

利用本溪自流井水温观测资料检测地球自由振荡^{*}

蒋翠荣¹, 任 佳¹, 陈华静², 王 松², 杨耀文³, 温 超⁴, 王长江¹

(1. 河北省地震局张家口中心台, 河北 张家口 075000 2. 中国地震局台网中心, 北京 100036

3. 云南省地震局丽江地震台, 云南 丽江 674100 4. 河北省地震局, 石家庄 050021)

摘要: 用本溪自流井数字化水温观测资料, 采用直接计算功率谱密度的方式对印尼苏门答腊 9.0 级大地震激发的球型自由振荡进行了提取, 准确检测到了 ${}_0S_2 \sim {}_0S_9$ 低频基型球型振荡, 并且还检测到了 2 个谐频球型振荡: ${}_1S_2$ 、 ${}_1S_3$ 。用该井数字化水温观测资料提取了 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ 共 3 个振型的分裂, 虽然 3 个振型均只得到 2 个单峰, 但地球自由振荡谱线分裂现象的检测为研究地球的深内部结构提供了新的、不同类型的观测资料。研究表明, 用本溪自流井数字化水温观测资料可以提取到苏门答腊大地震激发的地球球型振荡, 这就为地球自由振荡的研究提供了一种新的观测手段。

关键词: 水温; 苏门答腊 9.0 级大地震; 地球自由振荡; 球型振荡

中图分类号: P315.72⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)04-0313-05

0 引言

大地震的震动产生地震波, 其中体波直接通过地球传播, 而其他波则沿地球表面传播。面波从震源向各个方向射出, 由于地球是球体, 这些不同方向的波最终产生相互干涉, 这种干涉方式叫“自由振荡”。

地球自由振荡的理论研究至少可追溯到 18 世纪。Lamb (1882) 详细讨论了均匀球体的较简单的振型, 对应于现在通常称为球型振荡和环型振荡的两种振型。最早对地球自由振荡的准确观测是在 1960 年智利 $M_s 8.3$ ($M_w 9.5$) 地震后, 分别用 *Isabella* 应变仪 (Benioff et al 1961) 和 *La-Coste-Romberg* 重力仪 (Ness et al 1961) 实现的, 两套仪器的观测结果非常吻合并与理论值相当一致, 由此确认了长周期自由振荡的存在。至今, 用于观测地球自由振荡的仪器主要包括: 宽频带地震仪、基线应变仪、重力仪、水管倾斜仪、垂直摆倾斜仪和水位仪 (Benioff et al 1961; Alsop et al 1961; Bogert 1961; Dziewonski Gilbert 1973; Bolt Currie 1975; Zadro Brattenberg 1999; 万永革等, 2004, 2005; 任佳等, 2009a b)。2004 年 12 月 26 日苏门答腊大地震, 给人类造成了重大伤亡和损失, 但也为研究地球自由振

荡提供了难得的机会。Stein 和 Okal (2005a b)、万永革等 (2007)、雷湘鄂等 (2007)、邱泽华等 (2007)、任佳等 (2009a b) 分别对这次地震激发的地球自由振荡进行了研究, 但利用水温观测资料检测地球自由振荡的研究, 国内外还未见报道。本文利用数字化水温观测资料提取了这次地震激发的低频球型自由振荡。

1 观测井地质背景

本溪自流井井区处于阴山东西向构造带的东延与新华夏系第二巨型隆起带的交接部位, 属太子河凹陷带。北东向太子河断裂横贯全区, 该断裂带东南侧为古老地块组成的山地, 西北侧多为开阔的山间冲积平原或较开阔的河谷地区。自流井井口标高 173.34 m, 井深 1 213.46 m, 观测含水层地下水属裂隙承压水, 水质类型为硫酸钠型。井孔在 600 m 处穿过第一个热水层, 在 952 ~ 957 m 处穿过第二个含水层, 两个含水层中不同温度的水混合后流出地表时水温在 20℃左右 (孙小龙, 刘耀伟, 2007)。

2 资料处理

本溪自流井水温观测使用 SZW-1A 型数字式

^{*} 收稿日期: 2010-02-20

温度计, 该仪器是为地热前兆观测设计的专用石英温度计, 分辨率为 $0.0001\text{ }^{\circ}\text{C}$, 短期稳定性为 $0.0001\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$, 长期稳定性为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{年}$, 绝对精度为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该井长期的观测表明, 水温测量值在无震时能反映出明显的固体潮效应, 对远场大震也有同震响应 (孙小龙, 刘耀伟, 2007)。本文采用快速傅立叶变换 (FFT) (万永革等, 2007) 对 2006 年该井水温的小时观测值进行了频谱分析, 分析结果清楚地显示了日波动和半日波动, 并得到了 5 个主要的日潮汐波 Q_1 、 O_1 、 K_1 、 J_1 、 OO_1 和 3 个主要的半日潮汐波 N_2 、 M_2 、 S_2 (图 1)。这就表明本溪自流井水温能够对微小的应变 (如地球的潮汐变化) 产生响应, 也表明该台的观测条件和观测质量都比较好。笔者认为, 一般情况下, 能清晰记录到固体潮的仪器, 才有可能检测出地球自由振荡信息。

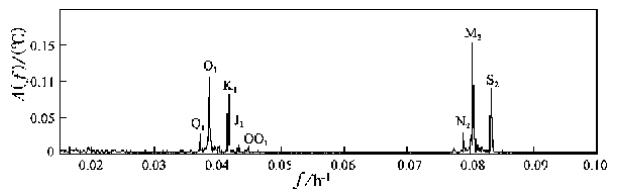


图 1 本溪自流井水温频谱分析
Fig 1 Analysis of Benxi artesian water temperature spectrum

图 2 是本溪自流井水温仪记录到的苏门答腊 9.0 级大地震的分钟值曲线, 此曲线没有经过任何消除干扰的处理。从图中可以明显地看到记录到的水温固体潮、水震波和震后效应。震后效应表现为水温阶升, 这主要是地震波作用下含水层渗透率增大造成的 (孙小龙, 刘耀伟, 2007)。我们提取了受地震影响明显的 5 天的资料, 分析采用的数据从地震发生后开始, 共 7 200 min

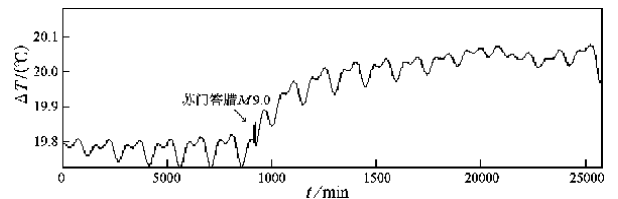


图 2 本溪自流井水温记录的苏门答腊大地震分钟值曲线
Fig 2 Benxi artesian water temperature in the record of the minutes curve of Sumatra earthquake

本研究采用通常的功率谱密度估计方法来提取地球球型自由振荡, 其定义为记录到的波形资料的自相关函数 R_n 的傅立叶变换 (万永革等, 2005), 即

$$S_k = \sum_{n=0}^{N-1} R_n e^{-\frac{2\pi i k n}{N}}, \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1.$$

(1)

其中, 自相关函数

$$R_n = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j x_{j+n} \quad n=-(N-2), -(N-1), \dots, -1, 0, 1, \dots, N-2, N-1.$$

(2)

式中, $N=7\ 200$ 为所用数据的数目, x 为本溪自流井记录的水温数据。 S_k 离散值为功率谱密度值。本文利用本溪自流井数字化水温观测资料, 采用直接计算功率谱密度的方式来提取球型振荡振型。为了消除数据不能无限长而必须加窗造成的对功率谱密度估计的影响, 本文采用 Hanning 窗来抑制旁瓣, 突出主瓣。

3 球型自由振荡的识别

按照上述的计算方法, 我们得到了本溪自流井水温数据的功率谱密度估计值 (PSD) (图 3), 图中垂直虚线表示地球初步参考模型 PREM 给出的在其顶点标出振型的自由振荡频率值。在 0.28~1.6 MHz 频段内可以清楚地检测到球型振荡的基型振荡 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ 、 ${}_0S_5$ 、 ${}_0S_6$ 、 ${}_0S_7$ 、 ${}_0S_8$ 、 ${}_0S_9$ 。同时, 我们还检测到了 2 个谐频球型振荡: ${}_1S_2$ 、 ${}_1S_3$ 。本研究只检测到低频段 (0.28~1.6 MHz) 的地球自由振荡信息, 中频和高频均未检测到。

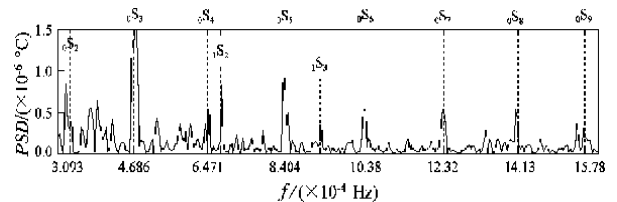


图 3 本溪自流井水温数据功率谱密度估计曲线
Fig 3 The estimated power spectral density curve of Benxi artesian water temperature data

通过图 3 绘制的功率谱, 我们得到了球型振荡 ${}_0S_2 \sim {}_0S_9$ 5 个振型的周期平均值 (表 1)。将观测

值和 PREM 模型理论值相比较，发现 5 个振型的观测周期和 PREM 模型理论周期的相对误差均集中在 0.2% 左右，这说明观测值和 PREM 模型的理论值是比较吻合的。

表 1 本溪自流井水温观测的地球球型振荡平均观测值、PREM 模型理论值及观测值与 PREM 模型理论值之差
Tab 1 An average of observed ball oscillations values of Benxi artesian water temperature PREM model theoretic value and the difference between the observed value and the theoretic value

振型	观测值 (平均)	理论值	观测值与 PREM 模型
	周期 /s	PREM 模型周期 /s	理论值之差
${}_0S_5$	1 192.73	1 189.91	2.82 (0.24%)
${}_0S_6$	964.32	963.21	1.11 (0.12%)
${}_0S_7$	813.01	811.69	1.32 (0.16%)
${}_0S_8$	709.22	707.71	1.51 (0.21%)
${}_0S_9$	634.52	633.71	0.81 (0.13%)

注：括号中的百分数表示相对误差

另外，我们还得到了 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ 振型的分裂谱 (图 4)。根据 Dahlen 和 Sailor (1979) 的研究结果，地球自由振荡振型分裂的频率可表示为：

$$\omega_h = \omega_0 (1 + a + mb + m^2c).$$

(3)

其中， ω_0 为地球自由振荡的简并本征频率，本研究采用 PREM 模型给出的特定振型的理论计算值 (Dziewonski Anderson 1981)； ω_h 为受地球自转

和椭率扰动的自由振荡分裂谱线频率； m 为分裂振型序号。自由振荡谱线分裂参数包括 a b c 其中 a 为中心谱线漂移参数， b 为自转引起的谱线分裂参数， c 为谱线分裂的不对称因子，主要由地球椭率引起。本研究采用 Dahlen 和 Sailor (1979) 总结出各种振型的分裂参数。

图 4 为振型分裂观测值与运用 PREM 模型得到的分裂谱峰位置的比较，图中垂直虚线表示根据 PREM 模型计算振型分裂的自由振荡频率值。对于 ${}_0S_2$ 有 2 个峰值分别对应于 m_{-2} 和 m_1 ，对于 ${}_0S_3$ 有 2 个峰值分别对应于 m_{-2} 和 m_2 ，对于 ${}_0S_4$ 有 2 个峰值分别对应于 m_{-3} 和 m_3 。

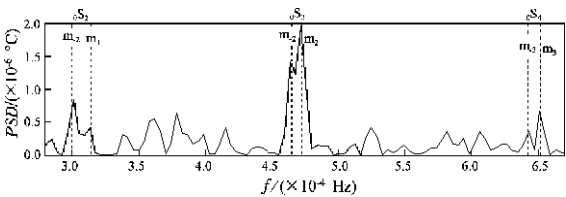


图 4 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ 振型的分裂谱
Fig 4 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ mode split spectrum

通过图 4 绘制的分裂谱，我们得到了 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ 3 个振型的分裂谱线周期平均值 (表 2)。将观测值和 PREM 模型理论值相比较，发现 3 个振型的分裂谱线周期和 PREM 模型理论周期的相对误差均小于 0.3%，这说明观测值和 PREM 模型的理论值是比较吻合的。

表 2 本溪自流井水温检测到的 3 个振型谱线分裂观测值与 PREM 理论值
Tab 2 The three modal split observational values detected by Benxi artesian water temperature and PREM theoretical value

项目	${}_0S_2$ 周期 /s		${}_0S_3$ 周期 /s		${}_0S_4$ 周期 /s	
	m_{-2}	m_1	m_{-2}	m_2	m_{-3}	m_3
观测值	3 326.68	3 188.78	2 154.24	2 116.85	1 554.24	1 535.39
PREM	3 334.83	3 185.28	2 153.94	2 114.49	1 554.11	1 537.10
差值	-8.15	3.50	0.30	2.36	0.13	-1.71
相对误差 (%)	0.24	0.11	0.014	0.11	0.008	0.11

4 结论和讨论

(1) 我们用数字化水温观测资料对印尼苏门答腊 9.0 级大地震激发的球型自由振荡进行了提取，准确检测到了 ${}_0S_2 \sim {}_0S_9$ 低频基型球型振荡，还检测到了 2 个谐频球型振荡： ${}_1S_2$ 、 ${}_1S_3$ 。这既反映了本溪自流井数字化水温仪器运行状态良好，也表

明本文的研究是成功的。这种研究不仅能有效地发挥观测仪器的潜能，也提高了观测资料的利用率。本研究为地球自由振荡的研究提供了一种新的观测手段。

(2) 对于封闭良好的承压含水层来说，井一含水层系统相当于高灵敏度的体应变仪 (张昭栋等，1988—2000)。本溪自流井水温观测资料能记录到水温固体潮、水震波、震后水温阶升和自由

振荡现象。笔者认为,这种水温微动态的形成机制,不是深部热物质的直接上涌或热的传导引起的,而很可能是引起井水温度变化的水动力学机制起主导作用,即由于地壳的应力应变状态的变化,首先引起含水层岩体变形及相应的孔隙压力的变化并导致井—含水层系统水动力条件(水力梯度)的改变和水流状况(流速、流量等)的改变,然后由于水流量所携带着的井孔内热量变化引发井水温度改变造成的(鱼金子等,1997)。

(3) Rosat等(2005)针对苏门答腊地震分析了11个台站的超导重力仪资料,发现 ${}_0S_2$ 和 ${}_0S_3$ 清楚地分裂为5个和7个单峰,并首次在没有数据叠加的情况下观测到 ${}_2S_1$ 振型及其由于地球自转导致的频谱分裂。我们用本溪自流井数字化水温观测资料提取了 ${}_0S_2$ 、 ${}_0S_3$ 、 ${}_0S_4$ 等3个振型的分裂,虽然3个振型均只得到2个单峰,但地球自由振荡谱线分裂现象的检测为研究地球的深内部结构提供了新资料(He Tromp 1996, Masters 1981)。通常认为 ${}_0S_2$ 和 ${}_0S_3$ 振型的穿透深度达到内核,其中 ${}_0S_2$ 的穿透深度接近地心, ${}_0S_3$ 则刚刚进入内核(雷湘鄂等,2004)。因此对这些振型的分裂进行研究有望揭示地球内核的结构信息。

(4) 本文作为初步研究,只得到了低频段的地球自由振荡振型,中频段和高频段自由振荡振型被淹没在背景噪声中,不易分辨。如何利用数字化水温观测资料检测更多的自由振荡振型是我们下一步研究的目标。另外,如何用这种观测资料来检验水温观测的频响特性,也需要进一步研究。

致谢: 本文 PREM 模型数据由万永革老师提供,所用水温数据由中国地震局台网中心周克昌老师提供,在此一并致谢。

参考文献:

雷湘鄂,孙和平,许厚泽,等. 2007. 苏门答腊地震激发的地球自由振荡及其谱线分裂的检测与讨论[J]. 中国科学(D辑), 37(4): 504—511.

雷湘鄂,许厚泽,孙和平. 2004. 由5个国际超导重力仪台站资料检测到的秘鲁8.2级大地震所激发的球型自由振荡现象[J]. 中国科学(D辑), 34(5): 483—491.

邱泽华,马瑾,池顺良,等. 2007. 钻孔差应变仪观测的苏门答腊大地震激发的地球环型自由振荡[J]. 地球物理学报, 50(3): 797—805.

任佳,陈华静,蒋翠荣,等. 2009 a 数字化水位仪观测的苏门答腊大地震激发的地球球型自由振荡[J]. 地震研究, 32(4): 333

—338.

任佳,陈华静,王松,等. 2009 b 汶川大地震激发的地球球型自由振荡[J]. 中国地震, 25(1): 73—80.

孙小龙,刘耀炜. 2007. 本溪自流井水位与水温同震变化关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 27(6): 100—104.

万永革,盛书中,周公威. 2007. 中国数字地震台网记录的苏门答腊—安达曼地震激发的地球球型自由振荡的检测[J]. 地震学报, 29(4): 369—381.

万永革,周公威,郭燕平. 2004. 昆仑山口西地震激发的地球环型振荡[J]. 防灾减灾工程学报, 24(1): 1—7.

万永革,周公威,郭燕平. 2005. 中国数字地震台网记录的昆仑山口西地震的球型自由振荡[J]. 地震, 25(1): 31—40.

万永革. 2007. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 北京: 科学出版社.

鱼金子,车用太,刘五洲. 1997. 井水温度微动态形成的水动力学机制研究[J]. 地震, 17(4): 389—396.

张昭栋,迟镇乐,陈会民,等. 2000. 井水位的振荡与地震波[J]. 地震研究, 23(4): 418—425.

张昭栋,郑金涵,冯初刚. 1988. 一种估算地震引起应力场调整的新方法[J]. 地震, 8(3): 19—27.

Alsop L E, Sutton G H, Ewing M. 1961. Free oscillation of Earth observed on strain and pendulum seismographs[J]. J. Geophys. Res. 66(2): 631—641.

Benioff H, Press F, Smith S. 1961. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes[J]. J. Geophys. Res. 66(2): 605—619.

Bogert B P. 1961. An observation of free oscillations of the Earth[J]. J. Geophys. Res. 66(2): 643—646.

Bolt B A, Currie R G. 1975. Maximum entropy estimates of Earth torsional eigenperiods from 1960 trieste data[J]. Geophys. J. R. astr. Soc. 40: 107—114.

Dahlen F A, Sailor R V. 1979. Rotational and elliptical splitting of the free oscillations of the earth[J]. Geophys. J. R. astr. Soc. 58: 609—623.

Dziewonski A M, Anderson D L. 1981. Preliminary reference Earth model (PREM)[J]. Phys. Earth Planet. Interi. 25: 297—356.

Dziewonski A M, Gilbert F. 1972. Observation of normal modes from 84 recordings of the Alaskan earthquakes of 1964 March 28[J]. Geophys. J. R. astr. Soc. 27: 393—446.

He X, Tromp J. 1996. Normal mode constraints on the structure of the Earth[J]. J. Geophys. Res. 110(B9): 20053—20082.

Lamb H. 1882. On the variations of an elastic sphere[J]. Lond. Math. Soc. Proc. 13: 233—256.

Masters G. 1981. Gilbert F. Structure of the inner core inferred from observations of its spheroidal shear modes[J]. Geophys. Res. Lett. (8): 569—571.

Ness N R, Harrison C T, Slichter L B. 1961. Observation of the free oscillation of the earth[J]. J. Geophys. Res. 66: 621—629.

Rosat S, Sabo T, Inanishi Y, et al. 2005. High-resolution analysis of the gravest seismic normal modes after the 2004 $M_w = 9$ Sumatra earthquake using superconducting gravimeter data[J]. Geophys. Res. Lett. 32: L133304. doi: 10.1029/2005GL022128.

Stein S, Okal A. 2005 a. Speed and size of the Sumatra earthquake[J]. Nature. 434: 581—582.

Stein S Okal E A. 2005b. The 2004 Sumatra earthquake and India ocean tsunami: What happened and why? J. The Earth's Scientist XXXI (2): 6—11.

Zadro M Bratzenberg C. 1999. Measurements and interpretations of tilt strain gauges in seismically active areas J. Earth Science Reviews 47: 151—187.

Detecting the free oscillations of the earth in the use of the observed data of Benxi artesian water temperature

JIANG Cui-rong¹, Ren Jia¹, CHENG Hua-jing², WANG Song²,
YANG Yao-wen³, WEN Chao⁴, Wang Chang-jiang¹

(1. Zhangjiakou Central Seismic Station Earthquake Administration of Hebei Province Zhangjiakou 075000 Hebei China)

(2. China Seismological Bureau Center Beijing 100036 China)

(3. Lijiang Seismic Station Earthquake Administration of Yunnan Province Lijiang 674100 Yunnan China)

(4. Earthquake Administration of Hebei Province Shijiazhuang 050024 Hebei China)

Abstract

In the first time of using digital observation data of Benxi artesian water temperature as well as using direct calculation of power spectral density to extract the ball free oscillations prompted by the 9.0 Sumatra earthquake and accurately detected ${}_0S_2 \sim {}_0S_4$ low-frequency base-type oscillations and two-frequency spherical harmonic oscillator ${}_1S_2, {}_1S_3$. By using the temperature observations for the first time we successfully extracted 3 mode split ${}_0S_2, {}_0S_3, {}_0S_4$. Although only two single peaks were received by the three mode shapes but the phenomenon of the Earth's free oscillations spectrum of split testing provides a new and different types of observational data to the study of internal structure of the Earth. Studies have shown that digital observation data of Benxi artesian water temperature is indeed to extract the the ball free oscillations prompted by the 9.0 Sumatra earthquake which prompted a new observational tool for the Earth's free oscillations study.

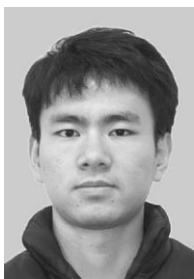
Key words: water temperature; Sumatra M9.0 earthquake; the Earth's free oscillations; the ball-type oscillation



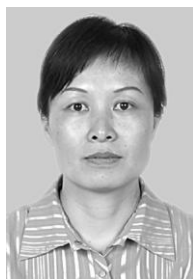
徐桂明 江苏省地震局高级工程师。毕业于河海大学水文地质与工程地质专业，获学士学位。主要从事地震流体预报地震工作。中国地震学会地震流体专业委员会委员。



刘锦 广东省地震局工程师。1991年毕业于防灾技术学院应用地球物理系，获大专学历；2004年毕业于华南理工大学工商管理系，获管理学学士学位。主要从事地下流体分析预报等研究。



阮祥 四川省地震局预报研究所助理工程师。2004年云南大学固体地球物理专业毕业，获理学学士学位；2007年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业毕业，获理学硕士学位。目前从事地震学与地震预报方面的研究。



杨晶琼 云南省地震局高级工程师。1990年毕业于云南师范大学地理系，获理学学士学位。主要从事地震分析编目与数字地震资料应用研究工作。



蒋翠荣 河北省地震局张家口中心台工程师。1985年毕业于河北电大。现主要从事地震台站监测工作。



王建军 甘肃省地震局工程师。1996年毕业于防灾科技学院地球物理系；2008年兰州地震研究所固体地球物理专业毕业，获硕士学位。曾参与开发中国地震前兆数据处理系统、中国地震前兆数据管理系统，现主要从事地震监测、软件开发、地磁基本场研究等方面的工作。



郭婷婷 山东省地震局助理研究员。2004年毕业于西北农林科技大学水利与建筑工程学院，获硕士学位；现就读于中国地震局地质研究所攻读博士学位。主要从事构造应力场分析及其相关数值模拟等工作。



马文娟 宁夏地震局工程师。1999年毕业于宁夏大学数学系软件工程专业，获理学学士学位；现为同济大学在读硕士研究生。主要从事前兆观测技术、数据处理、数据库开发利用等研究。2009年中国地震局地壳应力研究所交流访问学者。



单维锋 防灾科技学院讲师。1998年毕业于山东大学威海分校计算机应用专业；2005年毕业于云南大学软件工程专业，获硕士学位；现于北京工业大学计算机学院攻读博士学位。主要从事地震前兆数据处理、并行计算等方面研究工作。ACM专业会员，新加坡国际计算机科学与技术协会（IACSIT）会员。

注：钱晓东、张希、苏琴、张昱、刘强、施伟华、吴立辛、曾宪伟、何案华、周光全的简历分别刊登在本刊 Vol 29 No 1; Vol 30 No 3 Vol 32 No 2 Vol 31, No 3; Vol 30 No 4 Vol 30 No 4 Vol 30 No 1; Vol 31 No 2 Vol 31, No 3 Vol 29 No 4