes near a slip discontinuity on the San Andreas fault [J]. J. Geomag. Geoelect., 5: 511 - 548.
- Kanamori H. 1983. Global seismicity [A]//Kanamori H., Boschi E., eds. Earthquakes: Observation, Theory and Interpretation [C]. New York: Elsevier North-Holland Inc., 596 - 608.
- Langbein J., Borchardt R., Dreger D., *et al.* 2005. Preliminary report on the 28 September 2004, $M_6.0$ Parkfield, California earthquake [J]. Seis. Res. Lett., 76: 10 - 26.
- Lindh A. G. 2003. The nature of earthquake prediction [J]. Seis. Res. Lett., 74: 723 - 735.
- Lindh A. G. 2005. Success and failure at Parkfield [J]. Seis. Res. Lett., 76: 3 - 6.
- Liu P., Custodio S., Archuleta R. 2006. Kinematic inversion of the 2004 $M_6.0$ Parkfield earthquake including site effects [J]. Bull. Seism. Soc. Am., 96(4B): 5 143 - 5 158.
- Mauro D. Di, Persio M. Di, Lepidi S., *et al.* 2008. The INGV tectonomagnetic network in central Italy. Fifteen years of observations and future developments: an update [J]. Annals of Geophysics, 51(1): 137 - 146.
- Mueller R., Johnston M., Smith B. U. S. 1981. Geological Survey magnetometer network and measurement techniques in western USA [R]. Menlo Park, Calif: U. S. Geol. Survey.
- Mueller R., Johnston M. 1989. Large-scale magnetic field perturbation a-

- rising from the May 18, 1980, eruption from Mount St. Helens, Washington[J]. *Phys. Earth Plan. Int.*, 57(1-2): 23-31.
- Mueller R., Johnston M. . 1998. Review of magnetic field monitoring near active faults and volcanic calderas in California; 1974 ~ 1995 [J]. *Phys. Earth Plan. Int.*, 105(3-4): 131-144.
- Nishida Y., Utsugi M., Mogi T. . 2007. Tectonomagnetic study in the eastern part of Hokkaido, NE Japan (II): magnetic fields related with the 2003 Tokachi-oki earthquake and the 2004 Kushiro-oki earthquake[J]. *Earth Planets Space*, 59(11): 181-186.
- Press F., Benioff H., Frosch R. A., *et al.* 1965. Earthquake Prediction: A Proposal for A Ten Year Program of Research[M]. Washington D C: White House Office of Science and Technology.
- Sasai Y., Johnston M., Tanaka Y. . 2007. Drag-out effect of piezomagnetic signals due to a borehole: the Mogi source as an example[J]. *Annals of Geophysics*, 50(1): 93-104.
- Sasai Y. . 1991. Tectonomagnetic modeling on the basis of linear piezomagnetic theory [J]. *Earthquake Res. Inst. Bull.*, 66(4): 585-722.
- Smith B., Johnston M. . 1976. A tectonomagnetic effect observed before a magnitude 5.2 earthquake near Hollister, California[J]. *J. Geophys. Res.*, 81(20): 3556-3560.
- Varotsos P., Uyeda S. . 2008. Comment on "Seismomagnetic effects from the long-awaited 28 September 2004 *M*_{6.0} Parkfield earthquake" by M. J. S. Johnston, Y. Sasai, G. D. Egbert, and R. J. Mueller[J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98(4): 2087-2089.
- Yamazaki K. . 2009. Calculation of the piezomagnetic field arising from uniform regional stress in inhomogeneously magnetized crust[J]. *Earth Planets Space*, 61(10): 163-168.
- Yoshimura R., Oshiman N., Uyeshima M., *et al.* 2008. Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto earthquake (*M*_j 6.9), central Japan [J]. *Earth Planets Space*, 60: 117-122.

Seismomagnetic Observation and Research in USA

YUAN Jie-hao, GU Zuo-wen, CHEN Bin, WANG Can, DI Chuan-zhi, GAO Jin-tian

(*Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China*)

Abstract

The U. S. Geological Survey (USGS) and the relative universities have set up the geophysical observation networks, including geomagnetic observation in the western America, particularly in the San Andreas Fault and its adjacent area in order to monitor the seismic activities. For the *M*_{5.2} ~ *M*_{7.3} earthquakes, the analytical results of the geomagnetic data show that the change anomalies amplitude of the geomagnetic total intensity were 0.3 ~ 6 nT observed at the sites and stations which were apart 3 ~ 50 km from these earthquakes epicenters. The seismomagnetic research results show that there are seismomagnetic precursors for some earthquakes. Therefore, the observation and research on the seismomagnetic effects is a method to study earthquake prediction. The results through carefully analyzing the geomagnetic data at seven stations before and after Parkfield *M*_{6.0} earthquake on Sep. 28, 2004 show that the co-seismomagnetic effects are -0.4 ~ 0.3 nT, which are caused by piezomagnetic mechanism. The seismomagnetic anomalies with longer time for this earthquake are -5.0 ~ 1.0 nT, which are related to the factors such as the local geological structure and its activity, the state of stress changes, the electromagnetic properties of the underground media.

Key words: geomagnetic observation; seismomagnetic effect; experimental field for earthquake prediction research; volcanomagnetic effect; San Andreas Fault