

陕甘宁青中强地震与太阳及磁暴活动的关系的统计分析

张守洁 朱忠杰 丁 卉

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文对陕、甘、宁、青四省(区)地震活动性指数 $A_{N-w}(b)$ 、兰州地磁台记录的磁暴活动性指数 $K(b)$ 和太阳黑子相对数年均值 $R(N)$ 进行统计分析,得出了太阳活动和地震以及磁暴活动均存在约21年、11年、5年、3年和2年左右的显著周期。它们的互相关幅度和交互谐幅度也表明,在上述显著周期内三者存在明显的相关性。理想低通滤波后的SC型磁暴 $K(b)$ 和 $A_{N-w}(b)$ 间的相关系数高达0.886。根据分析本文指出,陕、甘、宁、青四省(区)地震活动在以后五年内还会继续增强。最后就太阳活动和磁暴与地震的发生的关系作了讨论。

一个地区地震的孕育和发生,地球内部的地质构造和岩石状态等条件固然是主要的,但其外部因素的调制和激发也起到一定的作用。本世纪以来,一些学者提出地震的发生可能是由于太阳活动对地球的影响^[1-2],地球磁暴活动也可能与地震活动有一定的联系^[3]。太阳活动、地磁场变化与地震活动这三者之间的关系无疑是十分复杂的,认识它们之间的关系,对于预测强震的发生可能有一定的意义。

本文根据陕、甘、宁、青四省(区)1920—1985年发生的中强地震($M_s \geq 4.5/4$)、太阳黑子活动及兰州地磁台记录的磁暴资料,选用地震活动性指数 $A(b)$ 与太阳黑子相对数 R 、磁暴活动性指数 $K(b)$ 进行统计分析,着重探讨了陕、甘、宁、青地区强震活动与太阳活动和磁暴活动在时间和强度上的相互关系。作为比较,同时也对全国强震($M_s \geq 6.0$)的 $A(b)$ 指数与太阳活动和磁暴 $K(b)$ 指数进行了简单的讨论。

一、地震活动性指数 $A(b)$ 和磁暴活动性指数 $K(b)$

我们选用地震活动性指数 $A(b)$ 作为地震活动水平的特征量,是因为它即与地震频度

N 有关,同时也与能量 E 有关。 $A(b)$ 的具体计算公式^[4]为:

$$A(b) = \frac{1}{b} \lg \sum_{i=1}^N 10^{bM_i}, \quad (1)$$

式中 M_i 为计算时间段内的每次地震的震级, N 为地震事件总数, b 即地震重复率曲线(震级—频率公式)

$$\lg N(M) = a - bM \quad (2)$$

中的 b 值, 由于地震可以被认为是符合泊松分布的随机事件, 其震级累积概率的分布函数可以写成

$$N(M) = 1 - e^{-\beta M} \quad (M \geq 0), \quad (3)$$

对上式微分得:

$$\frac{dN(M)}{dM} = n(M) = \beta e^{-\beta M}, \quad (4)$$

式中 $\beta = 1/\bar{M}$, \bar{M} 为全时间段的平均震级,

$$\bar{M} = M_0 + \beta^{-1}, \quad (5)$$

式中 M_0 为最小震级, 若 M_0 不为零, 则由(2)—(5)式可得

$$b = \frac{\log_{10} e}{\bar{M} - M_0} = 0.4343 / (\bar{M} - M_0). \quad (6)$$

(6)式即为用最大似然法计算 b 值的实用公式。

地震和磁暴都具有表征各自活动强度的特征参量 M 和 K 。磁暴过程最大 K 指数即表示了该过程地磁场三小时的扰动程度, 那么在一定意义上也就与能量有关。此外 K 指数等级和磁场变幅间的关系也近似于对数关系, 即类似于地震频度—震级关系。因此, 我们认为, 在某种意义上这两种不同的地球物理事件在某些方面具有共性。仿照地震活动性指数 $A(b)$ 的定义, 我们给出磁暴活动性指数 $K(b)$ 的计算公式:

$$K(b) = \frac{1}{b} \lg \sum_{i=1}^N 10^{bK_i}, \quad (7)$$

$$b = \lg e / (\bar{K} - K_0) = 0.4343 / (\bar{K} - K_0). \quad (8)$$

式中 K_i 为任一磁暴过程最大 K 指数, K_0 视研究内容而定, 因为我们讨论的是中强地震和磁暴的关系, 故令 $K_0 = 6$ 。关于磁暴活动性指数 $K(b)$ 的详细讨论和分析, 拟另文详述。

二、太阳活动和 $A(b)$ 、 $K(b)$ 的统计分析

1. 频谱分析

(1) 计算方法简介

设有两个等间隔(年)的离散时间序列 $\{X_i\}$ 与 $\{Y_i\}$, 其中 $i = 0, 1, \dots, N-1$, 并给定最大滞后点数 m , 则自协方差函数为^[6]:

$$R_x^{(j)} = \frac{1}{N-j+1} \sum_{i=0}^{N-j} X_i X_{i+j},$$

$$R_y^{(j)} = \frac{1}{N-j+1} \sum_{i=0}^{N-j} Y_i Y_{i+j}, \quad (9)$$

($j = 0, 1, \dots, m$, 下同)。

两序列的互相关函数

$$R1_j = \frac{1}{N-j+1} \sum_{i=0}^{N-j} X_i Y_{i+j},$$

$$R2_j = \frac{1}{N-j+1} \sum_{i=0}^{N-j} Y_i X_{i+j}.$$

互相关幅度

$$AR_{XY}^{(j)} = \sqrt{(R1_j)^2 + (R2_j)^2}. \quad (11)$$

两序列的自功率谱为:

$$P_x^{(j)} = \frac{1}{m} \left[AX + 2 \sum_{j=1}^{m-1} R_x^{(j)} \cos \frac{j\pi i}{m} + R_x^{(m)} \cos \pi j \right],$$

$$P_y^{(j)} = \frac{1}{m} \left[AY + 2 \sum_{j=1}^{m-1} R_y^{(j)} \cos \frac{j\pi i}{m} + R_y^{(m)} \cos \pi j \right].$$

上式中

$$AX = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (X_i - \bar{X}), \quad AY = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} (Y_i - \bar{Y}).$$

其中 \bar{X} 、 \bar{Y} 分别为两序列的平均值。经哈明(Hamming)窗平滑后的自功率谱为:

$$\begin{aligned} \bar{G}_0 &= 0.54 G_0 + 0.46 G_1, \\ \bar{G}_k &= 0.23 G_{k-1} + 0.54 G_k + 0.23 G_{k+1}, \\ \bar{G}_m &= 0.46 G_{m-1} + 0.54 G_m, \end{aligned} \quad (13)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, m-1.$$

利用两序列的交互谱的协谱和正交谱

$$\begin{aligned} P_j &= \frac{1}{m} \left[R1_0 + \sum_{j=1}^{m-1} (R1_j + R2_j) \cos \frac{j\pi i}{m} + 0.5(R1_m + R2_m) \cos \pi \right], \\ Q_j &= \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m-1} (R1_j + R2_j) \sin \frac{j\pi i}{m} \end{aligned} \quad (14)$$

即可计算其交互谱幅度

$$AM_{XY}^{(j)} = \sqrt{(P_j)^2 + (Q_j)^2} \quad (15)$$

及相谱

$$PH_{XY}^{(j)} = \arctg(-Q_j/P_j). \quad (16)$$

两序列的凝聚谱为:

$$Z_{XY}^{(j)} = (P_j^2 + Q_j^2) / (P_x^{(j)} \cdot P_y^{(j)}). \quad (17)$$

上述交互谱的 P_j 、 Q_j 、 $AM_{XY}^{(j)}$ 、 $PH_{XY}^{(j)}$ 及凝聚谱 $Z_{XY}^{(j)}$ 的平滑值可用类似于自功率谱的哈明(Hamming)窗平滑方法求得。

(2) 计算结果分析

对太阳黑子相对数年均值 $R(N)$ 、磁暴活动性指数 $K(b)$ 、陕甘宁青四省(区)地震活动性指数 $A_{N-W}(b)$ 和全国 $M_s \geq 6.0$ 地震活动性指数 $A(b)$ 进行谱分析。图1给出了各

指标的自功率谱平滑曲线。鉴于SC型磁暴与SG型磁暴的源及变化规律不同，故将两种类型磁暴分开计算分析。为使资料尽可能多，在兰州台1959—1985年资料的基础上又补充了上海佘山地磁台1954—1958年的磁暴资料。由于我们选取的是 $K \geq 6$ 以上的中强磁暴，这两个台的纬度又相差不大，使用的又是同一K级标准，所以我们认为这样做是可行的。

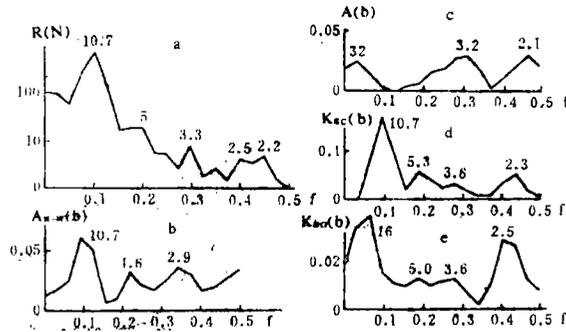


图 1 各指标的频谱曲线

Fig. 1 The power spectral curves of five indexes

由图 1 可以看出： $R(N)$ 频谱曲线除周期为 10.7 年的谱值很大 (997.5) 外，还存在 4 个较小谱值的显著周期，即 5 年 (36.19)、3.3 年 (8.65)、2.5 年 (5.82) 和 2.2 年 (6.72)。 $A_{N-W}(b)$ 频谱曲线有三个显著周期，即 10.7 年 (0.059)、4.6 年 (0.031) 和 2.9 年 (0.034)。 $K_{SC}(b)$ 频谱曲线存在 4 个显著周期，即 10.7 年 (0.168)、5.3 年 (0.057)、3.3 年 (0.030) 和 2.3 年 (0.052)。由图 1 可以看出，除个别点外，这三条曲线有明显的相似形态。表明 $R(N)$ 、 $A_{N-W}(b)$ 和 $K_{SC}(b)$ 在较大范围内具有相似的频率成份，特别是周期为 11 年左右的成份，三者基本一致。

全国 $A(b)$ 频谱曲线有三个谱值接近的显著周期：3.2 年 (0.024)、3.2 年 (0.028) 和 2.1 年 (0.029)。 $K_{SG}(b)$ 频谱曲线除有两个较大谱值的显著周期即 16 年 (0.037)、2.5 年 (0.028) 外，还存在两个较小谱值的显著周期，即 5.0 年 (0.012) 和 3.6 年 (0.013)。

比较图 1 的五条曲线，可以发现在 0.25 以上的频段内各频率成份有相似性，而在 0.15 以下的频段内存在显著的差别。这一方面表明 $A_{N-W}(b)$ 和 $K_{SC}(b)$ 具有与太阳活动相同的 11 年周期，而 $K_{SG}(b)$ 在小于 0.15 的频段时具有与 $R(N)$ 和 $K_{SC}(b)$ 不同的变化规律；另一方面也反映出陕、甘、宁、青四省 (区) 中强地震活动与全国强震活动在周期小于 3 年时存在一致性，而在 5 年以上时具有各自的特殊性。

为进一步探讨各指标间的关系，图 2 分别绘出了 $R(N)$ 、 $K(b)$ 与 $A_{N-W}(b)$ 的互相关幅度，它们之间的交互谱幅度见图 3。可以看出， $R(N)$ 同 $A_{N-W}(b)$ 的互相关幅度和交互谱幅度在可分辨的频率范围内变化很相似，峰值频率也与各自频谱曲线 (图 1) 的峰值频率接近。而 $K_{SC}(b)$ 、 $K_{SG}(b)$ 和 $A_{N-W}(b)$ 的互相关幅度与其交互谱幅度有明显的差别，尤其是在 0.05—0.125 频段它们的交互谱幅度的峰值很大，而它们的互相关幅度在此频段则相对较低。尽管如此，从各峰值出现的频率来看，除 $K_{SG}(b)$ 外其余均很接近。以上分析也表明了西北四省 (区) 地震活动明显地与太阳活动和地磁场变化有关。

作为比较，图 3c、d、e 分别绘出了 $R(N)$ 与全国地震活动的年平均值 $A(N)$ 、

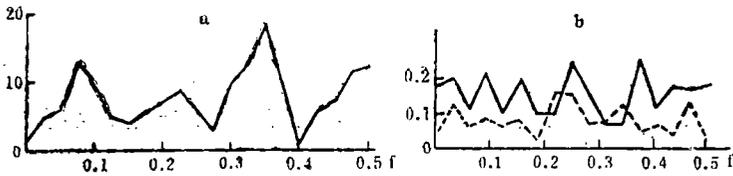


图2 $R(N)$ 、 $K(b)$ 与 $A_{N-w}(b)$ 的互相关幅度

Fig. 2 The mutual correlation amplitude curves of $R(N)$, $K(b)$ and $A_{N-w}(b)$

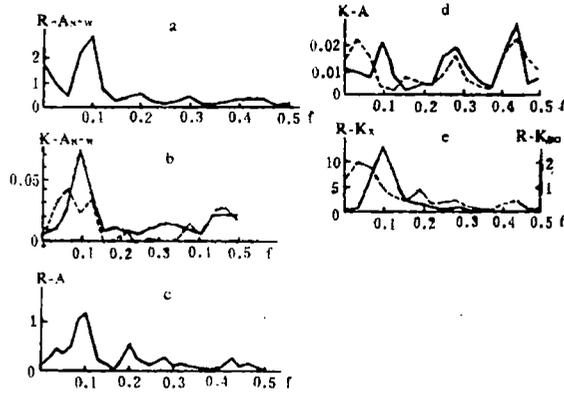


图3 各指标的交互谱幅度(虚线为 $K_{sc}(b)$)

Fig. 3 The cross-spectral amplitude curves of five indexes

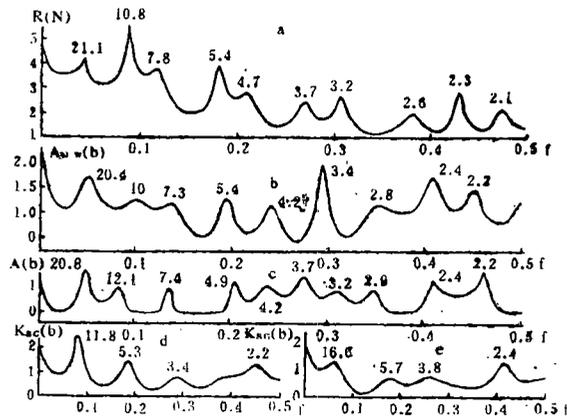


图4 各指标的最大熵谱曲线

Fig. 4 The maximum entropy spectral curves of five indexes

$K(b)$ 与 $A(b)$ 以及 $R(N)$ 与 $K(b)$ 的交互谱幅度。可以看出:除 $K_{sc}(b)$ 外,周期为11年的值很大, $R(N)$ 和 $K_{sc}(b)$ 与 $A(b)$ 交互谱幅度存在30年左右周期的峰值,这与 $A(b)$ 频谱曲线所反映的32年显著周期很接近。

图4是各指标的最大熵谱分析^[6]结果。可以看出,它较图1更清楚地反映出各指标的周期成份。陕、甘、宁、青四省(区)地震活动性指数除图1中的11年左右周期外,还存在20.4年的较长周期(图4b),这与图4a反映的21.1年的太阳活动磁性周期很接近。另外图

4 中小于10年的较短周期成份也反映得很清楚。由于功率谱分辨率较低, 大于11年以上的周期成份在图1中反映很少, 而周期大于25年以上的成份, 受资料长度所限, 同样在图4中也没有显示。但从图4可以看出, 各指标周期大于40年以上的成份熵谱值很大。

2. 数字滤波

对上述各指标按下式进行褶积运算, 可求得所需的滤波值^[7], 以便讨论各指标时间序列的变化。

$$Y(t) = \sum_{k=-n}^n g(k)X(t+k) \quad (t=n+1, n+2, \dots, m-n), \quad (18)$$

式中 $g(k)$ 是设计的理想数字滤波器的系数, 共 $2n+1$ 个, m 是样本总数。对低通滤波而言,

$$g(k) = \left[\text{SI}\left(\frac{\pi(2k+1)}{T}\right) - \text{SI}\left(\frac{\pi(2K-1)}{T}\right) - \frac{2}{2n+1} \text{SI}\left(\frac{\pi(2n+1)}{T}\right) \right] / \left(\pi + \frac{1}{2n+1} \right), \quad (19)$$

式中 T 是以取样点数计算的截止周期, $\text{SI}(x)$ 为正弦积分, 其定义为:

$$\text{SI}(X) = \int_0^X \frac{\sin t}{t} dt. \quad (20)$$

本文根据所分析的资料长度对太阳黑子数 $R(N)$ 和陕、甘、宁、青四省(区)地震 $A_{N-w}(b)$, 滤波器系数取为11, 对全国地震 $A(b)$ 取为9, 而对磁暴 $K(b)$ 则取为5, 取 $T=22$ 。

图5(2)是各指标三年步长平滑值的理想低通滤波结果, 据此可以清楚地看出各指标间的时间序列变化过程。

首先, 西北四省(区)地震活动除明显存在10—15年的活动周期外, 还存在20—25年的较长周期, 并且各活动周期呈“强—弱”交替变化。例如, 两次较强活动峰值在1934年和1961年, 两次较弱活动峰值在1950年和1971年左右, 有趣的是各强活动和弱活动的峰值基本相等[图5(2)d]。由图5(2)e可以看出, 全国地震 $A(b)$ 10—15年的活动周期与西北四省(区) $A_{N-w}(b)$ 很相似, 但20—25年的较长周期不太明显, 各周期地震活动的强度明显不同。图5(2)b、c表明, 磁暴 $K_{sc}(b)$ 具有10—12年及22年左右的周期, 而 $K_{sg}(b)$ 存在16—18年的活动周期, 前者呈“强—弱”交替变化, 后者强度相差不大, 仅高峰持续时间不同而已。

其次, 从图5(2)还看出, $K_{sc}(b)$ 与 $R(N)$ 明显呈正相关, 表明SC型磁暴活动的强度和周期明显受 $R(N)$ 控制。 $K_{sc}(b)$ 仅与 $R(N)$ 的强活动周有关, 即 $R(N)$ 仅在其强活动周影响 $K_{sg}(b)$ 。

另外, 图5(2)表明, 陕、甘、宁、青四省(区) $A_{N-w}(b)$ 与 $R(N)$ 、 $K_{sc}(b)$ 呈负相关趋势, 即太阳活动的低谷年份附近, 陕、甘、宁、青四省(区)地震活动达到峰值, 而且其活动强度明显受太阳活动 $R(N)$ 强弱变化的影响。也就是说, 太阳活动相对较强的周期内, 西北四省(区)地震活动也强, 反之, 太阳活动相对较弱的周期里, 西北四省(区)

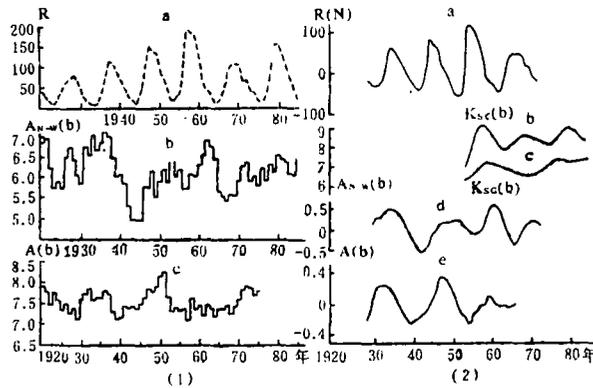


图 5

(1) R、 A_{N-W} 和A的时间序列曲线 (2) 各指标的低通滤波曲线

地震活动也较弱。这在与 $K_{sc}(b)$ 的对比中也可以看出,而且二者的对应关系更明显。全国地震活动几乎不受太阳活动强弱周期的影响,但在高峰时间上超前 $A_{N-W}(b)$ 2—4年。

三、讨 论

1. 综上所述,陕、甘、宁、青四省(区)地震活动具有20.4年、10.7年、5年、3.4年和2.1年左右的主要活动周期,其中后四个周期很接近太阳黑子及SC型磁暴活动的10.7年、5年、3.3年和2.2年的周期,第一个周期接近于太阳活动22年的磁性周期。对全国地震活动的分析亦得出类似的活动周期,但其32年的周期在西北四省(区)地震活动中没有,而12.1年的周期较西北四省(区)10.7年的周期大,表明西北四省(区)的地震活动具有特殊性。本文的研究结果与文献[8]—[10]的研究结果一致。由此可以认为,西北四省(区)地震活动与太阳活动及地球自转有关,即地震活动在总体上要受太阳活动和地球自转变化的影响。

2. 陕、甘、宁、青四省(区)地震活动的强弱程度与太阳活动的强弱有关,太阳活动强时地震活动水平高,反之,太阳活动相对较弱的时地震活动水平也低。地震活动一般在太阳活动的低谷年1—5年内达到高峰,对全国地震活动的研究也表明类似的结果。

3. SC型磁暴无论在活动周期还是发生时间上都与西北四省(区)地震活动有着较好的相关性,滤波后的二者相关系数达0.886,5%置信水平显著性检验 $r_{0.05} = 0.432$,地震活动在磁暴活动峰值后1—3年达到高峰。

4. 1980年以来,太阳活动一直处于下降阶段,SC型磁暴活动亦如此,预测此后直到九十年代初,它们还可能处于低谷附近。由本文分析可以推测,陕、甘、宁、青四省(区)地震活动还可能继续增强,较短周期的活动仍可能存在。

5. 关于太阳活动对地震的影响问题,我们认为,主要影响之一就是磁场。太阳风粒子流通过旋臂状结构的行星际空间磁场、地球磁场,影响到某一地区的磁场与电场的分布,经过一定转化可能影响到该地区的应力场或其它地球物理场的变化,地球内部应力变化会导致地震的孕育和发生。而地磁和地电场的变化,能够影响地球岩石强度的变化。当大地电流变化

而引起的电子流通过岩石晶体点阵时，将产生充分过剩的互相排斥的负电荷，这些负电荷使得一定比例的内部分子键分裂，从而降低了岩石的强度，在应力积累较大的地区，就有可能导致（或触发）地震的发生。

（本文1987年9月3日收到）

参 考 文 献

- [1]徐道一等，天体运行与地震预报，地震出版社，1980。
- [2]Simpson.J.F., Solar activity as a triggering mechanism for earthquake, Earth and Planetary Sci. Letter, Vol. 8, No. 5, 1968.
- [3]Порубников М.М., Комаровски Н.И., 关于强震与地磁场全球磁情的统计关系问题，崔桂芝译，地震，No. 6, 1984.
- [4]吴佳翼等，地震活动性的定量化问题，地震，No. 6, 1983.
- [5]郑治真，波谱分析基础，地震出版社，1979.
- [6]郑治真等，现代谱估计的进展，地震研究，Vol.11, No.2, 1988.
- [7]邹理和，数字滤波器，国防工业出版社，1979.
- [8]罗时芳，天文地球动力学文集，1979.
- [9]丁有济等，关于太阳活动11年周期的连续性问题，科学通报，No. 2, 1978.
- [10]朱岳清等，地球物理频谱的信息论分析方法及地震历史序列的最大谱分析，中国地震，Vol. 1, NO. 4, 1985.

STATISTICAL ANALYSIS ON RELATIONSHIP BETWEEN MODERATE
STRONG EARTHQUAKES IN SHAANXI, GANSU, NINGXIA
AND QINGHAI AREAS AND SOLAR AND
MAGNETIC STORMS ACTIVITY

Zhang Shoujie, Zhu Zhongjie, Ding Hui
(The Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB)

Abstract

In this paper, seismicity indexes $A_{N-W}(b)$ of Shaanxi, Gansu, Ningxia and Qinghai areas, magnetic storm activity indexes $K(b)$ recorded at Lanzhou Geomagnetic Observatory and sun-spots relative numbers year-average-values $R(N)$ are statistically analyzed. We do power spectral analysis and digital filtering. The power spectrum and maximum entropy spectral (MES) analysis of $R(N)$, $A_{N-W}(b)$ and $K_{SC}(b)$ indicates five main peaks: 21, 11, 5, 3 and 2 years. Their mutual correlation amplitude and the cross-spectral amplitude represent distinctly that there are above mentioned periods in $R(N)$, $A_{N-W}(b)$ and $K_{SC}(b)$, too. The correlation analysis showed that correlation coefficient is 0.886 between $K_{SC}(b)$ and $A_{N-W}(b)$ after perfect low-pass filtering. According to this analysis, that seismicity of Shaanxi, Gansu, Ningxia and Qinghai areas can continue to change stronger in five years is represented. Finally, the mechanism of the seismogenic and triggering process related to the solar activity and magnetic storms is discussed.