

基于应变积累释放模型研究鄂尔多斯 块体地震活动特征

高立新, 张 晖, 戴 勇

(内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:利用 1970 年以来积累的仪器记录地震目录资料, 基于 $G-R$ 关系的应变积累释放模型, 研究了鄂尔多斯块体周缘的应变积累释放分期特征及其所处的应变状态。结果表明, 块体周缘的应变积累释放具有明显的两阶段分期特征, 其周缘整体的应变释放和积累的分界线大致在公元 2000 年左右。块体周缘以及块体北缘、东缘、西缘目前均处于应变积累状态, 应变积累时间均超过 10 年, 未来将进入应变释放阶段, 应变释放强度最大的为块体北缘、其次是块体的东缘和西缘; 释放的应变变量分别相当于 6.5 级和 6.0 级左右地震强度。南缘仍处于应变积累释放的起伏阶段。

关键词: 鄂尔多斯块体; 应变积累释放; 地震活动; 特征

中图分类号: P315.3⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)增刊-0054-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.增刊.0054

Research on Characteristics of Seismic Activity in Ordos Block by Strain Accumulating and Releasing Model

GAO Li-xin, ZHANG Hui, DAI Yong

(Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia Autonomous Region 010010, China)

Abstract: By using earthquake catalog data recorded by instrument since 1970, the dividing stage characteristics of strain accumulating and releasing around Ordos block and strain state in which were studied in the paper on the basis of strain accumulating and releasing model. The result showed that the strain accumulating and releasing had obvious stage characteristics of two phases, and the boundary was about A.D 2000. Now the periphery of Ordos block and its northern margin, eastern margin and western margin are in strain accumulating status, and all the strain accumulating time has been more than 10 years. The strain releasing phase would come. The most intense area of strain releasing would be in the northern margin, and the eastern margin and western margin will be the next-intense areas, where the intensity of releasing strain will be equal to that of about $M_s 6.5$ and $M_s 6.0$ earthquakes. The southern margin would be still in undulating stage of the strain accumulating and releasing.

Key words: Ordos block; strain accumulating and releasing; seismic activity; characteristic

0 引言

鄂尔多斯块体位于中国大陆西部与东部过渡带的东侧, 它的西南边界是青藏高原的东北边界, 直接

受到青藏高原运动的影响。它的南边界是华北与华南两大块体的边界。如果把燕山块体视为东北与华北两大块体之间的过渡带, 鄂尔多斯的北边界则是

收稿日期: 2013-11-22

基金项目: 地震行业科研专项(201208009)

作者简介: 高立新(1965—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 正研级高级工程师, 主要从事地震分析预报等研究。

东北与华北块体之间的边界带。鄂尔多斯块体内部稳定,但四周边界断裂带活动强烈,是中国东部活动强度最高的地震带,其动力学和地震活动一直受到地质工作者的关注^[1-2]。鄂尔多斯在中国大陆构造格架中所处的位置对于研究中国大陆地壳的运动学与动力学是非常重要的。因此,鄂尔多斯块体是国际地学界研究的重点地区之一。

一个块体中的应变是与构造应力、地震过程联系最密切的物理量,在地震分期研究中较为常用^[3]。为了表征某个地区在不同时期的地震活动特征,根据该地区的应变积累和释放变化,可将地震活动划分为若干周期性起伏,每一周期包括一个应变能释放高潮和低潮。不同研究者曾用地震应变能积累与释放随时间的起伏变化,研究了中国大陆及不同地区的强震活动周期与轮回^[4-6]。本文依据鄂尔多斯地块及其周缘地震活动性,应用改进的基于 $G-R$ 应变积累释放模型,通过对鄂尔多斯块体应变积累释放的计算,研究了鄂尔多斯地块的地震活动性,比较了周缘的地震活动性及其分期特征,探讨了鄂尔多斯地块及其周缘所处的地震活动阶段。

1 基于 $G-R$ 关系的应变积累释放模型

根据 Gutenberg 和 Richter 及 Kanamori 的能量与震级经验公式,可以计算得到一次地震所释放的应变量^[7-8],应变是能量的平方根值。

$$\lg E = 4.8 + 1.5M_s \quad (1)$$

式中, E 为地震释放的能量(以焦耳 J 为单位); M_s 为面波震级。

以活动周期起始为起点,至最后一个活动周期结束为终点,统计整个过程的总时间段,计算其总应变释放量 $\sum \sqrt{E_i}$,某一时间间隔应变释放率为:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sum \sqrt{E_i}}{T} \quad (2)$$

式中, T 为总时间段;在包含数个活动轮回的总时间段 T 中,应变的积累和释放总体上平衡,需要指出的是,用 $\sqrt{E}$ 代表一个地块地震总的应变释放量 ϵ ^[9],是一种近似表示方法,在能量与应变的本构关系中,还涉及弹性常数 μ ,本研究设定同一个地块中弹性常数 μ 为常数。用 $\sqrt{E_i}$ 代表第 i 个地震的应变释放量,仅是为了表征不同震级地震的应变释放的相对大小,将时间段 t 中应变积累量 $\dot{\epsilon}$ 减去 t 时间段中实际应变释放量 $\sum \sqrt{E_i}$,就可求出年应变水平值 $\epsilon(t)$,即

$$\epsilon(t) = \dot{\epsilon}t - \sum_{i=1}^{N(t)} \sqrt{E_i} \quad (3)$$

其中 $N(t)$ 表示 t 时刻前发生的地震次数,由式(2)和(3)可得到 $\epsilon(t)$ 随 t 变化的曲线。

地震活动在较大区域或地震带上,对各种震级的频次进行统计基本满足 $G-R$ 关系^[10],即震级-频度关系:

$$\lg N = a - bM \quad (4)$$

式中 N 是某一地震震级间隔的地震频次; M 是震级, a 、 b 是回归系数,若将式(4)和式(1)采用相同的震级标度,通过震级 M 建立联系,则可求得基于 $G-R$ 关系的应变积累释放模型^[11],具体方法本文不再赘述。因此,可以根据一个地区的小震记录,通过引入 $G-R$ 关系以估计该区域总的地震活动和小震记录能力,进而通过与震级-能量关系联合求得该地区相对真实的应变能积累速率,并将之用于应变积累释放模型。考虑 1970 年以来仪器记录地震资料的相对完整性,在具体计算时对以上模型进行了改进,大于满足 $G-R$ 关系最小震级以上的地震参与应变积累释放模型的计算,同时未参与 $G-R$ 关系拟合较大的地震也参与计算,使之能够反映一个地区真实的应变积累释放状态,特别是应变释放的真实状态。

应变积累释放曲线总趋势上升表示应变能处在积累阶段,此时积累大于释放,可以认为地震活动处于平静阶段,曲线下降段表示应变能处在释放阶段,此时释放大于积累,可以认为是地震活跃阶段。可以根据曲线的形态估计地震活动所处的阶段,对于一个较短尺度的地震活动时段,可以根据积累的应变水平,估计未来可能释放的应变量级和可能的震级强度。

2 研究区选取和资料可靠性

本文以鄂尔多斯块体周缘作为研究区域,研究范围为 $E 104.5^\circ \sim 115.0^\circ$, $N 33.5^\circ \sim 41.5^\circ$ 。地震资料来源于中国地震目录(公元前 23 世纪—公元 2010 年 5 月)^①,中国地震台网中心 1970 年以来地震目录资料以及近期相关省、自治区地震台网的地震目录资料。

1970 年鄂尔多斯块体有仪器记录地震以来已积累大量地震资料,在时间和空间域内地震资料基

① 中国地震局监测预报司预报管理处整编. 中国地震目录(公元前 23 世纪—公元 2010 年 5 月). 2001.

本可以满足研究的需要。地震活动在时间上呈相对平静与显著活跃相交替的特点;时间上满足完整性和可靠性;另外在空间上也满足相对完整性,即所用的地震资料在空间上反应了孕震的构造块体。在分析和考证地震资料完整性和可靠性时,已充分考虑以上特点。在对块体整体地震活动分期研究的基础上,对块体北缘、西缘、南缘、东缘各自的地震活动分期特征进行了分析。

3 块体周缘地震活动背景

有记载以来鄂尔多斯块体周缘共计发生过 5 次 8.0 级以上地震,最大震级 8.5 级,8.0 级以上地震主要分布在鄂尔多斯块体的西缘、南缘和东缘,块体的北缘及东北缘、西北缘未发生过 8.0 级以上地震。5 次 8.0 级以上地震空间分布间隔在 270~380 km 之间,优势空间间隔分布为 280 km,在发震时间顺序上还具有逆时针旋转的特点,从 1303 年山西洪洞 8.0→1556 年陕西华县 8.2→1654 年甘肃天水 8.0→1739 年宁夏平罗 8.0,4 次 8.0 级以上地震具有沿着鄂尔多斯块体东南缘→西南缘→西缘顺时针旋转的空间迁移特点。这种 8.0 级以上强震空间迁移的顺时针旋转特点可能与鄂尔多斯块体的逆时针旋转具有某种构造上的关系(图 1)。

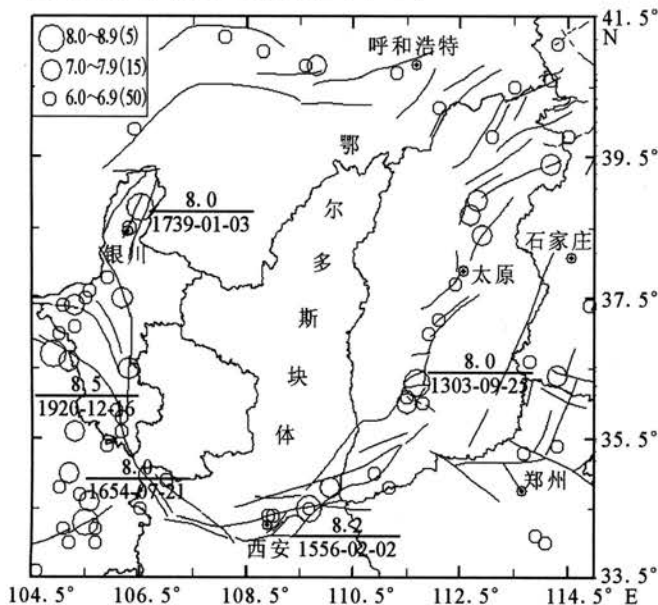


图 1 鄂尔多斯块体及其周缘 6.0 级以上地震分布

Fig. 1 Distribution of $M > 6.0$ earthquakes on the Ordos block and its margins

华北地区第 3 活动期(公元 1484 年至 1814 年)块体周缘的 6.0 级以上地震主要分布在块体的西缘和东缘,即汾渭地震带、银川—河套地震带的西南角、祁连山地震带西部区域;华北地区第 4 活动期

(公元 1815 年至今)块体周缘的 6.0 级以上地震则主要分布在鄂尔多斯块体的北缘和西缘,即银川—河套地震带的北段的河套地震带,而汾渭地震带仅发生 1815 年山西平陆 6.7 级地震。可见,华北地区第 3 活动期和第 4 活动期,6.0 级以上地震在空间分布上发生了明显的转移,鄂尔多斯块体北缘已经成为鄂尔多斯块体周缘 6.0 级以上地震的主体活动地区,1929 年以来该区域已发生 6 次 6.0 级以上地震。块体内部未有 6 级以上地震记载,历史上曾发生 12 次 5 级以上地震,最大震级 5.5,主要发生在块体的南部(图 1)。

4 块体的应变积累释放特征

在已有的关于地震目录资料完整性研究结果的基础上^[12],综合分析表明,鄂尔多斯块体周缘 5.0 级以上地震目录自公元 1485 年以来基本完整,应变积累释放曲线显示,已经历了 2 个活动周期,分别经历了 180 年(1568—1748 年)和 175 年(1748—1923 年)。

由于历史地震资料最小震级所限,在每个活动期内,已无法进一步甄别细微的分期活动。利用 1970 年以来的仪器记录地震资料,可充分利用现代小震资料,在现有的时间和可信震级域内进一步分析鄂尔多斯块体地震活动的分期特征。得到的应变能积累速率相对精确,且对地震资料的完整程度具有较强的依赖性,与仅用历史资料得到的应变累积释放模型相比,其结果具有相对独立性。通过近震震级标度和面波震级标度的经验转换关系^[13],使用相同的面波 M_s 震级标度,通过 $G-R$ 关系,采用可信震级域拟合得到公式(4)的系数 a 、 b ,进而得到应变积累释放曲线。

4.1 块体周缘的应变积累释放特征

从 $G-R$ 关系可知块体周缘的 2.0 级以上地震记录完整(图 2(c)),应变积累释放计算的起始震级为 2.0 级地震,考虑应变积累释放的真实状态, $G-R$ 关系拟合关系震级区间意外的较大地震同时参与计算,下文不再赘述。从 1970 年至 2011 年,块体的应变积累释放大致呈现两个阶段,从 1970 年至 2000 年,块体整体应变呈现释放特征,释放量为 $5.7 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$;2000 年以后,块体整体应变呈现积累特征,积累量为 $5.0 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$ 。两个阶段的年平均应变变量 $2.64 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$ 。仔细甄别,1970 至 2000 年还可以分为 4 个分期,分别完成 4 个应变从积累到释放的轮回,轮回 1 的起止时间为 1972—1977 年;

轮回 2 为 1977—1983 年;轮回 3 为 1983—1990 年;轮回 4 为 1992—1999(图 2(b))。4 个轮回总的来看应变释放量均大于积累量,应变释放量约为 $3.1 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$ 。从震级时间序列来看,也大致具有 4 个起伏的似周期性轮回(图 2(a)),周期 1 的起始时间为 1976 年前后,周期 2 的起始时间为 1988 年前后,周期 3 的起始时间为 1996 年前后,周期 4 的起始时

间为 2007 年前后,由于方法的差异,与应变积累释放曲线确定的周期有一定差异,但总体上反应了块体地震活动的周期性起伏特征。

纵观时间序列和应变积累释放,块体从 2000 年进入了长达 11 年的应变积累状态,未来地震的应变释放量级可达 6.5 级以上。

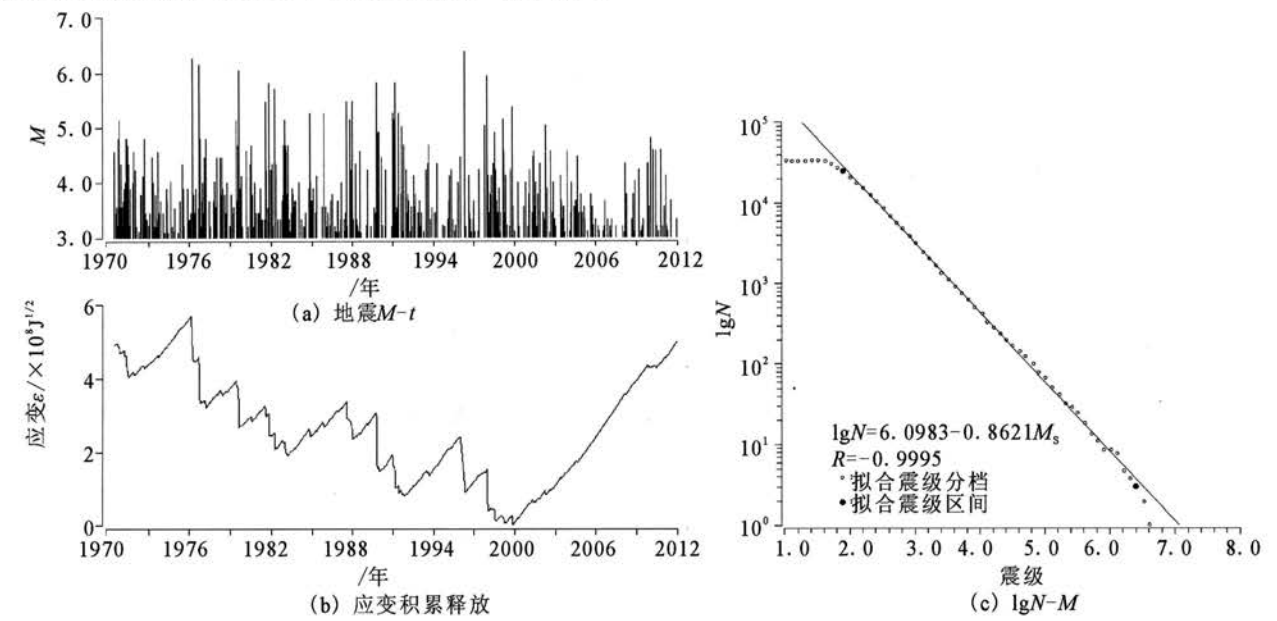


图 2 鄂尔多斯块体周缘 3.0 级以上地震 $M-t$ (a)、应变积累释放(b)、 $\lg N-M$ (c)图

Fig. 2 $M>3.0$ earthquakes on the margins of Ordos block $M-t$ (a), accumulation and release of strain(b), $\lg N-M$ (c)

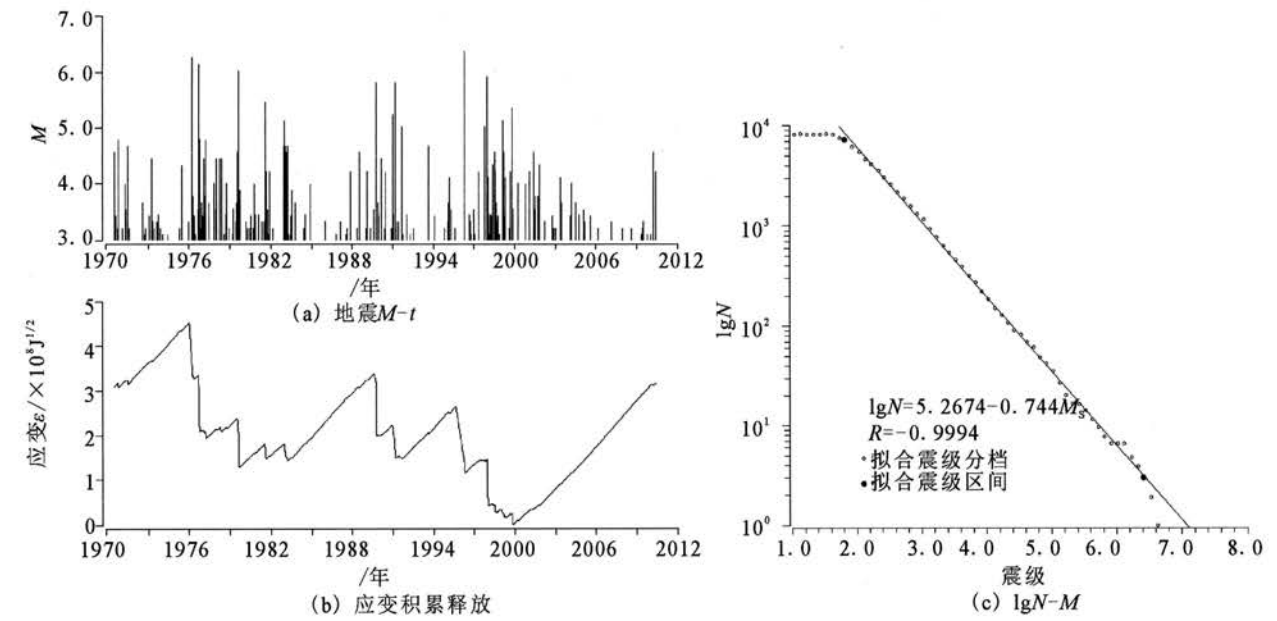


图 3 鄂尔多斯块体北缘 3.0 级以上地震 $M-t$ (a)、应变积累释放(b)、 $\lg N-M$ (c)图

Fig. 3 $M>3.0$ earthquakes on the northern margin of Ordos block $M-t$ (a), accumulation and release of strain(b), $\lg N-M$ (c)

4.2 块体北缘的应变积累释放特征

块体北缘研究范围为 $E104.5^{\circ} \sim 115.0^{\circ}, N$

$39.5^{\circ} \sim 41.5^{\circ}$ 。从 $G-R$ 关系可知块体的 2.0 级以上地震记录完整(图 3(c)),应变积累释放计算的起

始震级为 2.0 级地震。从 1970 年至 2011 年,块体的应变积累释放大致呈现两个阶段,从 1970 年至 2000 年,块体整体应变呈现释放特征,释放量为 $3.1 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$,2000 年以后,块体整体应变呈现积累特征,积累量为 $3.2 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$,可见应变积累量大于释放量。两个阶段的年平均应变量 $1.86 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$ (图 3(b))。进一步分析,1970 至 2000 年还可以分为 4 个分期,分别完成 4 个应变从积累到释放的轮回,轮回 1 的起止时间为 1971—1977 年;轮回 2 的起止时间为 1977—1983 年;轮回 3 的起止时间为 1983—1991 年;轮回 4 的起止时间为 1992—1999 年。4 个轮回总的来看应变释放量均大于积累量,应变释放量约为 $4.0 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$ 。从震级时间序列来看,也大致具有 4 个起伏的似周期性轮回 (图 3(a)),周期 1 的起始时间为 1976 年前后,周期 2 的起始时间为 1988 年前后,周期 3 的起始时间为 1996 年前后,周期 4 的起始时间为 2007 年前后,由于方法的差异,与应变积累释放曲线确定的周期有一定差异,但总体上反应了块体地震活动的周期性起伏特征。

块体北缘从 2000 年进入了长达 11 年的应变积

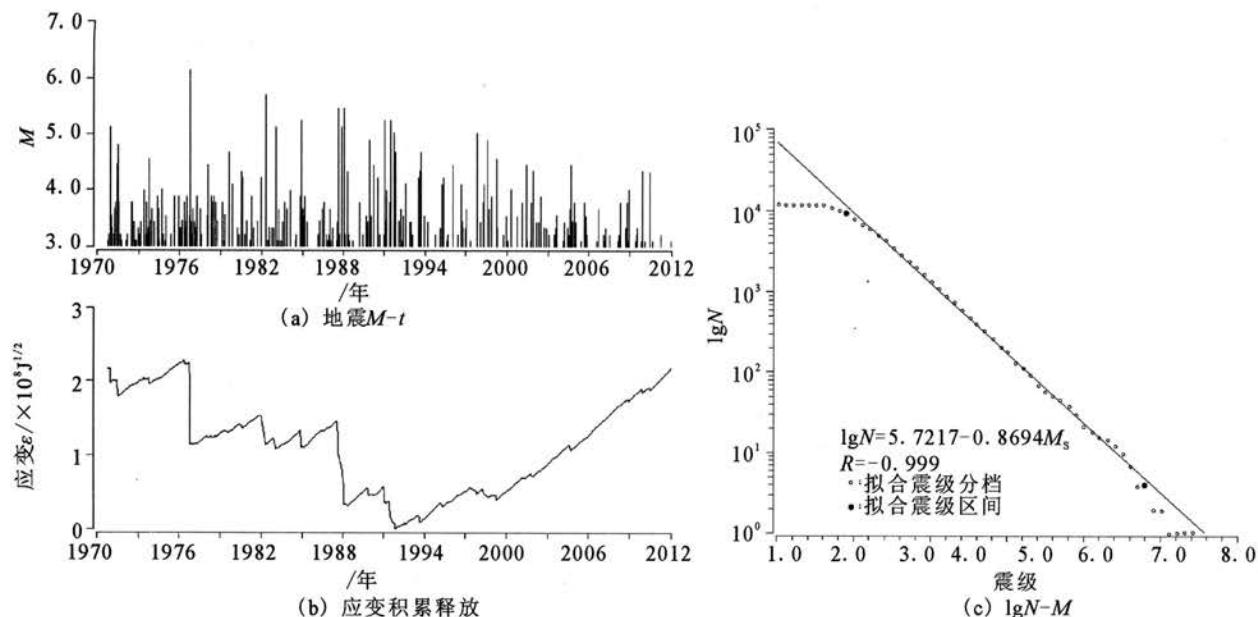


图 4 鄂尔多斯块体西缘 3.0 级以上地震 $M-t$ (a)、应变积累释放(b)、 $\lg N-M$ (c)

Fig. 4 $M>3.0$ earthquakes on the western margin of Ordos block $M-t$ (a), accumulation and release of strain(b), $\lg N-M$ (c)

4.4 块体东缘的应变积累释放特征

块体东缘研究范围为 $E110.3^{\circ} \sim 115.0^{\circ}$, $N33.5^{\circ} \sim 41.5^{\circ}$ 。从 $G-R$ 关系可知块体的 2.0 级以上地震记录完整 (图 5(c)),应变积累释放计算的起始震级为 2.0 级。从 1970 年至 2011 年,块体的应变

累状态,未来地震的应变释放量级可达 6.5 级或更大。块体北缘的应变积累释放曲线与块体整体的应变积累释放特征高度相似,可以说,1970 年以来块体北缘的地震活动基本反映了块体的应变积累释放的整体活动特征。

4.3 块体西缘的应变积累释放特征

块体西缘研究范围为 $E104.5^{\circ} \sim 107.6^{\circ}$, $N33.5^{\circ} \sim 41.5^{\circ}$ 。从 $G-R$ 关系可知块体的 3 级以上地震记录完整 (图 4(c)),应变积累释放计算的起始震级为 3 级地震。从 1970 年至 2011 年,块体的应变积累释放大致呈现两个阶段,从 1970 年至 1991 年,块体整体应变呈现释放特征,释放量为 $1.8 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}$,1991 年以后,块体整体应变呈现积累特征,积累量为 $2.2 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}$,可见应变积累量大于释放量。两个阶段的年平均应变量 $1.19 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$ (图 4(b)),总的应变量较北缘小一个数量级。时间序列无明显的分期特征,强度整体呈现逐年衰减的趋势 (图 4(a))。就应变积累释放和时间序列综合分析,1991 年以来积累的应变量,未来地震的应变释放量级可达 6.0 级左右。

积累释放大致呈现两个阶段,第一阶段从 1970 年至 2000 年,块体整体应变呈现释放特征,释放量为 $1.83 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}$,第二阶段从 2000 年至 2011 年,块体整体应变呈现积累特征,积累量为 $2.2 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}$,可见应变积累量大于释放量。两个阶段的年平均应变

量 $2.42 \times 10^7 \text{ J}^{1/2}/\text{a}$ (图 5(b)),总的应变量较北缘小一个数量级。第一阶段大致具有 4 个分期,分期 1 从 1972 年至 1976 年,分期 2 从 1977 年到 1982 年,分期 3 从 1982 年至 1991 年,分期 4 从 1991 年至 2000 年,4 个分期均完成了应变从积累到释放一个周期过程,释放量大于积累量是 4 个分期共有的特点。

块体东缘从 2000 年进入了长达 11 年的应变积累状态,未来地震的应变释放量级可达 6.0 级左右。

时间序列具有明显的分期特征,3 个时间分期的开始时间分别为 1976 年、1989 年和 1998 年,期间地震强度具有涨落相间的特点(图 5(a)),1998 年以后基本呈现逐渐衰落的特点,同时也意味着新的活动期即将开始。

应变积累量和释放特点东缘与西缘具有某些相似特征,首先应变积累释放量级相当,与北缘相差一个数量级。东缘与北缘应变积累的开始时间相同,均为 2000 年前后。

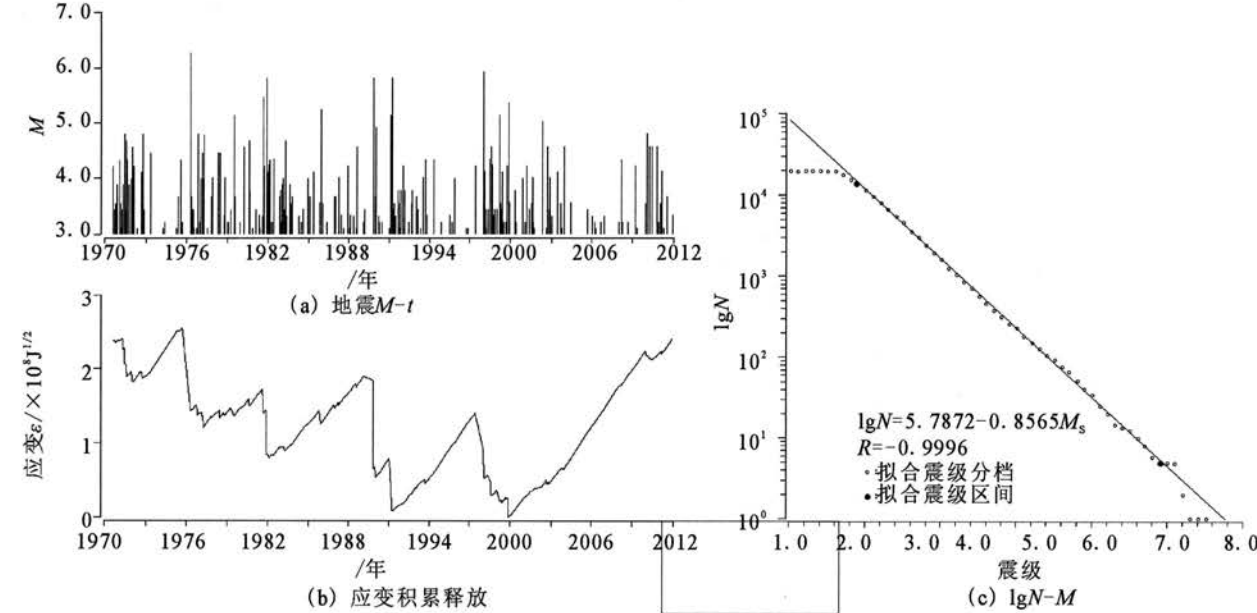


图 5 鄂尔多斯块体东缘 3.0 级以上地震 $M-t$ (a)、应变积累释放(b)、 $\lg N-M$ (c)

Fig. 5 $M > 3.0$ earthquakes on the eastern margin of Ordos block $M-t$ (a), accumulation and release of strain(b), $\lg N-M$ (c)

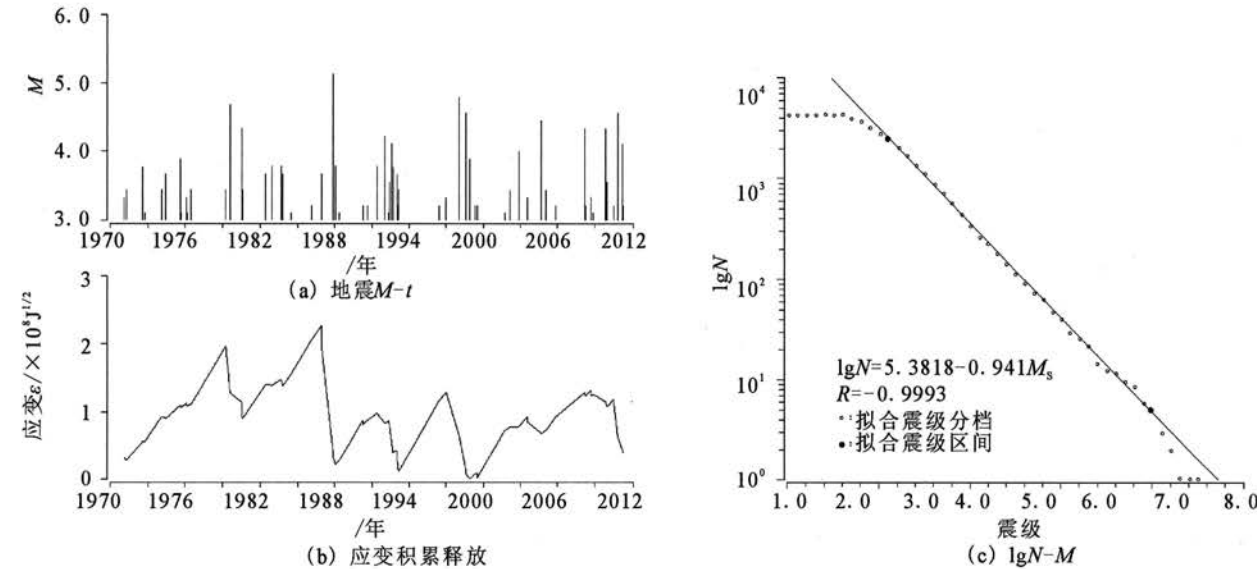


图 6 鄂尔多斯块体南缘 3.0 级以上地震 $M-t$ (a)、应变积累释放(b)、 $\lg N-M$ (c)

Fig. 6 $M > 3.0$ earthquakes on the southern margin of Ordos block $M-t$ (a), accumulation and release of strain(b), $\lg N-M$ (c)

4.5 块体南缘的应变积累释放特征

块体南缘研究范围为 $E104.5^{\circ} \sim 115.0^{\circ}$, $N33.5^{\circ} \sim 35.2^{\circ}$ 。从 $G-R$ 关系可知块体的 2.0 级以上地震记录完整(图 6(c)), 应变积累释放计算的起始震级为 2.0 级。从 1970 年至 2011 年, 块体的应变积累释放大致具有 3 个分期, 分期 1 从 1972 年至 1988 年, 分期 2 从 1988 年到 1998 年, 分期 3 从 1998 年至 2011 年。3 个分期均完成了应变从积累到释放的似周期过程, 应变释放量大致与积累量相当(图 6(b)), 应变量较西缘和东缘小一个数量级, 未来南缘可能仍将处于应变积累或起伏阶段。时间序列无明显的分期特征(图 6(a))。

块体南缘的应变积累和释放特点与北缘、东缘与西缘相比具有某些个性特征, 特别是 2008 年以后在 2000 年应变积累的基础上出现应变释放, 同时也是鄂尔多斯块体周缘应变积累释放量最弱的一个区域。

5 结论与讨论

利用 1970 年以来仪器记录的地震目录资料, 可以发现, 鄂尔多斯块体周缘地震活动具有明显的分期特征。周缘的应变积累释放大致具有应变释放和积累的两阶段特征, 其整体应变释放和积累的分界线大致在 2000 年左右, 这一特点从块体周缘的整体应变积累释放以及北缘、东缘、西缘的应变积累释放特点上表现的尤为明显。

应变量级块体北缘最大为 $10^8 J^{1/2}$ 、东缘和西缘次之为 $10^7 J^{1/2}$ 、南缘最小为 $10^6 J^{1/2}$, 依次相差一个数量级。北缘、东缘、西缘目前均处于应变积累状态, 应变积累时间均在 10 年以上, 应变积累时间段均已超过已有的分期积累时间, 未来将进入应变释放阶段。

本项研究的目的之一是分析鄂尔多斯块体应变特征和目前处于的应变状态, 进而确定未来鄂尔多斯块体可能处于的应变积累阶段。通过以上分析可见, 未来一段时间块体将进入应变释放阶段, 未来应变释放强度依次为块体的北缘、东缘和西缘, 释放的能量分别相当于地震强度为 6.5 级和 6.0 级左右,

南缘仍将处于应变积累释放的起伏阶段。

应变积累释放模型研究地震活动分期时, 选取的研究时段、震级对于应变积累释放曲线具有显著影响, 强度小的地震主要作为应变积累, 强度大的地震主要作为应变释放, 且具有相对性。在利用现代小震目录进行 $G-R$ 关系分析时, 除丢弃较小震级外, 未进行拟合的较大地震也参与了应变计算, 主要是为保证尽可能反应块体的真实应变状态。

细分研究区域, 可进一步判别鄂尔多斯块体西北缘、东北缘、东南缘、西南缘所处的应变积累释放阶段以及未来可能的释放量, 以更好把握鄂尔多斯块体整体应变积累释放特征。

参考文献

- [1] 邓起东, 程绍平, 闵伟, 等. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. 地质力学学报, 1999, 5(3): 13-21.
- [2] 李延兴, 张静华, 郭良迁. 鄂尔多斯的逆时针旋转与动力学[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 50-56.
- [3] 夏浩明. 大华北 $M \geq 4$ 地震阶段性分区特征及其意义[J]. 地球物理学报, 1987, 30(3): 281-291.
- [4] 邱竞男, 高旭. 关于本世纪我国地震活动阶段性的讨论[J]. 地震, 1986, (6): 41-47.
- [5] 黄忠贤, 陈虹. 中国大陆地震分期活动及其与构造运动的关系[J]. 中国地震, 1996, 12(4): 403-410.
- [6] 马宏生, 刘杰, 张国民. 用应变积累释放模型研究我国大陆地块分区地震活动[J]. 地震学报, 2002, 24(6): 569-578.
- [7] Gutenberg B, Richter CF. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration(second paper)[J]. Bull Seism Soc Amer, 1956, 46: 105-145.
- [8] Kanamori H. The Energy Release in Great Earthquakes[J]. J Geophys Res, 1977, 82: 2981-2987.
- [9] Beniof H. Earthquakes and Rock Creep[J]. Bull Seism Soc Amer, 1951, 41: 31-62.
- [10] Gutenberg B, Richter CF. Seismicity of the Earth[J]. Geol Soc Amer Spec Pap, 1941, 34(1): 1-133.
- [11] 马宏生, 刘杰, 张国民, 等. 基于 $G-R$ 关系的应变积累释放模型研究中国大陆强震的分区活动[J]. 地震学报 2005, 27(4): 355-366.
- [12] 黄玮琼, 李文香, 曹学锋. 中国地震资料完整性研究之二[J]. 地震学报, 1994, 16(4): 423-431.
- [13] 中国地震局震害防御司. 中国近代地震目录(公元 1912 年—1990 年)[M]. 北京: 中国科学技术出版, 1999.