

李美, 谭捍东, 王中平, 张小涛, 曹萌. 2015. 用电子-空穴理论推算汶川 $M_s8.0$ 地震电磁异常的“能量源”大小. 地震学报, 37(5): 842–852. doi:10.11939/jass.2015.05.012.

Li M, Tan H D, Wang Z P, Zhang X T, Cao M. 2015. Using the electron-hole theory to estimate the “energy” magnitude related to the electromagnetic abnormalities before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 37(5): 842–852. doi:10.11939/jass.2015.05.012.

用电子-空穴理论推算汶川 $M_s8.0$ 地震 电磁异常的“能量源”大小^{*}

李 美^{1,2),*} 谭捍东²⁾ 王中平¹⁾ 张小涛¹⁾ 曹 萌²⁾

1) 中国北京 100045 中国地震台网中心

2) 中国北京 100083 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院

摘要 基于汶川 $M_s8.0$ 地震前 3 天记录到的强空间电磁异常的观测事实, 引用岩石压电效应模型和岩石受压产生的电子-空穴理论, 尝试推算和解释汶川地震前产生的显著空间电磁异常现象的“能量源”问题. 结果显示: 在设定汶川 $M_s8.0$ 地震发震主断层所受最大水平主应力和断层表面积的情况下, 根据理论模型模拟计算得出, 当发震主断层在强压力作用下形成微破裂至宏观破裂发育产生主破裂前, 断层表面积累的电荷带电量为 $10^6—10^7$ C, 产生的垂直地-气界面附加电场为 $10^7—10^8$ V/m; 主破裂发生时, 断层表面电量可达 10^8 C, 电场强度高达 10^9 V/m, 断层输出电流流量级达 10^5 A. 震源区地-气界面电磁场的增强, 一方面引起地面附近大范围电磁观测参数的大幅度突变异常, 另一方面加速震源区上空的气体分子电离, 空气电离增强空气的电导率, 促使电荷快速扩散至电离层高度, 直接引起高空电离层参数的短时突变异常并经空间地震监测卫星记录到.

关键词 汶川地震 电磁异常 电子-空穴理论 能量源

doi:10.11939/jass.2015.05.012 中图分类号: P319.1⁺2 文献标志码: A

Using the electron-hole theory to estimate the “energy” magnitude related to the electromagnetic abnormalities before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

Li Mei^{1,2),*} Tan Handong²⁾ Wang Zhongping¹⁾ Zhang Xiaotao¹⁾ Cao Meng²⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences,
Beijing 100083, China

Abstract: On the base of the electron-hole theory stated by Freund *et al.*, this paper attempts to deduce and interpret the energy of the obvious lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling observed on May 9, 2008, three days before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. During the process, we set the largest hori-

* 基金项目 国家自然科学基金(No. 41204057)资助.

收稿日期 2014-12-29 收到初稿, 2015-05-12 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: limeixuxl@seis.ac.cn

zontal principal stress and the earthquake plate area of the main fault. The simulation results show, during the period of the micro-cracks developing into the macro-cracks before the main rupture occurs, the total surface charge range of the main fault falls in 10^6 — 10^7 C and the related upward electric field, which is perpendicular to the interface between the Earth surface and the atmosphere, is 10^7 — 10^8 V/m. The corresponding parameters are up to 10^8 C and 10^9 V/m when the main rupture happens, and the output current is up to 10^5 A in order. On one hand, the electric field increasing in the interface between the Earth surface and the atmosphere, can cause electromagnetic parameter abnormalities of the ground-based observation, with the range beyond 1000 km; on the other hand, it can accumulate air ionization above pre-earthquake zone, leading to ionospheric parameters short-time sudden changes recorded by some spatial seismic monitoring satellites.

Key words: Wenchuan earthquake; electromagnetic abnormality; electron-hole theory; energy magnitude

引言

地震前兆可以用来预测地震以减少地震造成的人员伤亡和财产损失. 地震是极其复杂的地学过程, 在孕育、发展、发生的各个阶段都伴随着电磁现象已是不争的事实. 目前, 基于地面的地震电磁观测已经积累了丰富的震例资料. 1989 年 10 月 18 日美国 Loma Prieta $M_s 7.1$ 地震前观测到 0.01—10 Hz 频段的电磁异常(Fraser-Smith *et al.*, 1990), 引起了科学界的广泛关注; 2009 年 L'Aquila $M_s 6.2$ 地震前观测到 0.3—3 Hz 频段的地磁异常, 以及总电子含量(total electric content, 简称为 TEC)和甚低频异常(Eftaxias *et al.*, 2010; Villante *et al.*, 2010; Prattes *et al.*, 2011; Stangl *et al.*, 2011); Han 等(2011)用小波分析评价了与 2000 年 Izu Islands 震群 $M_s \geq 6.0$ 地震有关的超低频电磁异常特征; Chavez 等(2011)对 2010 年墨西哥 3 次 $M_s \geq 6.0$ 地震总结了电磁异常探测方法及震前电磁异常. 李美和卢军(2008)通过国内刊物收集了百余次 $M_s \geq 5.0$ 震例的电磁辐射资料, 研究了地震电磁异常的统计特征.

然而, 与地震有关的电磁信号的发生与传播机制的研究, 目前仍处于探索阶段. 为了解释地震相关电磁信号的产生机理和震前电磁现象(如信号选择性或不均匀性), 各国研究人员做了大量岩石受力破裂实验, 发现岩石破裂过程中产生电磁信号并伴有电流形成. 目前, 有几种物理机制可以解释地下产生的电磁信号和强电流, 包括动电效应、磁流体动力学效应、压电(磁)效应, 以及应力引起地壳电导率变化及微裂隙等(Draganov *et al.*, 1991; Park *et al.*, 1993; Simpson, Taflove, 2005), 但对这些解释仍有不同看法.

地震是一个动力学演化过程, 同时在地震孕育、发展和发生的各个阶段都伴随电磁异常信息, 因此, 利用力学-电磁学耦合机制来解释地震相关电磁现象的压电效应是合理的. 尽管 Tuck 等(1977)认为自然界岩石的有效压电效应太弱而不足以产生可观测到的电磁信号, 但是 Sasaoka 等(1998)给出室内实验的有效压电效应大约为 0.1%—1%. Huang (2002)利用断层电磁学模型研究得出: 在野外产生可观测信号所需的有效压电效应仅为 10^{-6} ; 当压电晶体完全随机分布时, 有效压电效应将不足以产生可被观测到的电磁信号;

当压电晶体出现微小的优势取向时,即可根据断层的电磁模型计算预期产生的可观测信号. Freund 等的室内岩石压力实验结果表明,当岩石受力时,过氧链 $\text{O}_3\text{Si}-\text{OO}-\text{SiO}_3$ 破裂产生电荷,激活正的空穴作为电荷载荷子并产生沿应力梯度方向的电流密度,并提出电子-空穴理论(Freund, 2000, 2002, 2010; Freund, Sornette, 2007; Freund *et al.*, 2009). Kuo 等(2011)基于电子-空穴理论和实验数据,建立岩石压电效应理论模型,当地震断层表面积为 $200\text{ km} \times 30\text{ km}$, 断面电流密度取 $0.5\text{ }\mu\text{A}/\text{m}^2$ 时,计算得到的断层带电量为 $1.3 \times 10^6\text{ C}$, 产生垂直断面向上的电场强度为 $2.4 \times 10^7\text{ V/m}$. 在此基础上,利用空间电磁耦合模型,进一步计算得出:理论上断面电荷密度为 $0.2\text{—}10\text{ }\mu\text{A}/\text{m}^2$ 所引起的白天电离层参数 TEC 变化为 $2\%\text{—}25\%$; $0.01\text{—}1\text{ }\mu\text{A}/\text{m}^2$ 的电流密度可导致夜间 TEC 产生 $1\%\text{—}30\%$ 的变化幅度.

本文首先列举汶川 $M_s8.0$ 地震前 3 天观测到的强空间电磁异常现象的观测事实,然后利用 Kuo 等(2011)建立的岩石压电效应理论模型,结合震源区参数,尝试模拟和解释引起该地震前显著空间电磁现象的“能量源”问题.

1 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震及电磁异常现象

2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前观测到从地面到高空电离层的电磁异常现象. 对于地面观测,在电场方面,河北高碑店台和宁晋台在 2007 年 10 月末开始记录到超低频($0.1\text{—}10\text{ Hz}$)电场异常,2008 年 4 月初异常开始增强,至 5 月 9 日,高碑店台 EW 和 SN 两个方向同时记录到高频($0.1\text{—}0.3\text{ s}$)异常,其幅度高达 70 mm (1.3 mV/m),异常信息达到高潮,且高值异常信息一直持续到 5 月 17 日,即主震后 5 天. 地震前后异常信息持续了近 11 个月(李美等, 2009; Li *et al.*, 2013).

在磁场方面,汶川 $M_s8.0$ 大地震前垂直分量日变化出现大范围异常变化,特别是 5 月 9 日前后其变化幅度约为 $10\text{—}20\text{ nT}$, 4 月 24 日和 5 月 9 日中国大陆地磁场出现低点位移异常(王武星等, 2009). 5 月 9 日四川 6 个地磁台站观测到地磁垂直分量整点值的日变形态出现波谷分裂现象,观测曲线均在 5 月 9 日出现畸变(程万正等, 2010); 5 月 9 日我国 13 个地磁台地磁垂直分量日变形态出现“双低点”异常(胡久常等, 2009).

对于空间电离层观测, GPS 卫星观测到汶川大地震震前 3 天(2008 年 5 月 9 日)白天震中位置上空电离层 TEC 出现显著增强,与参考日相比增幅达 60% ,当天夜间 TEC 与参考日相比出现下降. f_oF_2 最明显的正扰动出现在 5 月 9 日,从正午到日落其幅度增强 $40\%\text{—}80\%$ (余涛等, 2009). 震前 4—6 天在震中上空出现 TEC 下降,但震前 3 天又出现增强,高值区纬向和经向分别延伸了 1650 km 和 2850 km ; F_2 层电子浓度峰值 N_mF_2 和高度 h_mF_2 分别下降约 40% 和降低 $50\text{—}80\text{ km}$ (Liu *et al.*, 2009). 震前 3 天 10 个台站的 f_oF_2 数据显示,在震中上空右侧出现一个大的圆形正扰动,相对偏差达 65% ,异常持续 3 小时. 这一异常形态区别于磁暴引起的电离层扰动(Xu *et al.*, 2010a, b; 2011). 汶川地震主震前 2—3 天记录到的异常最强,TEC 变化为 -24% (Akhoondzadeh *et al.*, 2010); 5 月 3 日扰动幅度约为 20% ; 5 月 6 日扰动幅度达 26% ; 5 月 9 日最大异常值为 5.9 TECu , 扰动幅度达 31.4% (闫相相等, 2012). 在震前多次出现垂直总电子浓度的异常扰动,其中 4 月 29 日和 5 月 6—7 日异常减小,相对变化超过 30% ; 5 月 9 日异常增加,最大值超出 2 倍标准差上限约 4 TECu (祝芙英等, 2009).

分析震前 10 天 O^+ 浓度数据,震前 3 天达到最低值 $10^4/\text{cm}^3$ (Zhang *et al*, 2009),震前 4 天电子浓度和电子温度分别下降 56.4% 和 28.3%;震前 3 天电子浓度和电子温度均有一个突变,并达到极小值,相对于前一个时刻(这里时间分辨率为 1 s)电子浓度下降约 3%,电子温度下降约 7%,且电场功率谱和磁场功率谱都达到最强(曾中超等, 2009).震前 3 天 Langmuir 探针和等离子体分析仪记录的电子浓度转折幅度为 -24%,震前 2 天达到最低值 -37%,电子温度值变化分别为 15% 和 29% (Akhoondzadeh *et al*, 2010).

综上,汶川 $M_s8.0$ 地震前,从地面观测到空间卫星观测均记录到长时间、大范围出现的丰富的电磁异常现象,特别是震前 3 天(5 月 9 日)电磁异常突然增强达到高潮,这绝不是偶然现象,必然存在驱动这些显著空间电磁现象的“能量源”.

2 电子-空穴理论及其理论计算

2.1 电子-空穴理论

电子-空穴理论由 Freund 等通过室内岩石压力实验提出 (Freund, 2000, 2002; Freund, Sornette, 2007; Freund *et al*, 2009),如图 1 所示.该理论认为,当岩石不断受压时,岩石会激活正空穴(h^*)作为载荷子,同时产生沿应力梯度方向的电流密度 J_{rock} ,其方向与岩样表面 A 正交,并产生附加电场 E_{air} .空穴载荷子以过氧链形式存在于岩石中,处于电性非激活状态,过氧链 $O_3\text{Si}-\text{OO}-\text{SiO}_3$ 中两个 O^- 紧紧地束缚在一起.在压力下,晶格位错引起岩石矿物中过氧链断裂,断裂的过氧链起到电子接收器作用,它吸收电子且束缚住电子.而离子团 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 释放电子,变成 $[\text{SiO}_4]^{3-}$,形成正空穴,用 h^* 表示.这样,电子被束缚在断裂的过氧链中,而正空穴可以自由传播,使 O^{2-} 跃变为 O^- .

从受压岩石中流出的正空穴子 h^* 会引起:① 在受压岩石与非受压岩石之间产生电位差,因为相对于受压岩石,非受压岩石带正电荷;② 非受压岩石中自由正空穴(h^*)载荷子产生静电排斥,最终被推向岩石表面;③ 电晕放电.

岩石表面正载荷子 h^* 累积产生正的面电荷,在岩石表面形成微观高电压,可能引起空气分子的电离($O_2 \rightarrow O_2^+ + e^-$),产生 O_2^+ 离子和电子,这些岩石表面的电子会吸引岩体中更多的正载荷子 h^* .因此,这一空气分子电离效应可被看作是,将正的面电荷通过空气-岩石界面移动到带 O_2^+ 的空气中.

2.2 岩石受压产生的电荷带电量计算

Kuo 等(2011)基于上述的岩石受压产生的电子-空穴模型,给出了其理论计算公式.对于大地与空气的界面,靠近空气一侧的电场强度 E_{air} 和空气中的电流密度 J_{air} 分别为

$$E_{\text{air}} = \frac{q_s}{\epsilon_0}, \tag{1}$$

$$J_{\text{air}} = \sigma_{\text{air}} E_{\text{air}}, \tag{2}$$

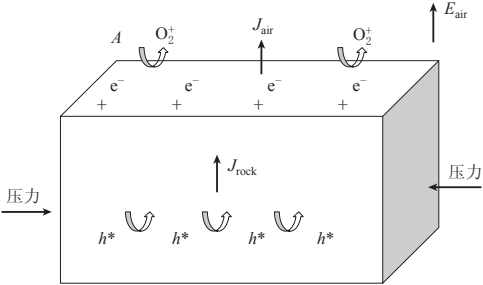


图 1 岩石受压产生电子和空穴模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of electronic charge carriers and electric currents producing as rocks are subjected to stress

式中 q_s 为面电荷密度, ϵ_0 为自由空间介电常数, σ_{air} 为空气电导率. 由式(1)和(2), 受力岩石面电荷带电量 Q 可表示为

$$Q = Aq_s = AJ_{\text{air}} \frac{\epsilon_0}{\sigma_{\text{air}}}, \quad (3)$$

Q 随时间 t 的变化满足

$$\frac{dQ}{dt} = AJ_{\text{rock}} - AJ_{\text{air}} = AJ_{\text{rock}} - \frac{\sigma_{\text{air}}Q}{\epsilon_0}, \quad (4)$$

式中 A 为受压岩的表面积, J_{rock} 为岩石中的电流密度.

正常情况下, 空气背景电导率 σ_0 是由空气中正离子(n_{+0})和负离子(n_{-0})中有限离子流(μ_+ 和 μ_-)引起的, 多种过程均会产生空气中的正负离子, 例如, 宇宙射线引起空气电离、放射性气体和土壤中放射性物质(Rycroft *et al*, 2008). 因此, $\sigma_0 = q_+ \mu_+ n_{+0} + q_- \mu_- n_{-0}$, 式中 $n_{+0} = n_{-0} = 2.7 \times 10^8 / \text{m}^3$, 正离子流 $\mu_+ = 2.5 \times 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$, 负离子流 $\mu_- = 2.2 \times$

$10^{-4} \text{ V} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$ (RiOUSSET *et al*, 2010), 所以 $\sigma_0 \approx 2.0 \times 10^{-14} \text{ S/m}$. 若忽略受压岩石表面正载离子引起的导电性, 取 $\sigma_{\text{air}} = \sigma_0$, 则式(4)的解析解为

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-t/\tau_0}), \quad (5)$$

式中 $\tau_0 = \epsilon_0 / \sigma_0$,

$$Q_0 = AJ_{\text{rock}} \tau_0 = AJ_{\text{rock}} \frac{\epsilon_0}{\sigma_0}. \quad (6)$$

图2为总电荷带电量 Q 随时间 t 的变化曲线. 总电荷带电量 $Q(t) = Q_0(1 - e^{-t/\tau_0})$ 为充电时间 t 的函数, 其中, $Q_0 = AJ_{\text{rock}} \tau_0$ 为 Q 在 $t \rightarrow \infty$ 时的渐近值. 可以看出, 随着充电时间的增长, 总面电荷带电量 $Q(t)$ 很快接近其渐近值 Q_0 ; 当充电时间 $t = \tau_0 = \epsilon_0 / \sigma_0$ 约为 440 s 时, 总面电荷带电量 $Q = 63.2\% Q_0$.

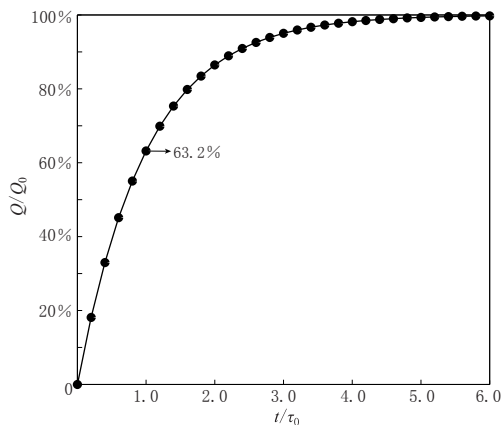


图2 总电荷带电量 Q 随充电时间 t 的变化曲线
Fig. 2 The total surface charge Q as a function of charging time t

3 汶川 $M_s 8.0$ 地震在主断层带产生的总电荷带电量及电场强度

Freund 等(2009)用从中国山西采集到的地壳深层火成岩——辉长岩样品做岩石压力实验. 样品孔隙度约为 0.3%, 含水量 $< 1\%$. 实验发现: 加载前背景离子电流在 pA 量级; 在低加载时电流仍然很低; 当岩石受压为 10 000—25 000 lbs (2.23—5.58 MPa) 时, 在表面积为 200 cm^2 集热板的正离子电流升高至 10—25 nA; 在岩样破裂前 2 s, 压力约为 30 000 lbs (6.67 MPa), 记录到 55 nA 电流脉冲; 岩样破碎时电流脉冲达 450 nA. 因此在整个岩样受压至破裂前, 受压岩石产生的面电流密度 J_{rock} 约为 $0.5\text{—}2.75 \mu\text{A}/\text{m}^2$, 岩样破碎时面电流密度约为 $22.5 \mu\text{A}/\text{m}^2$.

受印度板块与欧亚板块碰撞及其持续东北向推挤导致的高原物质东移的影响, 龙门山断裂带自新生代以来经历了强烈的地壳变形和断裂作用, 汶川 $M_s 8.0$ 地震发生在青藏高原东缘的龙门山推覆构造带内, 形成长 240—350 km、宽 30 km 的地表破裂带(丁志峰等,

2008; 徐锡伟, 2009; 解朝娣等, 2010). 汶川地震震中位于龙门山断裂带中间断裂汶川地区, 震源位于厚度不规则花岗岩层(朱迎堂等, 2008). 安其美等(2004)沿龙门山断裂带两侧 9 个钻孔进行水压致裂地应力测量结果显示, 距汶川地震震中最近的 400 m 深汶川钻孔, 其水平最大主应力为 14 MPa(约为 Freund 等(2009)实验时岩样应力的 2 倍), 且水平主应力随深度增加而增大. 同时, 郝锦绮等(2004)研究表明双轴压力下岩样自电位 ΔV 与应力突变率 $\Delta \gamma$ 的异常幅度成正比. 因此, 若不考虑深度对水平主应力的影响, 汶川地震震源区受压前期岩石所产生的面电流密度小于 $5.5 \mu\text{A}/\text{m}^2$ ($2.75 \times 2 = 5.5 \mu\text{A}/\text{m}^2$), 其下限假定等于上述实验值, 为 $0.5 \mu\text{A}/\text{m}^2$; 而在发震主断层微裂隙迅速发育至宏观破裂时, 主断层表面电流密度可达 $45.0 \mu\text{A}/\text{m}^2$ ($22.5 \times 2 = 45.0 \mu\text{A}/\text{m}^2$).

取汶川地震有效受压主断层表面积 $A = 300 \text{ km} \times 30 \text{ km}$, $J_{\text{rock}} = 0.5 \sim 5.5 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 和 $\sigma_0 = 2.0 \times 10^{-14} \text{ S/m}$, 由式(1)和(6), 本文得到汶川地震前主断层面带电荷带电量 $Q_0 = (2.0 \sim 22) \times 10^6 \text{ C}$, 且垂直断层表面向上的电场强度 $E_{\text{air}} = (2.5 \sim 27) \times 10^7 \text{ V/m}$. 主破裂发生时断层表面带电量 and 电场强度分别为 $Q_0 = 1.8 \times 10^8 \text{ C}$ 和 $E_{\text{air}} = 2.2 \times 10^9 \text{ V/m}$, 该值大于空气电离所需电场强度值(近地表约为 $3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$). 在地-气界面, 该值足以使空气电离, 产生电荷和附加电场, 改变空气电导率.

设总电荷带电量渐近值为 Q_∞ , 当 Q 达到其渐近值即 $Q_\infty = Q_0$ 时, 输入到大气中的总电流 $I_{\text{air}} = AJ_{\text{air}}$ 应该等于从岩石中输出的电流 $I_{\text{rock}} = AJ_{\text{rock}}$, 因此 $dQ/dt = 0$. 此时, 断层面上输出电流强度 $I_{\text{rock}} = 4.5 \sim 50 \text{ kA}$, 而在主破裂发生时断层输出电流 I_{rock} 可高达 410 kA.

4 讨论与结论

受压岩石像一个发电机(“电池组”)产生电流沿主断裂传播, 并逐渐向周边地区扩散, 引起大范围地区电磁参数发生变化, 导致岩石表面-大气层-电离层耦合. 钱书清等(1996)的岩石压力实验也表明, 随着压力的不断增加, 电磁异常信息出现起伏变化, 在主破裂发生前和主破裂发生时电磁辐射会突然增强且强度最大, 但不同方位信号的强度不同. Freund等(2009)的实验结果也同样显示岩样破碎时会出现电流脉冲突然增强现象. 汶川 $M_s 8.0$ 地震动力来源推测是印度板块向北推挤与青藏高原中部巴颜喀拉地块的南东向运移在四川盆地西北侧受到华南地块强烈阻挡, 在龙门推覆构造带上弹性应变长期缓慢积累、增大, 并达到和超过先存逆断层面上摩擦滑动强度, 于 2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分产生突发性错动、释放的结果(徐锡伟, 2009). 这一应力积累是一个长期过程, 当应力积累到一定程度, 激发岩石空穴载荷子形成电流脉冲, 并产生附加电磁场. 随着应力调整和增强, 岩石形成微破裂至宏观破裂发育产生主破裂前, 这一阶段大量的正空穴载荷子沿主断裂产生, 并且逐渐向周边地区扩散, 引起电场、磁场、自然电位等电磁参数发生变化, 其异常范围超过 1000 km, 具体表现在 2008 年 4 月初, 高碑店台 NS 测向超低频电磁异常信息的增强. 郝锦绮等(2003)的岩石压力实验也表明, 岩石微破裂引起裂隙尖端处的电荷分离, 静电荷在局部区域的积累和运移, 导致自电位出现脉冲状变化; 而在主破裂阶段, 积累电荷的急速运动形成瞬间电流, 激发了脉冲式的磁场异常. 2008 年 5 月 9 日, 即主震前 3 天, 发震断层进入主破裂阶段, 强电流诱发电场向各个方向传播, 引起距震中 1440 km 的高碑店台 SN 和 EW 两测向电磁异常信息突然增强, 且出现异常信息释放高潮, 电场强度高达 1.3 mV/m . 同时导致 5 月 9 日全国大面积地磁观测垂直分量日变畸变和“低点位

移”现象. 若按此时汶川发震主断层受压岩石产生面电流密度为 $45.0 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 计算(当然, 地震时地震主断裂的应力触发电流密度可能取决于压力、压力梯度及其它因素), 则所产生的附加电场强度高达 $2.2 \times 10^9 \text{ V}/\text{m}$, 断层输出电流为 $4.1 \times 10^5 \text{ A}$. Bortnik 等(2010)利用地下偶极子产生的电磁场模型结合地面观测磁场资料, 经正反演计算得出, 2007 年 10 月 31 日美国加州圣荷西 Alum Rock $M_w 5.6$ 地震前, 地面观测到距震中 2 km 处频率为 1 Hz 的 30 nT 磁场强度所需震源区的地电流量级为 10—100 kA, 与本文结果具有可比性.

区域性电场强度的突然增强加速了周围空气分子的电离, 使近地面电荷集中, 容易引起空气分子电离. 空气电离增强空气的电导率, 促使电荷快速扩散至电离层高度, 引起高空电离层参数 TEC, f_oF_2 , N_i , N_e 等大范围扰动异常, 其异常幅度高达 60%. Kuo 等(2011)通过建立地-气耦合模型得到的模拟结果显示, 理论上震源区电流密度 $J_{\text{rock}} = 0.2$ — $10.0 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 时, 白天可引起的电离层 TEC 变化为 2%—25%; 同时, $J_{\text{rock}} = 0.01$ — $1.0 \mu\text{A}/\text{m}^2$ 时可引起夜间电离层 TEC 1%—30% 变化及等离子体泡现象. 野外钻孔岩石压裂应力观测表明, 水平主应力随深度增加而增大. 汶川 $M_s 8.0$ 地震震源深度为 19 km, 块体挤压产生的水平主应力可能大于本文使用的 14 MPa, 因此其产生的电场参数可能会远远大于本文计算结果. 那么, 汶川地震主断层表面带电量也会更大, 会引起更大的电离层扰动异常. 然而, 模型计算结果能否引起上述大范围地面观测电磁参数变化幅度, 以及通过地-气耦合理论引起的电离层参数变化是否与实际观测结果相吻合, 尚需进一步具体计算和验证.

如果认为岩石受压的“电池组”效应是从初次记录到的电磁异常信息开始, 那么这一过程最主要的标志是高碑店台在 2007 年 10 月 26 日记录到的超低频电磁异常信息. 到 2008 年 4 月初该异常信息增强且连续出现, 甚至到 4 月底, 这段时间并没有空间电离层参数异常的报道. 恰恰是 5 月 9 日, 即汶川 $M_s 8.0$ 地震前 3 天, 高碑店台 SN 和 EW 两测向电磁异常信息同时增强并达到高潮, 且全国大范围地磁日变畸变发生, 记录到高空电离层参数的大幅度突变异常. 这一发展过程, 一方面说明受压断层(“电池组”)状态发生了突变, 或者认为是存在“临界状态”, 作者认为是宏观破裂发育主破裂开始; 另一方面说明地面电磁场变化所引起的高空电离层异常存在“临界点”或者“阈值”, 只有地面电磁场突然增强且达到“阈值”才能通过大气层引起电离层参数异常, 反之, 当收发距达到 1000 km 或者更大时, 空间电磁场的传播受到电离层的影响, 且为相长干涉(李勇等, 2010; 李帝铨等, 2011; 付长民等, 2012). 这一交互过程, 称为岩石圈-大气层-电离层电磁耦合现象.

本文通过将汶川 $M_s 8.0$ 地震发震龙门山断裂带在巴颜喀拉地块的南东向运移并受华南地块强烈阻挡“双重”挤压作用等效为岩石受压模型, 来模拟和解释汶川地震前, 尤其是震前 3 天, 即 2008 年 5 月 9 日, 伴生大面积丰富电磁异常现象的原因. 根据岩石受压破裂的电子-空穴理论, 认为汶川地震发震主断层在推挤作用下, 强应力激发岩石空穴载荷子并导致断层表面正电荷快速积累, 结合 Freund 等(2009)实验室岩石压力产生电流的结果, 且将发震断层相关参数考虑在内, 推算得出面电流密度为 0.5 — $5.5 \mu\text{A}/\text{m}^2$. 根据岩石受压的电子-空穴理论模型, 计算得出发震主断层表面带电量为 $(2.0$ — $22) \times 10^6 \text{ C}$, 同时, 形成垂直地-气界面向上的附加电场强度为 $(2.5$ — $27) \times 10^7 \text{ V}/\text{m}$, 断层输出强电流为 4.5 — 50 kA ; 当主断层在强应力作用下致宏观破裂发育主破裂发生时, 面电流密度可达 $45.0 \mu\text{A}/\text{m}^2$, 面电荷带电量为 $1.8 \times 10^8 \text{ C}$, 断层输出电流为 $4.1 \times 10^5 \text{ A}$, 且电场强度可高达

$2.2 \times 10^9 \text{ V/m}$.

综上, 汶川地震发震主断层在两边挤压作用下, 大量的正空穴载荷子沿主断裂产生, 犹如一个“发电机”源源不断地输送“能量”. 特别是在主破裂阶段, 在“发电机”效应的驱动下, 震源区断层表面电荷快速积累, 并向四周扩散, 同时, 产生垂直地-气界面的强附加电场. 其一方面引起地面附近电磁观测参数大幅度突变异常, 并达到高潮; 另一方面加速震源区上空气体分子的电离, 空气电离增强空气的电导率, 促使电荷快速扩散至电离层高度, 引起高空电离层参数大范围短时突变异常并经空间地震监测卫星记录到.

参 考 文 献

- 安其美, 丁立丰, 王海忠, 赵仕广. 2004. 龙门山断裂带的性质与活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, **24**(2): 115–119.
- An Q M, Ding L F, Wang H Z, Zhao S G. 2004. Research of property and activity of Longmen mountain fault zone[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **24**(2): 115–119 (in Chinese).
- 程万正, 任越霞, 吴小平. 2010. 对汶川 8.0 级地震前四川地区地电地磁观测异常的分析与思考[J]. 四川地震, **30**(2): 1–9.
- Cheng W Z, Ren Y X, Wu X P. 2010. Analyzing the anomalies of geo-electrical and geo-magnetic observation data in Sichuan Province before the 2008 Wenchuan $M_8.0$ earthquake[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, **30**(2): 1–9 (in Chinese).
- 丁志峰, 武岩, 王辉, 周晓峰, 李桂银. 2008. 2008 年汶川地震震源区横波分裂的变化特征[J]. 中国科学: D 辑, **38**(12): 1600–1604.
- Ding Z F, Wu Y, Wang H, Zhou X F, Li G Y. 2008. Variations of shear wave splitting in the 2008 Wen-chuan earthquake[J]. *China in Science: Series D*, **51**(12): 1712–1716.
- 付长民, 底青云, 许诚, 王妙月. 2012. 电离层影响下不同类型源激发的电磁场特征[J]. 地球物理学报, **55**(12): 3958–3968. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.008.
- Fu C M, Di Q Y, Xu C, Wang M Y. 2012. Electromagnetic fields for different type sources with effect of the ionosphere [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(12): 3958–3968. doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.008 (in Chinese).
- 郝锦涛, 钱书清, 高金田, 周建国, 朱涛. 2003. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常[J]. 地震学报, **25**(1): 102–111.
- Hao J Q, Qian S Q, Gao J T, Zhou J G, Zhu T. 2003. ULF electric and magnetic anomalies accompanying the cracking of rock sample[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **16**(1): 113–123.
- 郝锦涛, 刘力强, 龙海丽, 马胜利, 郭子祺, 钱书清, 周建国. 2004. 双轴压力下岩样自电位变化实验的新结果[J]. 地球物理学报, **47**(3): 475–482.
- Hao J Q, Liu L Q, Long H L, Ma S L, Guo Z Q, Qian S Q, Zhou J G. 2004. New result of the experiment on self-potential change of rocks under biaxial compression[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **47**(3): 475–482 (in Chinese).
- 胡久常, 刘伟, 郭敏瑞, 郑华. 2009. 汶川 8.0 级特大地震前的地磁垂直分量日变“双低点”异常[J]. 地震学报, **31**(5): 589–593.
- Hu J C, Liu W, Guo M R, Zheng H. 2009. The “double low-points” anomaly of daily vertical component variation of geomagnetic field before the $M_8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(5): 589–593 (in Chinese).
- 李帝铨, 底青云, 王妙月. 2011. “地-电离层”模式有源电磁场一维正演[J]. 地球物理学报, **54**(9): 2375–2388. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.021.
- Li D Q, Di Q Y, Wang M Y. 2011. One-dimensional electromagnetic fields forward modeling for “earth-ionosphere” mode[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(9): 2375–2388. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.09.021 (in Chinese).
- 李美, 卢军. 2008. 地震电磁辐射前兆异常特征和异常指标关系研究[J]. 地震, **2**(4): 112–120.
- Li M, Lu J. 2008. Study on characteristics and index relation of electromagnetic precursory anomaly of earthquakes[J].

- Earthquake*, **2**(4): 112–120 (in Chinese).
- 李美, 卢军, 常媛, 刘秀. 2009. 汶川 8.0 级地震前高碑店和宁晋台超低频电磁辐射异常特征分析[J]. 国际地震动态, (7): 76–82.
- Li M, Lu J, Chang Y, Liu X. 2009. ULF electromagnetic anomaly observed at Gaobeidian and Ningjin seismic stations before Wenchuan 8.0 earthquake[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (7): 76–82 (in Chinese).
- 李勇, 林品荣, 郑采君, 石福升, 徐宝利, 郭鹏. 2010. 极低频电磁波技术电磁响应建模及电离层影响分析[J]. 物探与化探, **34**(3): 332–339.
- Li Y, Lin P R, Zheng C J, Shi F S, Xu B L, Guo P. 2010. The electromagnetic response modeling of the ELF method and the influence of the ionosphere[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, **34**(3): 332–339 (in Chinese).
- 钱书清, 任克新, 吕智. 1996. 伴随岩石破裂的 VLF, MF, HF 和 VHF 电磁辐射特性的实验研究[J]. 地震学报, **18**(3): 346–351.
- Qian S Q, Ren K X, Lü Z. 1996. Experimental study on VLF, MF, HF and VHF electromagnetic radiation characteristics with the rock breaking[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **18**(3): 346–351 (in Chinese).
- 王武星, 丁鉴海, 余素荣, 张永仙. 2009. 汶川 $M_s8.0$ 地震前地磁短临异常与强震预测探索[J]. 地震学报, **31**(2): 172–179.
- Wang W X, Ding J H, Yu S R, Zhang Y X. 2009. Short-term and imminent geomagnetic anomalies of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake and exploration of earthquake prediction[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(2): 172–179 (in Chinese).
- 解朝娣, 朱元清, Lei X L, 于海英, 虎雄林. 2010. $M_s8.0$ 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响[J]. 中国科学: 地球科学, **40**(6): 688–698.
- Xie Z D, Zhu Y Q, Lei X L, Yu H Y, Hu X L. 2010. Pattern of stress change and its effect on seismicity rate caused by $M_s8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *China Science: Earth Sciences*, **53**(9): 1260–1270.
- 徐锡伟. 2009. 5·12 汶川 8.0 级地震地表破裂图集[M]. 北京: 地震出版社: 17.
- Xu X W. 2009. *Album of 5·12 Wenchuan 8.0 Earthquake Surface Ruptures*, China[M]. Beijing: Seismological Press: 17 (in Chinese).
- 闫相相, 单新建, 曹晋滨, 汤吉, 王飞飞. 2012. 利用 GPS 和 DEMETER 数据分析汶川地震前电离层变化[J]. 地震地质, **34**(1): 160–171.
- Yan X X, Shan X J, Cao J B, Tang J, Wang F F. 2012. Seismoionospheric anomalies observed before Wenchuan earthquake using GPS and DEMETER data[J]. *Seismology and Geology*, **34**(1): 160–171 (in Chinese).
- 余涛, 毛田, 王云冈, 王劲松. 2009. 汶川特大地震前电离层主要参量变化[J]. 科学通报, **54**(4): 493–499.
- Yu T, Mao T, Wang Y G, Wang J S. 2009. Study of the ionospheric anomaly before the Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Science Bulletin*, **54**(6): 1086–1092.
- 曾中超, 张蓓, 方广有, 王东峰, 阴和俊. 2009. 利用 DEMETER 卫星数据分析汶川地震前的电离层异常[J]. 地球物理学报, **52**(1): 11–19.
- Zeng Z C, Zhang B, Fang G Y, Wang D F, Yin H J. 2009. The analysis of ionospheric variations before Wenchuan earthquake with DEMETER data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(1): 11–19 (in Chinese).
- 祝英英, 吴云, 林剑, 周义炎, 熊晶, 杨剑. 2009. 汶川地震前电离层 VTEC 的异常响应[J]. 地震学报, **31**(2): 180–187.
- Zhu F Y, Wu Y, Lin J, Zhou Y Y, Xiong J, Yang J. 2009. Anomalous response of ionospheric VTEC before the Wenchuan earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(2): 180–187 (in Chinese).
- 朱迎堂, 王绪本, 余年, 高树全, 李坤, 石岩峻. 2008. 龙门山大地电磁深部构造及汶川地震($M_s8.0$)[J]. 地质学报, **82**(12): 1769–1777.
- Zhu Y T, Wang X B, Yu N, Gao S Q, Li K, Shi Y J. 2008. Deep structure of magnetotelluric profile on Longmen Mts. and its relation to the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica*, **82**(12): 1769–1777 (in Chinese).
- Akhoondzadeh M, Parrot M, Saradjian M R. 2010. Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M>6.0$) using DEMETER and GPS data[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **10**(1): 7–18.

- Bortnik J, Bleier T E, Dunson C, Freund F. 2010. Estimating the seismotelluric current required for observable electromagnetic ground signals[J]. *Ann Geophys*, **28**(8): 1615–1624.
- Chavez O, Pérez-Enriquez R, Cruz-Abeyro J A, Millan-Almaraz J R, Kotsarenko A, Rojas E. 2011. Detection of electromagnetic anomalies of three earthquakes in Mexico with an improved statistical method[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(7): 2021–2027.
- Draganov A B, Inan U S, Taranenko Y N. 1991. ULF magnetic signatures at the earth surface due to ground water flow: A possible precursor to earthquakes[J]. *Geophys Res Lett*, **18**(6): 1127–1130.
- Eftaxias K, Balasis G, Contoyiannis Y, Papadimitriou C, Kalimeri M, Athanasopoulou L, Nikolopoulos S, Kopanas J, Antonopoulos G, Nomicos C. 2010. Unfolding the procedure of characterizing recorded ultralow frequency, kHz and MHz electromagnetic anomalies prior to the L’Aquila earthquake as pre-seismic ones: Part 2[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **10**(2): 275–294.
- Fraser-Smith A C, Bernardi A, McGill P R, Bowen M M, Ladd M E, Helliwell R A, Villard Jr O G. 1990. Low-frequency magnetic field measurements near the epicenter of the $M_s 7.1$ Loma Prieta earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **17**(9): 1465–1468.
- Freund F. 2000. Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks[J]. *J Geophys Res*, **105**(B5): 11001–11019.
- Freund F. 2002. Charge generation and propagation in igneous rocks[J]. *J Geodyn*, **33**(4/5): 543–570.
- Freund F, Sornette D. 2007. Electro-magnetic earthquake bursts and critical rupture of peroxy bond networks in rocks[J]. *Tectonophysics*, **431**(1/2/3/4): 33–47.
- Freund F T, Kulahci I G, Cyr G, Ling J, Winnick M, Tregloan-Reed J, Freund M M. 2009. Air ionization at rock surfaces and pre-earthquake signals[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, **71**(17/18): 1824–1834. doi:10.1016/j.jastp.2009.07.013.
- Freund F. 2010. Toward a unified solid state theory for pre-earthquake signals[J]. *Acta Geophys*, **58**(5): 719–766.
- Han P, Hattori K, Huang Q, Hirano T, Ishiguro Y, Yoshino C, Febriani F. 2011. Evaluation of ULF electromagnetic phenomena associated with the 2000 Izu Islands earthquake swarm by wavelet transform analysis[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(3): 965–970.
- Huang Q H. 2002. One possible generation mechanism of co-seismic electric signals[J]. *Proc Japan Acad*, **78**(7): 173–178.
- Kuo C L, Huba J D, Joyce G, Lee L C. 2011. Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges[J]. *J Geophys Res*, **116**(A10): A10317. doi:10.1029/2011JA016628.
- Li M, Lu J, Parrot M, Tan H, Chang Y, Zhang X, Wang Y. 2013. Review of unprecedented ULF electromagnetic anomalous emissions possibly related to the Wenchuan $M_s = 8.0$ earthquake, on 12 May 2008[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **13**(2): 279–286. doi:10.5194/nhess-13-279-2013.
- Liu J Y, Chen Y I, Chen C H, Liu C Y, Chen C Y, Nishihashi M, Li J Z, Xia Y Q, Oyama K I, Hattori K, Lin C H. 2009. Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake[J]. *J Geophys Res*, **114**(A4): A04320.
- Park S K, Johnston M J S, Madden T R, Morgan D F, 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.
- Prattes G, Schwingenschuh K, Eichelberger H U, Magnes W, Boudjada M, Stachel M, Vellante M, Villante U, Wertzger V, Nenovski P. 2011. Ultra low frequency (ULF) European multi station magnetic field analysis before and during the 2009 earthquake at L’Aquila regarding regional geotechnical information[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(7): 1959–1968.
- Riouselet J A, Pasko V P, Bourdon A. 2010. Air-density-dependent model for analysis of air heating associated with streamers, leaders, and transient luminous events[J]. *J Geophys Res*, **115**(A12): A12321. doi:10.1029/2010JA015918.

- Rycroft M J, Harrison R G, Nicoll K A, Mareev E A. 2008. An overview of Earth's global electric circuit and atmospheric conductivity[J]. *Space Sci Rev*, **137**(1/2/3/4): 83–105. doi:10.1007/s11214-008-9368-6.
- Sasaoka H, Yamanaka C, Ikeya M. 1998. Measurements of electric potential variation by piezoelectricity of granite[J]. *Geophys Res Lett*, **25**(12): 2225–2228.
- Simpson J J, Taflove A. 2005. Electrokinetic effect of the Loma Prieta earthquake calculated by an entire-Earth FDTD solution of Maxwell's equations[J]. *Geophys Res Lett*, **32**(9): L09302. doi:10.1029/2005GL022601.
- Stangl G, Boudjada M Y, Biagi P F, Krauss S, Maier A, Schwingenschuh K, Al-Haddad E, Parrot M, Voller W. 2011. Investigation of TEC and VLF space measurements associated to L'Aquila (Italy) earthquakes[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(4): 1019–1024.
- Tuck G J, Stacy F D, Starkey J. 1977. A search for the piezoelectric effect in quartz-bearing rocks[J]. *Tectonophysics*, **39**(4): T7–T11.
- Villante U, De Lauretis M, De Paulis C, Francia P, Piancatelli A, Pietropaolo E, Vellante M, Meloni A, Palangio P, Schwingenschuh K, Prattes G, Magnes W, Nenovski P. 2010. The 6 April 2009 earthquake at L'Aquila: A preliminary analysis of magnetic field measurements[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **10**(2): 203–214.
- Xu T, Hu Y, Wu J, Wu Z, Suo Y, Feng J. 2010a. Giant disturbance in the ionospheric F_2 region prior to the M8.0 Wenchuan earthquake on 12 May 2008 [J]. *Ann Geophys*, **28**(8): 1533–1538.
- Xu T, Hu Y L, Wu J, Wu Z S, Suo Y C, Feng J, Huang C J. 2010b. Abnormal perturbations in the ionospheric F_2 region before Wenchuan earthquake on 12 May 2008[J]. *Science China: Earth Science*, **53**(11): 1671–1674. doi:10.1007/s11430-010-4046-4.
- Xu T, Wu J, Zhao Z, Liu Y, He S, Li J, Wu Z, Hu Y. 2011. Brief communication “Monitoring ionospheric variations before earthquakes using the vertical and oblique sounding network over China”[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**(4): 1083–1089.
- Zhang X, Shen X, Liu J, Ouyang X, Qian J, Zhao S. 2009. Analysis of ionospheric plasma perturbations before Wenchuan earthquake[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **9**(4): 1259–1266.