

张哲、王健,2018,1833 年云南嵩明 8 级地震震中区地震密集特征分析,中国地震,34(2),303~311.

1833 年云南嵩明 8 级地震震中区 地震密集特征分析

张哲 王健

中国地震局地球物理研究所,北京市民族大学南路 5 号 100081

摘要 1833 年云南省昆明市嵩明杨林地区发生了 1 次强烈地震,震级被定为 8 级,这也是迄今为止云南省震级最大的地震。本文选取该地震震中一带为研究区(24.7°~25.5°N,102.3°~103.3°E),采用网格点密集值计算方法对研究区 1966 年以来仪器记录的地震进行了计算。根据地震密集等值线图确定研究区有 2 个地震密集区。通过不同的时窗分析了密集区内地震活动的时间分布特征。利用地震密集时空分布特征与历史强震间的关系,给出了 1833 年嵩明 8 级地震震中位置校正的建议。此外,还通过地震密集时空动态变化分析发现,21 世纪以来研究区地震密集由 NE 逐渐向 SW 方向发展。该现象可能在一定程度上反映出区域应力的变化特征。

关键词: 地震密集值 历史地震 地震活动性 云南省

[文章编号] 1001-4683(2018)02-0303-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

1833 年 9 月 6 日云南省昆明市嵩明杨林地区发生 1 次强烈地震。这次地震造成的破坏十分巨大,据相关历史文献记载:城垣衙署倾圮,庙宇仓间坍塌,桥崩屋毁,山崩地裂,黑泉涌流,河流改道。地震共造成 6707 人死亡,受灾人口达 153385 人。《中国历史强震目录(公元前 23 世纪-公元 1911 年)》(闵子群等,1995)将此次地震震中烈度定为 XI 度,震级定为 8 级,震中为 25.0°N、103.0°E,误差为 2 类($< 25\text{km}$)。这也是云南省迄今震级最大的地震。

在嵩明地震震中区,从 1966 年开始有仪器记录地震,该区域内近年来中小地震仍然活跃。已有的研究表明,历史上发生过强震的地方,现今中小地震依然活跃,并且表现出空间密集分布特征。中小地震的密集特征与历史强震的震级、震中位置乃至破裂方向间都有着内在的联系,根据这种联系,可以反过来对历史强震的参数进行评估,并可以对原来误差较大的历史地震参数进行校订(王健,2001、2007、2011;王健等,2004、2010;王泽皋,1985)。本文拟对研究区现代仪器记录的中小地震时空分布特征进行定量处理,并分析其与历史地震间的关系。

[收稿日期] 2017-03-21; [修定日期] 2017-04-13

[项目类别] 国家自然科学基金国际科技合作项目“地震危险性的概率分析与应对决策研究(Probability and Uncertainty in Risk Estimation and Communication)”资助

[作者简介] 张哲,男,1991 年生,硕士研究生在读,主要从事地震活动性研究。E-mail: zhang@cea-igp.ac.cn

王健,通讯作者,男,1963 年生,研究员,主要从事历史地震、地震活动性等研究。E-mail: wangjian@cea-igp.ac.cn

1 研究区地震活动基本情况

研究区为矩形区域(24.7°~25.5°N, 102.3°~103.3°E), 1966 年以来共记录到 2129 次地震, 地震震中分布见图 1。由图 1 可见, 研究区地震震中分布极其不均匀, 有些地区地震分布较为集中, 甚至震中几乎重叠, 如嵩明地区附近地震震中分布。

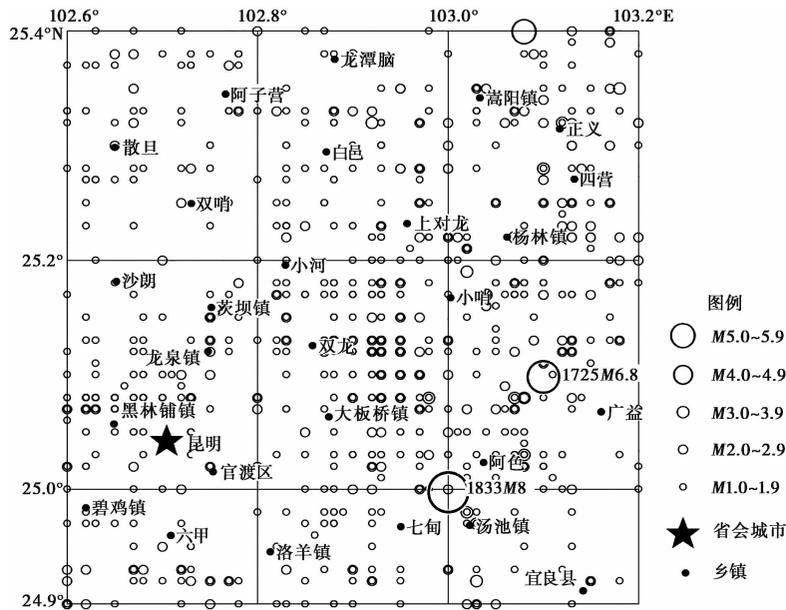


图 1 研究区中小地震震中分布

研究区地震按照震级进行统计, 结果列于表 1。由表 1 可见, $M_L 1.0 \sim 1.9$ 地震约占 86.5%, $M_L 2.0 \sim 2.9$ 约占 12.5%, 两者合计所占比例大于 99%。最大地震震级为 5.2。

研究区 $M-t$ 图如图 2 所示。由图 2 可见, 地震在时间上分布也不均匀。虽然从 1966 年开始有记录, 但早期地震分布比较稀疏。直到 20 世纪 80 年代后期, 地震记录才相对多起来。

表 1 研究区仪器记录地震震级分布

震级 M_L	1.0~1.9	2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	5.0~5.9
次数	1842	267	14	5	1
比例/%	86.5195	12.5411	0.6576	0.2349	0.0470

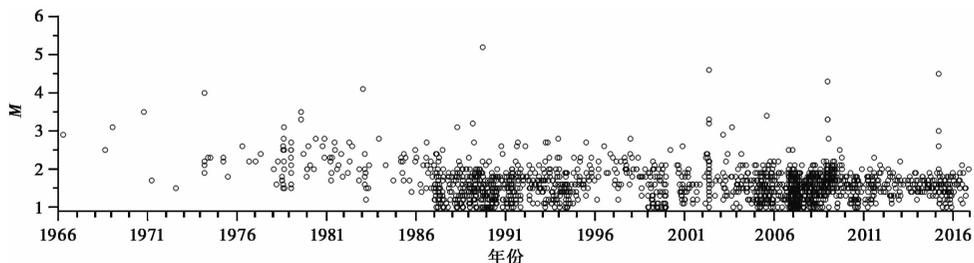


图 2 研究区地震事件 $M-t$ 图

为了定量分析中小地震的空间分布特征,我们采用密集值计算方法,具体计算方法见文献(王健,2001、2007、2011;王健等,2004、2010),在此仅作简单介绍。

2 网格点密集值法

地震震中分布存在相对密集地区与稀疏地区。区域网格点密集值方法是将研究区内划分出的网格的节点作为计算点,以计算的一定时段内发生在节点附近的地震事件密集值来表示节点的密集度,通过对密集度的计算可绘制出等值线图,从而具体地表示研究区的地震频度和震中分布,进而确定地震的密集区域。计算方法是:在研究区内以一定的空间间隔 Δ 划网格(图 3),以网格的第 j 节点为中心,假定在以 R 为半径的范围内对于给定震级 M 和时段 t 的地震数为 n ,则该点的密集值 V_j 为

$$V_j = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{\Delta M \ln r_{ij}} \quad R_{\min} \leq r_{ij} \leq R \quad (1)$$

式中, r_{ij} 为第 i 次地震震中与第 j 节点间的距离; ΔM 为归一化因子,其值等于所选区域内震级的最大值与最小值之差,该值可使不同区域的计算具有可比性; M_i 为地震事件的震级; V_{ij} 为地震密集值。式(1)的含义是,以地震震中到节点距离对数的反比加和来统计搜索半径以内所有地震对第 j 节点的贡献。地震密集值与地震次数成正比,与距离的对数成反比,它综合地反映了地震次数和疏密程度。

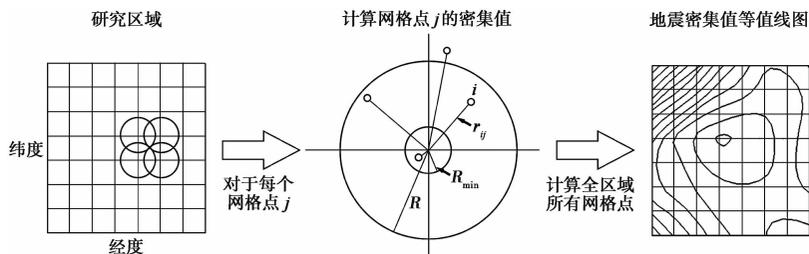


图 3 区域网格点密集值法原理示意图

3 研究区地震密集时空特征

根据研究区的实际情况,将地震密集值计算参数取为 $R = 10\text{km}$; $R_{\min} = e$; $\Delta = 0.05^\circ$, 通过计算得到地震密集值等值线图。

3.1 密集区划分

地震密集值等值线图如图 4 所示,由图 4 可见,有 2 个比较突出的密集区。一个中心位置大致在茨坝镇,密集值最大达到 139.0,大致呈现圆形。另一个呈 NE 方向的椭圆形,其密集中心大致处在小哨与双龙之间,密集值为 55.5。根据密集值等值线的分布,我们划分了密集区的范围。密集区的参数详见表 2。

3.2 密集区地震的时间分布

密集区划分之后,在各密集区内对地震随时间的分布进行统计,统计分震级档进行,以年为时间单位,结果见图 5(a)、5(b)。由图 5(a)、5(b)可见,2 个密集区内地震的时间分布,都存在显著的“峰值”。如果以年地震次数超过 10 为标准,那么 1 号密集区有 2 个密集

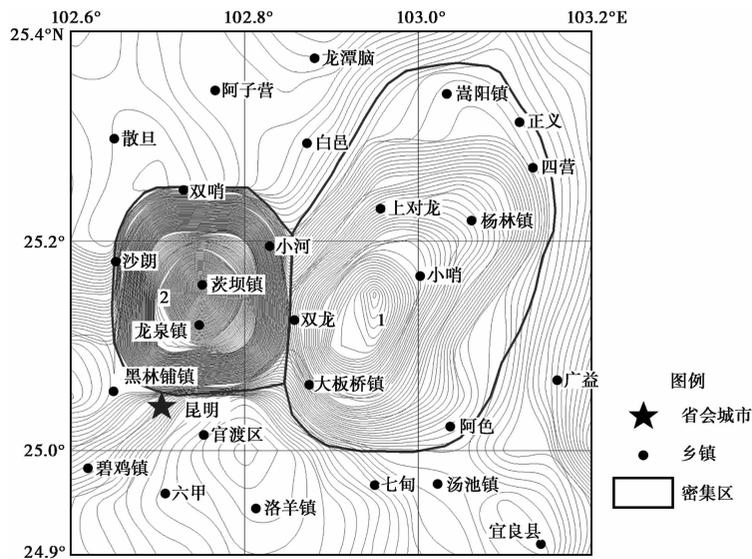


图 4 研究区地震密集值等值线图及其分区

峰值, 分别出现在 2004、2009 年, 其中, 最大值出现在 2009 年, 为 53 次; 2 号密集区有 5 个密集峰值, 分别出现在 1981、1991、1994 以及 2007 年, 其中, 最大值出现在 2007 年, 为 251 次。为更加细致描述“峰值”内地震的时间分布特征, 我们以“月”为时间单位进行统计, 结果见图 5(c)、5(d)。

分区编号	中心经度 / (°E)	中心纬度 / (°N)	区域面积 / km ²	区域周长 / km	最大密集值
1	103.0	25.2	973.7	116.80	55.5
2	102.8	25.1	412.2	74.66	139.0

由图 5(c)、5(d) 可见, 经过更加精细的处理之后, 1 号密集区地震的时间分布变得较为连续、平缓。仅在 2002、2009 年还保留 2 个峰值。而 2 号密集区地震的时间分布则仍显现出峰值林立、不连续的特点, 其中, 2007 年依然保持较大的峰值。

对京津唐地区的研究结果显示(王健, 2011; Wang et al, 2017), 与大地震相关的密集往往都表现为时间分布的连续、平稳。针对 2 号区域, 将密集区内峰值时段的地震删除, 重新计算后新的地震密集等值线如图 6 所示。由图 6 可见, 2 号区域密集现象并没有完全消失, 但是其时间分布表现为不连续, 分别在 1996~1999、2000~2005 年存在明显的间断点。因此, 2 号区域所对应的范围内是否可能存在未被记录到的历史强震还有待进一步研究。

4 地震密集与历史强震间关系的分析

《中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)》(闵子群等, 1995) 将 1833 年 8 级地震震中定为 25.0°N、103.0°E, 震中位置取整数整分, 主要是考虑该地震震中区历史记载仍显不够, 不足以精确确定震中。同时给出的极震区等震线使用虚线表示, 也表明等震线的分布结果并不十分确定。实际上, 该地震极震区等震线的确定也确实存在诸多疑问, 如《中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)》(闵子群等, 1995) 中, 该地震的极震区等震线最南端到了阳宗, 而澄江阳宗的破坏只是“近阳宗之凤山崩裂, 夹死人畜”, 而昆明的破坏记

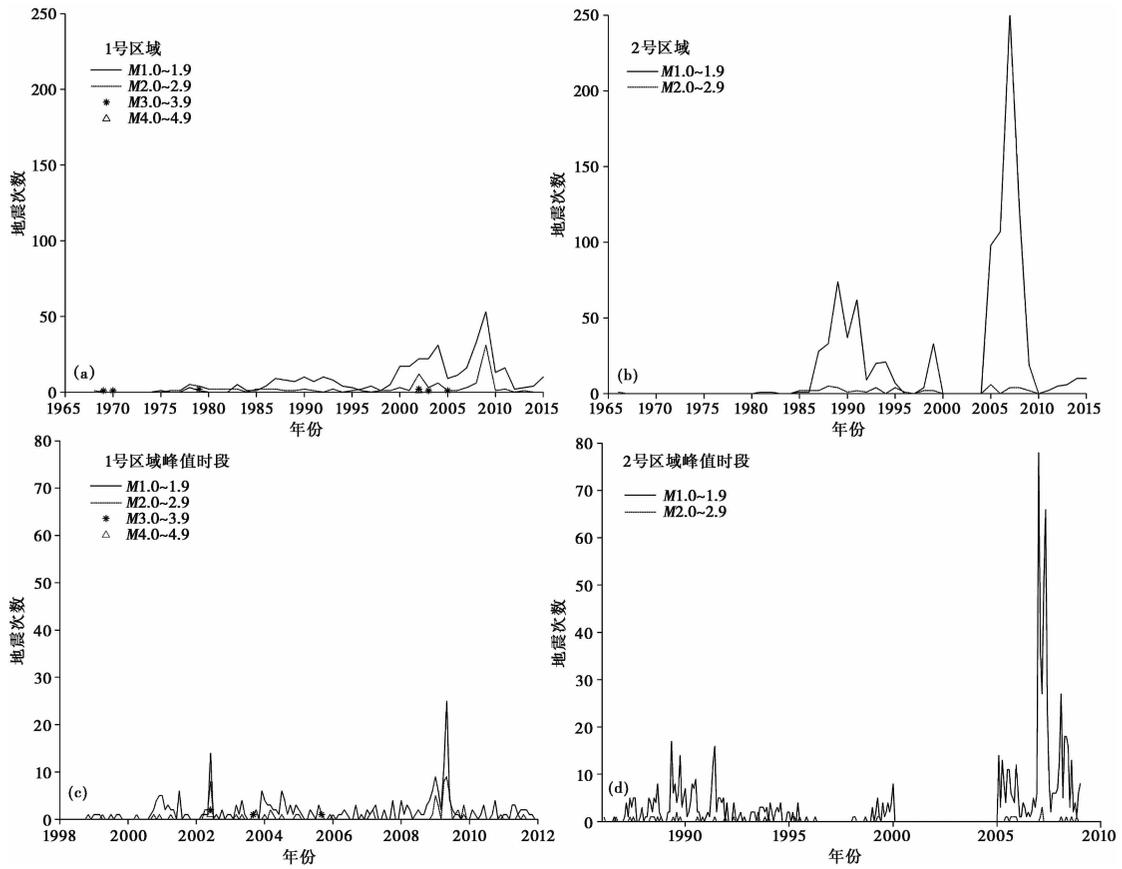


图 5 密集区震级分档

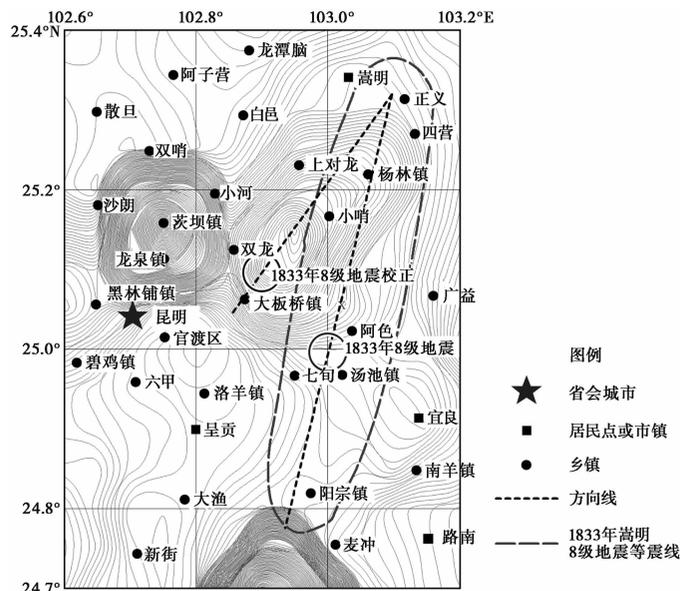


图 6 剔除 2 号区峰值后地震密集等值线及 1833 年 8 级地震震中分析

录为“塌房 7422 间,塌墙 1388 堵,压毙 611 人,受灾达 24856 人。府城四垣多圯,六楼半倾。东寺塔倒,西寺塔宝顶震落、塔身歪斜”,但是昆明的烈度仅被评为Ⅷ度。基于上述 2 个方面的原因,对原震中参数的合理性进行分析则十分必要。

震源反演结果表明,1 次大地震的震源破裂过程可分为 2 个子过程。第 1 个子破裂过程往往与地表间有一定的距离,其破裂中心就是微观震中;第 2 次子破裂过程则出露地表,往往在地表能够找到断裂痕迹。由于地震波的多普勒效应,其在地表造成最严重破坏的点,往往在第 2 次子破裂的外侧(张勇等,2010)。岩石实验表明,1 次破裂之后,破裂面在应力的作用之下,会产生更多的中小破裂事件,这些密集分布的中小事件能够显示大破裂事件的位置(Sondergeld et al,1981)。现今大量中小地震依然围绕历史 8 级强震的震中区分布,并呈现出椭圆形状,可以理解为历史 8 级强震也很可能是 2 次破裂,这 2 次破裂形成的破裂面上在现今区域应力场的作用下依然发生大量中小地震。

无论是 1303 年洪洞 8 级大地震(王健等,2004)、1679 年三河平谷 8 级大地震(王健,2011),还是 1833 年嵩明 8 级大地震,都表明 1 次 8 级大震引起的破裂往往不是 1 个破裂点,而是具有一定方向的椭圆状破裂面,地震密集区的方向则对应地震破裂面的走向,而地震的宏观震中都位于密集值较高的密集中心外侧。据此,我们可以根据地震密集值等值线的分布情况,将宏观震中确定为 25.10°N 、 102.90°E 。

在洪洞、三河-平谷 8 级大地震的研究中(王健等,2004;王健,2011),地震密集值等值线的分布与极震区等震线的方向基本一致,因此,可将地震的宏观震中校正至由密集值等值线确定的宏观震中处。但在本研究中,极震区方向与地震密集区方向并不一致。这可能是由极震区的位置存在不确定性所致,限于篇幅,本文对此不再作进一步的讨论,退而承认极震区方向与地震密集区方向存在差异。在这种情况下,1833 年 8 级地震的实际震中可能位于 25.10°N 、 102.90°E 与 25.0°N 、 103.0°E 的连线之间。

5 地震密集时空演变及其含义

众所周知,一次大地震会造成局部地壳的破裂,形成破裂面。但如果之后区域应力没有波动,破裂面上也不会有太多的中小地震发生。当区域应力波动增大,或者说区域应力增大时,破裂面上就会有大量中小地震发生。前述分别分析了地震密集的空间分布及其内部地震随时间的分布特征。下面动态分析密集时空演变过程。

为更直观、形象地表现密集时空演化过程,本文将地震密集值赋予以其为中心的矩形,并根据此数值进行扫描,得到研究区密集值扫描图。扫描图中每个色块的颜色对应该区域密集值的大小,对于中心密集值大于 100 的色块,统一使用深红色色块表示。扫描图中,淡黄色色块边界所围成的区域与地震密集区能很好地吻合,因此,扫描图中淡黄色色块的变化代表研究区内地震密集值的变化趋势。

不同的截止时间所表现出的密集值是不同的。由于 2001 年以前研究区域地震活动性较弱,因此,本文以 2001 年作为截止时间的起点,以 1 年为截止年份增量进行计算,得到的扫描值随时间的变化明显,具体的变化如图 7 所示。由图 7 可见,2001 年研究区只有左侧 1 个密集区,随着时间的推移,右侧密集值逐渐增大。从截止时间为 2002 年开始,研究区右侧地震活动开始变得密集,并表现出类似于扩散现象的变化。这种“扩散现象”随时间表现出

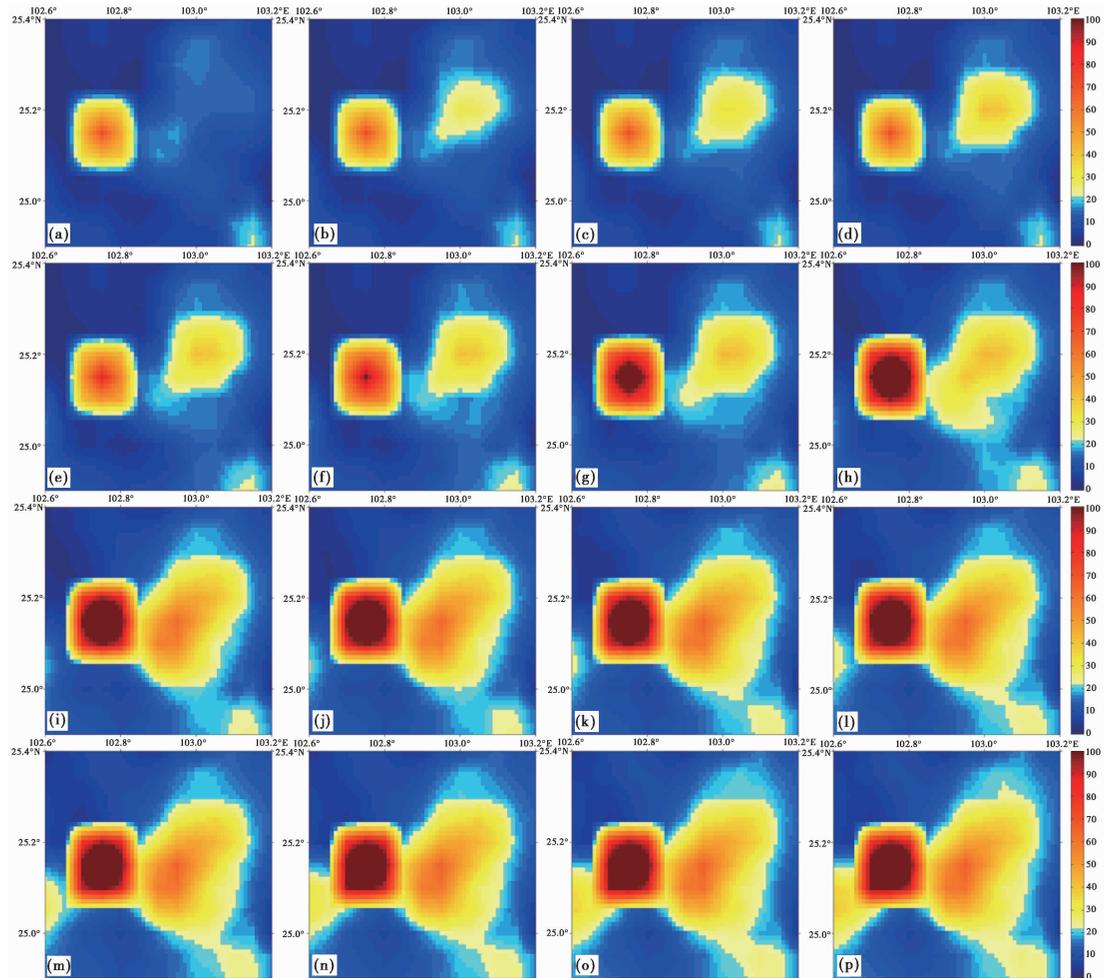


图 7 研究区地震密集时空扫描图

明显的方向性,2002~2007 年扩散方向大致为 SE 方向,2008 年扩散受阻,出现 SW、NE 向的分量,这种情况持续到 2010 年,之后扩散开始转向 SW 方向,并形成新的密集区域锥形。

对于与 1833 年嵩明 8 级地震相对应的密集区,密集是从 NE 方向开始,逐步向 SW 方向扩展,这或许表明 21 世纪以来,1833 年 8 级地震原有的破裂面,在逐步增加的区域应力作用下,重新活跃。也可以说,从 2001 年开始,区域应力逐步增加,并且具有明显的方向性,即从 NE 向 SW 方向发展。

6 结论与讨论

研究区内地震活动自 20 世纪 80 年代起开始活跃,并从 2005 年开始活跃性愈见显著。本文应用区域网格点密集值算法对研究区地震事件的时空分布特征进行了研究,由地震密集等值线图可见,研究区域内有 2 个完整的地震密集区,分别位于研究区 103°E 经线东西两侧,1 号区域位于研究区西侧,大致呈 NE 方向的椭圆形,地震密集峰值为 55.5,该区域地震

随时间的分布在 2004、2009 年出现峰值,最大值为 53 次;2 号区域位于研究区西侧,大致呈圆形,地震密集峰值为 139.0,该区域地震随时间的分布在 1981、1991、1994 和 2007 年出现峰值,最大值为 251 次。2 个密集区构成了研究区地震活动的主要部分。

已有的研究发现,与大地震相关的密集往往都表现为时间分布的平稳性(王健等,2004、2010;王健,2007、2011)。针对 1 号区域地震随时间分布的平稳现象,本文通过分析中小地震密集值的分布特征与历史地震间的关系,并结合岩石实验结果,推测 1833 年 8 级地震的实际震中可能位于 25.0°N、103.0°E(闵子群等,1995)与 25.1°N、102.9°E 的连线之间。针对 2 号区域去除峰值后地震时间分布表现出的平稳性,本文推测,在该区域内可能存在未被记录到的历史强震。

同时,本文采用区域密集值扫描图对地震密集时空演变特征进行了讨论。地震密集随截止时间有明显变化,本文将这种现象称为“地震密集扩散现象”。研究中发现,地震密集扩散表现出了较为明显的方向性,该现象或许与研究区内的应力变化相关,即研究区内应力变化方向由 NE 方向逐渐发展为 SW 方向,具体的相关性有待进一步研究。

致谢:感谢云南省地震局苏有锦研究员给予的帮助和指导。

参考文献

- 闵子群、吴戈、江在雄等,1995,中国历史强震目录(公元前 23 世纪-公元 1911 年),北京:地震出版社。
- 王健,2001,地震活动性图象处理的网格点密集值计算方法,地震学报,23(3),262~267。
- 王健,2007,渤海海域历史地震和海啸,地震学报,29(5),549~557。
- 王健,2011,京津唐地区地震密集与历史强震,北京:地震出版社。
- 王健、吴宣、高阿甲等,2010,历史地震参数校订方法探讨——以北京延庆公元 294 年地震为例,地震学报,32(1),108~117。
- 王健、吴宣、张晓东等,2004,1303 年山西洪洞 8 级地震高烈度区内地震活动特征及其物理意义,地震学报,26(4),347~354。
- 王泽皋,1985,大震区的“长期活动”,地震学报,7(3),254~266。
- 张勇、许力生、陈运泰,2010,2010 年 4 月 14 日青海玉树地震破裂过程快速反演,地震学报,32(3),361~365。
- Sondergeld C H, Estey L H, 1981, Acoustic emission study of microfracturing during the cyclic loading of westerly granite, J Geophys Res, 86(B4), 2915~2924。
- Wang J, Main I G, Musson R M W, 2017, Earthquake clustering in modern seismicity and its relationship with strong historical earthquakes around Beijing, China, Geophys J Int, 211(2), 1027~1040, doi: 10.1093/gji/ggx326。

Seismic Density around the Epicenter of the Songming *M*8.0 Earthquake in 1833

Zhang Zhe Wang Jian

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract A strong earthquake happened in 1833 around Songming with *M* 8.0, which has been the largest one in Yunnan Province so far. In this paper, we have researched the seismicity around the epicenter of the *M*8.0 earthquake ($24.7^{\circ} \sim 25.5^{\circ}\text{N}$, $102.3^{\circ} \sim 103.3^{\circ}\text{E}$). The method of seismic density calculation has been utilized to deal with the seismic pattern of small and middle earthquakes recorded by instruments since 1966. Based on seismic density contours, two seismic density zones are identified. The temporal distributions of earthquakes in the two seismic density zones are analyzed in different time windows. According to the relationship between the seismic density and the parameters of strong historical earthquakes, the emendation of the epicenter of the 1833 *M*8.0 earthquake is suggested. Spatial-temporal dynamic patterns are analyzed. The results show the seismic density zones start from NE and develop to SW direction since the new century. This variation might illustrate the fluctuation of regional stress to some extent.

Key words: Seismic density; Historical earthquake; Seismicity; Yunnan Province