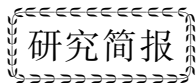


文章编号: 0253-3782(2004)02-0223-05



华东地区地电阻率各向异性度的地震 前兆异常特征初步研究^{*}

冯志生¹⁾ 杨建军²⁾ 梅卫萍¹⁾ 耿 杰³⁾
汪雪泉⁴⁾ 刘义高⁴⁾

- 1) 中国南京 210014 江苏省地震局
2) 中国南京 210008 南京市地震局
3) 中国济南 250014 山东省地震局
4) 中国合肥 230031 安徽省地震局

关键词 地电阻率各向异性度 地震异常 富氏拟合 走时曲线

中图分类号: P315.72⁺2 文献标识码: A

毛桐恩等(1995, 1998)在研究唐山等大地震孕育过程中地电阻率各向异性的变化时,取地电阻率各向异性度

$$S = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_{NS}}{\rho_{EW}} \right)_i - 1 \right| \times 10^3 \quad n = 6 \quad (1)$$

式中, ρ_{NS} 与 ρ_{EW} 为地电阻率月均值, S 为半年值. 式(1)表明, 如果 $\rho_{NS} = \rho_{EW}$, 则 $S = 0$, 介质电性为各向同性; 若 $\rho_{NS} \neq \rho_{EW}$, 则 $S \neq 0$, 介质电性为各向异性; S 值上升, 介质的电性各向异性增强. 由于式(1)右边取了绝对值, 而 $\rho_{NS} > \rho_{EW}$ 和 $\rho_{NS} < \rho_{EW}$ 的可能性因台站不同而有可能不同, 因此 S 值的上升与下降不能反映 ρ_{NS} 与 ρ_{EW} 之间大小的相对变化. 冯志生和王建宇(2000)取

$$S = \left(\frac{\rho_{NS}}{\rho_{EW}} - 1 \right) \times 10^3 \quad (2)$$

式中, ρ_{NS} 与 ρ_{EW} 可为各种形式的观测值或均值. 如果 ρ_{NS} 与 ρ_{EW} 的观测值相等, $S = 0$, 介质电性为各向同性; 若 ρ_{NS} 与 ρ_{EW} 的观测值不相等, $S \neq 0$, 介质电性为各向异性, S 值偏离 0 越大(包括负值), 介质的电性各向异性度越大. 与式(1)不同的是, 式(2) S 值的上升与下降与 ρ_{NS} 相对于 ρ_{EW} 大小的相对变化是一致的, 而且式(2)对于应用地电阻率各向异性进一步解释孕震应力方向的变化过程可能更有利.

1 资料的处理

1980 年以来, 华东地区(115°~125°E, 29°~37°N)共发生 9 次 $M_s \geq 5.0$ 地震(不计 1984 年 5 月 21 日 $M_s 6.2$ 地震的一次 $M_s 5.3$ 前震), 其中 3 次为 6 级左右地震. 9 次地震中, 有 7 次地震发生在江苏东部沿海和南黄海海域, 另外两次是 1983 年山东菏泽 $M_s 5.9$ 和 1995 年苍山 $M_s 5.3$ 地震, 地震活动区域分布特征明显. 图 1 为地震分布及华东地区地电台站分布图, 表 1 为地震参数及震中距.

本文首先对华东地区 6 个地电台的地电阻率日均值资料应用公式(2)进行了 S 值计算处理. 由于海安台测线布置非正南北和正东西方向, 故计算时海安台取 $\rho_{N30^\circ W} / \rho_{N60^\circ E}$. 计算中还发现海安台和新沂台各有

^{*} 国家“十五”科技攻关项目(200104BA601B01-04-02)资助.

2002-09-09 收到初稿, 2003-09-08 收到修改稿, 2003-11-04 决定采用.

表 1 1980 年以来华东地区 $M_s \geq 5.0$ 地震参数及震中距

序号	发震日期 年-月-日	M_s	震中位置		震中距/km						Δ_{\max} /km
			φ_N	λ_E	昌邑	郯城	新沂	南京	海安	江宁	
1	1983-11-07	5.9	35°16′	115°17′	410	295	300	487	563	507	531
2	1984-05-21	6.2	32°29′	121°36′	526	382	367	263	107	272	612
3	1987-02-17	5.0	33°35′	120°32′	378	228	217	232	110	254	261
4	1990-02-10	5.1	31°41′	121°00′	593	411	387	207	114	206	279
5	1992-01-23	5.3	35°12′	121°04′	237	245	259	406	294	431	321
6	1994-07-26	5.3	35°02′	124°23′	492	543	551	611	452	629	321
7	1995-09-20	5.3	34°58′	118°06′	240	44	69	332	342	359	321
8	1996-11-09	6.1	31°50′	123°06′	653	537	523	402	262	404	570
9	1997-07-28	5.1	33°43′	122°10′	430	359	355	361	201	378	279

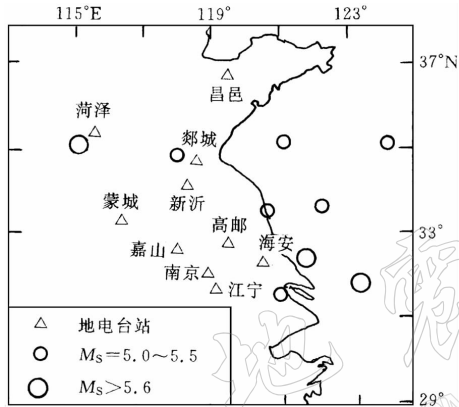


图 1 华东地区 1980 年 1 月~2001 年 12 月
地震及地电台站分布

2 次突变或阶跃,文中采用阶跃前后各一个月均值的差减阶跃后的所有数据对其进行了处理.对 31 日滑动平均后的 S 值逐日变化曲线分析发现, S 值有年变化或短周期变化,异常特征不十分明显.为此,对其再进行富氏拟合滤波处理,拟合阶数视各台站数据长短而增减,以滤去两年以内周期成份为准,拟合后的结果绘于图 2,各台站的实际拟合阶数见图 2.其中新沂、海安台的资料时间段为 1980~2001 年,昌邑台为 1982~2000 年,郯城台为 1982~2001 年.因近年台站搬迁,南京台和江宁台资料时间段为 1980~1995 年.

2 异常特征分析

2.1 S 值异常影响范围的确定

按地电阻率异常最大影响范围 Δ_{\max} 的研究统计结果 (Zhao, Qian, 1994; 国家地震局预测预防司, 1998; 钱家栋等, 1985)讨论图 2 中的 S 值变化与地震关系时发现 Δ_{\max} 普遍偏小,仅有 1995 年 9 月 20 日山东苍山 $M_s=5.3$ 地震与郯城台及新沂台的 S 值变化相对应;以及 1984 年 5 月 21 日南黄海海域 $M_s=6.2$ 地震与海安台的 S 值变化相对应.研究发现按

$$\Delta_{\max} = 3 \times 10^{[(1.05M+1.34)/3.4]} \tag{3}$$

的计算结果讨论 S 值的变化与地震关系更为合理,表 1 给出了有关地震的 Δ_{\max} .公式(3)结果比地电阻率异常最大影响范围大 3 倍多,按公式(3)本文中 5 级以上地震之前都有 S 值异常变化.异常最大影响范围增加的原因,可能与各向异性度这种算法具有降低仪器和环境干扰作用有关,因为如果仪器和环境在两个方向引起的干扰形态相似并且同步,则这种降低干扰的作用是显而易见的.

2.2 S 值异常形态特征及 S 值峰值出现(转折)时间与震中距的关系分析

由图 2 我们可以初步看出, S 值异常形态特征可以描述为先上升后下降的正脉冲型异常形态(图 3 中的阴影部分),并且一般叠加在上升或下降趋势背景上(去倾后为正脉冲型变化),地震似乎在 S 值正脉冲型异常形态变化过程中都有可能发生.

为了描述的方便,我们将正脉冲型异常的极大值称为峰值,峰值附近的变化过程称为转折期,同时对图 2 中各正脉冲型变化进行编号,并将几次地震的异常按震中距排列成图 3.图 3 中各变化的编号与图 2 中各台站的编号是一一对应关系,图 3 中的实倒三角是 S 值正脉冲型变化峰值出现点.由图 3 我们可以看出, S 值峰值出现时间有随震中距增大而推迟的现象,其中,图 3a 和 b 中的异常变化未受到其它异常

叠加的干扰, 异常的正脉冲型变化形态较完整. 由于震中距跨度大, S 值峰值出现时间随震中距推迟的现象明显, 并且对于震中距较小的郯城和海安台, 地震发生在 S 值峰值之后的下降过程中或异常结束后.

如果不考虑 1983 年 11 月 7 日山东菏泽 $M_s5.9$ 地震对南京台的微弱影响(震中距 $\Delta=487$ km, 仅比 Δ_{\max} 小 8 km), 1984 年 5 月 21 日南黄海 $M_s6.1$ 地震在海安、江宁和南京台的异常也有这种现象(图 3c).

即使是有异常叠加时有时也能看出这种现象. 1983 年 11 月 7 日山东菏泽 $M_s5.9$ 地震和 1984 年 5 月 21 日南黄海 $M_s6.1$ 地震分别位于昌邑、郯城

和新沂台的两侧, 其震级相近, 发震时间相隔不足半年. 震级较大, 可以认为这两次地震在上述 3 个台站的异常叠加在一起. 由于昌邑台震中距较郯城和新沂台的震中距大 100 多千米, 由图 3d 可以看出昌邑台峰值出现时间较郯城台或新沂台晚. 由于郯城台与新沂台的距离较近, 在图 3d 中区分它们的峰值出现时间先后较困难. 事实上, 由于还受到 1981 年 11 月 19 日河北宁晋 $M_s5.8$ 地震($37^{\circ}24'N$, $114^{\circ}54'E$, 震中距 $\Delta=438$ km, $\Delta_{\max}=459$ km)影响, 郯城台异常形态很不规则, 因为共有 3 次地震的异常叠加在此段变化上.

另一方面, 图 3d 中新沂台在 1980~1982 年也有一个正脉冲型变化形态, 这一变化可能是 1979 年 7 月 9 日溧阳 $M_s6.0$ 地震($31^{\circ}27'N$, $119^{\circ}15'E$)异常. 该地震距江宁、南京和海安台较近, 其正脉冲型变化形态在这 3 个台站出现时间应该较新沂台早, 由于 1980 年之前这 3 个台站尚未开始观测, 故其异常形态不完整.

图 3e 给出了 1987 年 2 月 17 日射阳 $M_s5.0$ 地震的几个台站变化曲线. 由于该地震到这些台站的震中距较接近, 图中推迟现象不明显. 我们注意到这些台站的空间位置成弧形分布, 这次地震的震中位于弧形的内侧, 利用类似于地震波走时概念很容易解释这一现象. 图 3f 也存在类似关系.

由于 1996 年之后江宁和南京台缺资料, 按式(3), 海安、新沂和郯城台应记录到 1996 年 11 月 9 日南黄海 $M_s6.1$ 地震的异常变化(图 2 中海安和新沂台的⑥号变化), 但海安台的变化受到 1997 年 7 月 28 日南黄海 $M_s5.1$ 地震的影响(震中距 $\Delta=201$ km, $\Delta_{\max}=279$ km). 对于 1994 年 7 月 26 日的南黄海 $M_s5.3$ 地震, 区内基本没有台站满足震中距 $\Delta<\Delta_{\max}$ 的要求, 由图 2 似乎也看不出它们有异常.

图 2 中除南京台④号变化不完整未进行解释外, 仅有昌邑台①和③、郯城台⑤、海安台④及江宁台①、⑤和⑥异常变化无法用上述方法给予解释, 约占总异常变化(32 个)的 22%, 其中南京台④和江宁台⑥异常变化, 可能与 1996 年 11 月 9 日南黄海 $M_s6.1$ 地震有关, 可惜两个台站 1996 年 1 月之后缺资料.

由此我们得到这样的结论: 在时间上, 从地震孕育初期到发震, 在震源区 S 值的变化完成了一个完整的正脉冲型异常形态, 当正脉冲型异常形态完成或接近完成时地震发生; 在空间上, 从地震孕育初期到发震, S 值的正脉冲型异常形态从震源区向外传播或迁移, 这种传播类似于地震波. 地震发生后, 距离震中近的台站 S 值正脉冲型异常形态变化已经完成或接近完成, 地震有可能发生在这些台站 S 值正脉冲型异常形态从峰值转折之后的下降阶段; 而对于距离震中远的台站, S 值正脉冲型异常形态变化可能才刚刚开始, 地震有可能发生在这些台站 S 值正脉冲型异常形态的上升阶段. 对于这些台站, 地震之后的 S 值正脉冲型异常是震源区“迟到的信使”. 这一结论可用图 4 模型形象化说明, 图中的阴影部分表示地震发

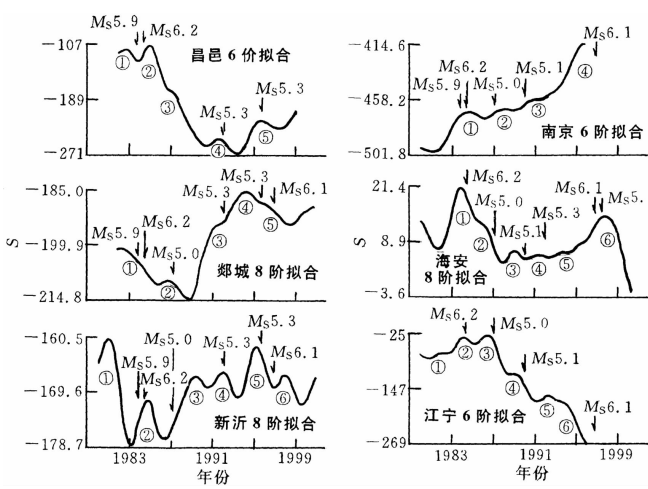


图 2 地电阻率各向异性逐日变化曲线与地震
(经 31 日滑动平均及富氏拟合处理)

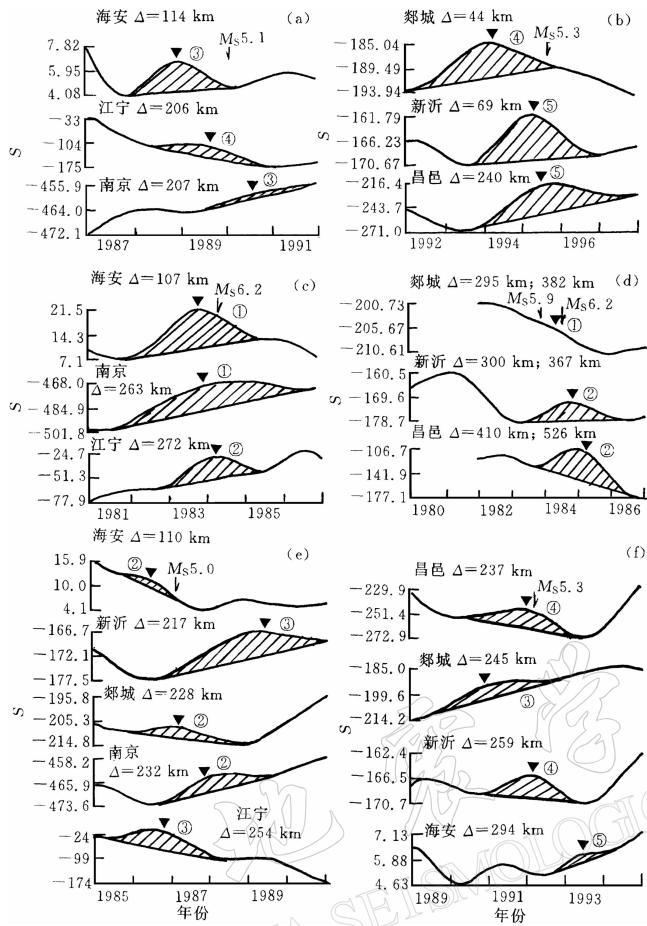


图 3 地电阻率各向异性 S 值极大值转折点随震中距变化震例。图中▼表示极大值点
(a) 1990 年 2 月 10 日常熟地震; (b) 1995 年 9 月 25 日苍山地震; (c) 1984 年 5 月 21 日南黄海地震;
(d) 1983 年 11 月份日菏泽地震和 1984 年 5 月 21 日南黄海地震; (e) 1987 年 2 月 17 日射阳地震;
(f) 1992 年 1 月 23 日南黄海地震

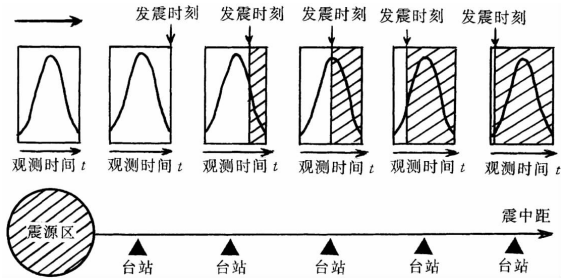


图 4 地电阻率各向异性度正脉冲型异常
由震中区向外传播模型

生时这些图象还未出现。根据这一结果, 我们不能简单地将 S 值的峰值点作为地震将要发生的短期和临震标志。

由图 3 还可以大致看出, S 值的正脉冲型变化形态的周期大约为两年左右, 它应该与震级有关, 但由于震例较少, 且两年以内的周期成份已被富氏拟合滤去, 故本文无法给出它们的定量关系。

2.3 S 值正脉冲型异常峰传播速度的初步估计

利用图 2 中约 20 个正脉冲型异常形态较好, 且未受到其它异常叠加干扰的峰值出现时间, 按

$$\Delta = V(t - t_0) + b \quad (4)$$

进行最小二乘拟合, 拟合结果为 $V = 9.97 \text{ km/月}$, $b = 239.4 \text{ km}$, 相关系数 $r = 0.75$, 残差 $D = 74.65 \text{ km}$ 。图 5 给出了拟合的结果。其中, t_0 为震发时间, t 为峰值时间, $t - t_0$ 的单位为月; Δ 为震中距, 单位为 km; V 为正脉冲型异常峰的传播速度, 单位 km/月。公式 (4) 是正脉冲型异常峰的走时曲线。

宋治平等(1996)发现, 长期、中短期及短临前兆异常分别以 10 km/a、100 km/a 和 1 000 km/a 的速率由外向震中区迁移, 地电阻率各向异性正脉冲型异常为中短期前兆异常, 其异常的迁移速率与他们的结果相当。值

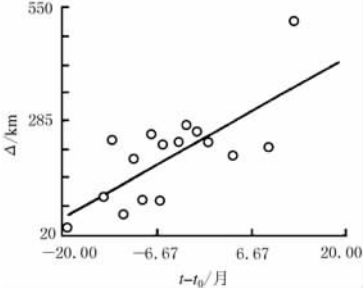


图 5 S 值正脉冲型异常
峰值走时曲线

得注意的是,与地电阻率长趋势前兆峰迁移方向一样,S 值正脉冲型异常峰的迁移方向与他们的研究结果相反。

3 讨论和结论

1) 同震级的地电阻率各向异性度异常的最大影响范围比地电阻率一般异常的大 3 倍,异常最大影响范围增加的原因可能与地电阻率各向异性度的算法具有降低仪器和环境干扰的作用有关。

2) 在地震孕育过程中,孕震区一定范围内的地电阻率各向异性度 S 值会出现正脉冲型异常变化,S 值正脉冲型异常形态由震中区向外迁移传播,异常峰的传播速率约为 $v=9.97 \text{ km/月}$ 。根据 APE 理论(阮爱国,李清河,1999;阮爱国等,2000),相应方向上的附加压应力差可能也有类似的形态由震中向外围传播,这意味着在地震孕育过程中,有一个长周期的脉冲型应变波或应力波由震中向外传播,其传播速率与 S 值异常峰的传播速率一致。

4) 如果异常台站数量和台站空间分布适合,则可以应用正脉冲型异常峰的走时曲线推测未来震中和发震时间。由于地电阻率各向异性度对干扰具有抑制作用,同量级地震异常的最大影响距离较之地电阻率异常大幅提高,尤其是 $M_s > 5.0$ 地震都有较好的异常反应,其正脉冲型异常形态单一、标准,它对地震预报更具有实际意义。

参 考 文 献

- 冯志生,王建宇. 2000. 海安台地电阻率各向异性变化与地震[J]. 地震学刊, **20**(4): 39~42
- 国家地震局预测预防司. 1998. 地震预报系列教材——电磁学分析预报方法[M]. 北京:地震出版社, 91~92
- 毛桐恩,王铁成,姚家榴,等. 1995. 唐山地震地电阻率各向异性变化特征研究[J]. 地震学报, **17**(4): 505~511
- 毛桐恩,陈大元,刘新美,等. 1998. 承载岩石地电阻率各向异性变化的实验研究与现场观测结果[J]. 地震, **18**(增刊): 33~38
- 钱家栋,陈有发,金安中. 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京:地震出版社, 256~266
- 阮爱国,李清河,赵和云. 2000. APE 理论地电阻率前兆[J]. 西北地震学报, **22**(3): 209~216
- 阮爱国,李清河. 1999. 地壳介质各向异性电性本构关系讨论[J]. 华南地震, **19**(3): 35~42
- 宋治平,尹祥础,梅世蓉. 1996. 地震前兆异常的迁移速率的非线性变化特征及其力学解释[J]. 地震, **16**(4): 372~376
- Zhao Yulin, Qian Fuyue. 1994. Geoelectric precursors to strong earthquakes in China[J]. *Tectonophysics*, **233**: 99~113

PRELIMINARY STUDY ON CHARACTERISTICS OF SEISMIC PRECURSOR OF EARTH RESISTIVITY ANISOTROPY DEGREE IN EAST CHINA

Feng Zhisheng¹⁾ Yang Jianjun²⁾ Mei Weiping¹⁾
Geng Jie³⁾ Wang Xuequan⁴⁾ Liu Yigao⁴⁾

1) Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

2) Earthquake Administration of Nanjing Province, Nanjing 210008, China

3) Earthquake Administration of Shandong Province, Ji'nan 250014, China

4) Earthquake Administration of Anhui Province, Hefei 230031, China

Key words: degree of earth-resistivity anisotropy; seismic anomaly; Fourier fitting; travel time curve