

非线性 R/S 方法研究及其在地震预测中的应用^{*}

王碧泉 黄汉明 范洪顺 王春珍 陈佩燕

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

主题词: 非线性理论; 中期预报; 分数维; R/S 方法; 赫斯特指数 H

近几年来, 非线性科学及其在地球物理学中的应用研究已引起了地球物理学界的重视(陈颙等, 1992), 并已取得了一些可喜的成果. 本文所涉及的分形问题是非线性科学中有关问题之一. 人们已经观察到自然界中存在大量的复杂现象, 如河流、山脉、闪电的图形等都没有特征长度, 却又表现出自相似性; 又如物理系统的混沌、湍流等现象常常表现出不稳定性和不规则性. 为研究这类现象, Mandelbrot 于十几年前提出了分形理论. 目前, 这一理论已经得到了极其迅速的发展. 分形理论揭示了自然界中无规则形体的内在规律性——标度的不变性, 它是描述复杂现象的有力工具.

地震的孕育过程是一个复杂的现象, 它常常表现为既非确定的、也非完全随机的, 它可能是一种混沌现象. 为此, 我们引入非线性科学中的 R/S 方法用于计算分数维, 它是一种对时间序列进行分析的方法, 用该方法可以较方便地计算赫斯特指数 H . H 可以看作时间序列的极差、标准差结构的分维. 我们将 R/S 方法用于地震预测, 主要是研究分维随时间的变化, 探讨其与强震之间的关系, 研究经验性的预报指标, 以便在实际工作中应用.

本文在 R/S 方法的基础上, 首先形成了一套算法—— RSH 算法, 并将它用于我国大陆强震的预测, 研究得出定量的预报指标. 还进行了回溯性检验, 得到 $R=0.36$, 具有一定的预报效能. 同时, 这也表明分维的变化与强震之间具有一定关系, 可望将分形分维方法实际应用于地震预测. 为改进预报效果, 本文还作了将 RSH 算法与其它前兆联合应用方面的研究. 为此, 进一步给出了 RSHM 算法. 检验表明, 此联合算法的 $R=0.45$, 可以提高预报的效果.

1 求非线性指数 H 的 R/S 方法

R/S 方法是赫斯特(Hurst)于 1965 年提出的, 它是一种对时间序列进行分析的方法. 其主要原理如下(孟宪国, 1991).

已知一个时间序列

$$\{\xi(t)\} \quad t = 1, 2, \dots \quad (1)$$

则其均值序列为

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (2)$$

累积离差为

* 地震科学联合基金会资助项目. 国家地震局地球物理研究所论著 95A0056.
1994 年 7 月 8 日收到初稿, 1994 年 12 月 7 日收到修改稿并决定采用.

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差为

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (4)$$

标准差为

$$S(\tau) = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (5)$$

极差与标准差之比为 $R(\tau)/S(\tau)$, 下面简记为 R/S . 赫斯特在分析了 R/S 的统计规律时发现存在下列关系:

$$R/S \propto \left(\frac{\tau}{2} \right)^H \quad (6)$$

式中的 H 称为赫斯特指数. 实际上, H 可以看作为极差、标准差结构的分维. 用这种方法来计算分维是较为简便的.

对式(6)两边取对数, 得到

$$\lg(R/S) \propto H \lg(\tau/2) \quad (7)$$

可以看到, $\lg(R/S)$ 与 $\lg(\tau/2)$ 成正比. 按此关系, 由 n 个 ($n > 2$) $\lg(R/S)$ 与 $\lg(\tau/2)$ 的值可作曲线拟合, 拟合所得直线的斜率即为赫斯特指数 H .

2 RSH 算法及其在地震预测中的应用

2.1 RSH 算法

基于 R/S 方法, 我们提出下述 RSH 算法:

- (1) 选定一个任意多边形的地区 A ;
- (2) 选取地震目录. 在时间 t_1 至 t_2 的期间内, 选取 A 区中 $M_2 \leq M \leq M_1$ 的地震, 并删除余震;
- (3) 计算时间序列 $\xi(t)$. 计算 P 时间内的某种地震活动性(如频度、能量、 b 值等), 并按 ΔP 的间隔滑动, 得到时间序列 $\xi(t)$;
- (4) 计算 H 曲线. 按上述 R/S 方法, 取 n 个值作曲线拟合, 计算 H ; 并滑动计算得到 H 曲线. 必要时可取 Q 个点求平均得到平均 H 曲线;
- (5) 确定预报指标. 将 H 曲线与强震进行对比分析, 确定 RSH 算法对 A 区的定量预报指标.

2.2 RSH 算法应用于我国大陆强震的预测

所研究的地区 A 为我国大陆地区, t_1, t_2 分别取为 1958 年 1 月 1 日和 1992 年 12 月 31 日, $M_1 = 9.0$, $M_2 = 5.0$, $P = \Delta P = 2$ 个月, 计算地震频度, 得到序列 $\xi(t)$. 然后取 $n = 20$, $Q = 3$ 计算 H 曲线(图 1).

由图可见, H 值较低或在低值以后常常发生强震. 为确定一个定量的预报指标, 我们研究了多种方案, 逐一分析和评定预报效能, 并最后选取了下述方案.

将 RSH 算法应用于我国大陆的预报指标为:

- (1) 若某 H 值满足 $0.3 \leq H \leq 0.4$, 则预测其后 1 年半在我国大陆将发生 $M_s \geq 7.2$ 地震.
- (2) 若满足 $H < 0.3$, 则预测其后 3 年内在我国大陆将发生 $M_s \geq 7.2$ 地震.

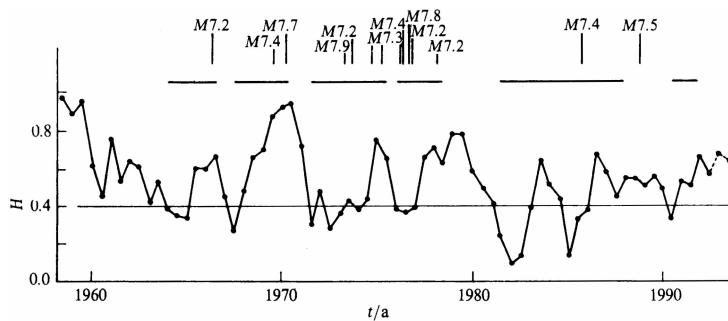
我们还进行了回溯性预报检验. 图 1 中短横线示出了按上述预报指标预报的时间段. 35 年中发出预报的时间共计 20 年. 此时期内共发生 $M_s \geq 7.2$ 地震 14 次, 其中报对了 13 次(参看图 1 和表 1). 用 R 值(许绍燮, 1989) 评定其预报效能如下:

$$R = C - b = \frac{\text{报对的地震次数}}{\text{应预报的地震总次数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究的总时间}} = \frac{13}{14} - \frac{20}{35} = 0.36 \quad (8)$$

按报对 13 次和漏报 1 次地震, 查“具有 97.5% 置信水平的 R 值表”, 得到 $R_{97.5} = 0.268$, 小于上述 R 值, 表明我们所得的 $R = 0.36$ 在 97.5% 的置信水平上通过了检验. 这也说明 RSH 算法用于我国大陆强震的预测是具有一定的预报效能的.

表 1 RSH 和 RSHM 算法回溯性预报结果

时间段	缺震 方法 预测的 时间段	RSH 算法 预测的 时间段	RSHM 算法 预测的 时间段	发生地震情况	时间段	缺震 方法 预测的 时间段	RSH 算法 预测的 时间段	RSHM 算法 预测的 时间段	发生地震情况
1962 年 1—6 月					1978 年 1—6 月	✓	✓	✓	1978-03-25, $M_s 7.2$
1962 年 7—12 月					1978 年 7—12 月				
1963 年 1—6 月					1979 年 1—6 月				
1963 年 7—12 月					1979 年 7—12 月	✓			
1964 年 1—6 月	✓				1980 年 1—6 月	✓			
1964 年 7—12 月	✓				1980 年 7—12 月	✓			
1965 年 1—6 月	✓				1981 年 1—6 月	✓			
1965 年 7—12 月	✓				1981 年 7—12 月	✓	✓	✓	
1966 年 1—6 月	✓	✓	✓	1966-03-22, $M_s 7.2$	1982 年 1—6 月	✓	✓	✓	
1966 年 7—12 月	✓				1982 年 7—12 月	✓	✓	✓	
1967 年 1—6 月	✓				1983 年 1—6 月				
1967 年 7—12 月	✓				1983 年 7—12 月				
1968 年 1—6 月	✓				1984 年 1—6 月				
1968 年 7—12 月	✓	✓	✓		1984 年 7—12 月				
1969 年 1—6 月	✓	✓	✓		1985 年 1—6 月	✓	✓	✓	
1969 年 7—12 月	✓	✓	✓	1969-07-18, $M_s 7.4$	1985 年 7—12 月	✓	✓	✓	1985-08-23, $M_s 7.4$
1970 年 1—6 月	✓	✓	✓	1970-01-05, $M_s 7.7$	1986 年 1—6 月	✓	✓	✓	
1970 年 7—12 月	✓				1986 年 7—12 月				
1971 年 1—6 月					1987 年 1—6 月				
1971 年 7—12 月	✓				1987 年 7—12 月	✓	✓	✓	
1972 年 1—6 月	✓				1988 年 1—6 月	✓			
1972 年 7—12 月	✓				1988 年 7—12 月	✓			1988-11-06, $M_s 7.5$
1973 年 1—6 月	✓			1973-02-06, $M_s 7.9$	1989 年 1—6 月	✓			
1973 年 7—12 月	✓			1973-07-14, $M_s 7.2$	1988 年 7—12 月	✓			
1974 年 1—6 月	✓	✓	✓		1990 年 1—6 月	✓			
1974 年 7—12 月	✓	✓	✓	1974-08-11, $M_s 7.3$	1990 年 7—12 月	✓	✓	✓	
1975 年 1—6 月	✓	✓	✓	1975-02-04, $M_s 7.3$	1991 年 1—6 月				
1975 年 7—12 月					1991 年 7—12 月				
1976 年 1—6 月	✓	✓	✓	1976-05-29, $M_s 7.3$ $M_s 7.4$	1992 年 1—6 月				
1976 年 7—12 月	✓	✓	✓	1976-07-28, $M_s 7.8$	1992 年 7—12 月				
1977 年 1—6 月	✓	✓	✓	1976-08-16, $M_s 7.2$					
1977 年 7—12 月	✓	✓	✓						

图 1 我国大陆赫斯特指数 H 随时间变化图

3 RSHM 算法—— RSH 与测震前兆的联合应用

3.1 我国大陆强震前的缺震现象

本文用缺震现象进行预报的方法如下:

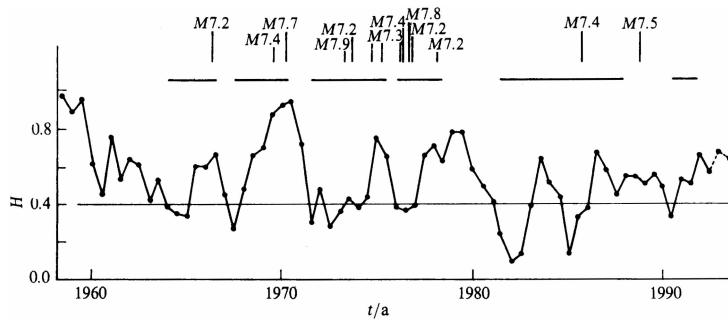
- (1) 选定地区和地震目录. 方法同 RSH 算法;
- (2) 计算平均震级 \bar{M} 曲线. ① 计算 P 时间内的 \bar{M} , 并按 ΔP 滑动得到 \bar{M} 曲线; 或② 取前 n 个地震求 \bar{M} , 然后舍弃第 1 个并补入第 $n+1$ 个地震求 \bar{M} , 如此滑动得到 \bar{M} 曲线. 为平滑, 可在 ΔQ 的时间段内求 \bar{M} 的平均值;

- (3) 确定特定地区的定量预报指标.

将上述方法用于我国大陆地区, 取 t_1 为 1962 年 1 月 1 日, t_2 为 1992 年 12 月 31 日, $M_1=9.0$, $M_2=5.0$, 并按方法②, 取 $n=20$, ΔQ 为半年计算 \bar{M} 曲线(图 2). 由图可见, 我国大陆的 \bar{M} 曲线有缺震现象, 即常在 \bar{M} 下降至某一极小值并回升后发生强震. 我们对比研究后得到下述预报指标:

缺震的预报指标: 若 \bar{M} 曲线出现了极小值并开始回升, 则预测其后 1 年半内在我国大陆地区将发生 $M_s \geq 7.2$ 地震.

还进行了回溯性检验(图 2 和表 1). 31 年期间内发出预报的时间共 16.5 年, 14 次地震报对了 12 次. 按式(8)算得 $R=0.33$, 而 $R_{97.5}=0.286$, 故在 97.5% 的置信水平上通过了检验.

图 2 我国大陆平均震级 \bar{M} 随时间变化图

3.2 RSHM 算法

研究表明, 综合预报可比单项预报改进效果(Wang, 1991). 为此, 我们提出 RSHM 联合算法. 对比图 1 和图 2 可看到, 对多数强震, 两种方法均同时作出了预报. 表 1 列出了两种方法预测的时间段, 还列出了我国大陆在这一时期中发生的全部 $M_s \geq 7.2$ 地震. 仔细分析表 1 后启发我们: 若两种方法同

时预报时才发出预报, 其效果可能更好. 下面将两者联合, 提出了 RSHM 算法:

- (1) 用 RSH 算法计算 H 曲线, 确定预报指标;
- (2) 用缺震方法计算 \bar{M} 曲线, 确定预报指标;
- (3) 确定 RSHM 算法的预报指标. 将上两方法联合, 确定该区用 RSHM 算法的具体预报指标.

本文 RSHM 算法的预报指标为: 对 RSH 和缺震方法同时作出预报的时间段, 则预测在该时段内, 在我国大陆将发生 $M_s \geq 7.2$ 的地震.

对 RSHM 算法还作了回溯性检验. 在 1962—1992 年间作出预测的时间共 10.5 年. 14 次地震中报对了 11 次, 按式(8)计算

$$R = \frac{11}{14} - \frac{10.5}{31} = 0.45$$

查表得 $R_{97.5} = 0.294$, 故 $R = 0.45$ 在 97.5% 置信水平上通过了检验. 而且此 R 值比分别采用 RSH 和缺震方法的 R 值都高一些, 表明联合应用可改善效果.

4 结语

本工作于 1992 年已有初步结果. 在 1993 年 1 月的全国会商会上, 我们曾作报告并预测^①:

“到目前为止, 平均震级 \bar{M} 曲线尚未回升, H 也仍处于 0.4 以上的值, 两者均尚未发出预测警报. 因此我们预测, 1993 年我国大陆地震活动还可能处于 1991—1992 年的水平或略高一点, 但不会很高, 即估计 1993 年我国大陆地区可能不会发生 $M_s \geq 7.2$ 地震”.

实际情况是: 1993 年期间我国大陆未发生 $M_s \geq 7.2$ 地震, 表明这次实际预测是正确的.

综上可得: ① 本文将非线性 R/S 的分维方法用于地震预测, 提出了 RSH 和 RSHM 两种算法; ② 两方法的 R 值均达到一定水平, 表明均有一定效能, 且都通过了检验. RSHM 算法更好一些; ③ 成功预报的实例表明, 分维方法用于预测是有前景的.

参 考 文 献

陈颙、傅征祥、牛志仁、王炜、王碧泉、朱令人、吴宁远、刘小伟, 1992. 非线性科学在地震预报中的应用, 3—54. 地震出版社, 北京.

孟宪国, 1991. R/S 分析和地球化学数据的分形处理. 地球科学, 16, 3, 281—286.

范洪顺、王碧泉、王春珍、陈佩燕, 1994. 缺震曲线对我国大陆地震趋势的预测, 国家地震局地球物理研究所地震预报研究论文集, 55—60. 地震出版社, 北京.

许绍燮, 1989. 地震预报能力评分, 地震预报方法实用化研究文集地震学专辑, 586—590. 学术书刊出版社, 北京.

Wang, B. Q., Fan, H. S., Yang, J. Y., Wang, C. Z. and Chen P. Y., 1991. *Study of Earthquake Precursors and Prediction of Strong Earthquakes*, International Conference on Seismicity in Eastern Asia, 23—26, October. Hong Kong.

^① 王碧泉、范洪顺、王春珍、陈佩燕, “近两年我国大陆强震平静的研究”. 1993 年全国地震趋势会商会. 1993 年 1 月, 北京.