

云南地区地震目录最小完整性震级研究^{*}

刘丽芳¹, 李志海², 蒋长胜³

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 通过对构造活动强烈、地震活动频度高、台站分布极不均匀的云南地区开展最小完整性震级 M_c 研究, 试图为地震危险性评估和台站科学布局等研究提供参考资料。基于云南区域地震台网发展阶段, 利用基于 G-R 关系的交互式分析方法, 研究了 M_c 的空间分布特征; 采用多参数方法研究了云南 8 个地震区(带)的 M_c 时间演化特征。结果表明: 云南区域台网不同发展阶段 M_c 的空间分布存在较大的非均匀性, 大理—丽江—盐源区、元谋区、小江带等区(带)监测能力较好, 澜沧—耿马区、思普区等区(带)监测能力较低。但云南“十五”区域数字地震台网运行以来, 云南省 M_c 可达 $M_L 1.5$ 左右, 其中大理—丽江—盐源区 M_c 可控制在 $M_L 1.0 \sim 1.5$, 小江带 M_c 约为 $M_L 1.5$, 腾冲—龙陵区 M_c 可控制在 $M_L 1.0 \sim 2.0$, 澜沧—耿马区 M_c 可控制在 $M_L 1.5 \sim 2.5$, 思普区 M_c 约为 $M_L 1.0 \sim 2.0$ 。云南地区 8 个地震区(带) M_c 时间变化特征分析结果表明, 增加台站数量, 优化台网布局, 是提升云南地区地震监测能力的有效途径。

关键词: 地震目录; 最小完整性震级; 地震监测效能; 震级—频度分布

中图分类号: P315.73

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)04-0491-09

0 引言

地震目录的最小完整性震级 M_c 是地震学中最基础、最重要的研究内容之一。由于地震台站空间分布的非均匀性, 以及震相数据信噪比的时空复杂变化和定位过程中观测数据使用的人为选择性等各种因素, 即使“最好的”地震目录也存在监测能力的非均匀性和不一致性 (Woessner, Wiemer, 2005)。最小完整性震级 M_c 的一个微小变化, 例如当 $\Delta M_c = 0.1$ 时, 可能引起地震数目的变化达 ($b = 1$) 25%; 如果 $\Delta M_c = 0.3$ 时, 可能引起地震数目的变化则达 50%。对 M_c 的科学评估, 是大多数地震活动和地震危险性分析中最关键的问题之一。例如, 根据地震发生率的瞬态变化研究与应力、应变的相关联的地震静态和动态触发现象 (Gomberg *et al.*, 2001; Stein, 1999)、地震定标率研究 (Knopoff, 2000; Main, 2000), 时间相依的地震危险性分析 (Wiemer, Wyss, 2000) 以及余震序列研究 (Enescu, Ito, 2002; Woessner *et al.*, 2004) 等。因此, 针对一个地震目录进行系统分析, 并给出其最小完整性震级 M_c 的时、空域分

布是有实际意义的, 特别是对于各种时、空尺度的地震活动性研究。

M_c 也是衡量地震观测台网监测能力、进行科学布局的重要指标。尽管现在已有利用已知的地震事件 (例如核试验或人工爆破) 对台网定位结果进行“标定” (郭飙等, 2002), 不同台网定位结果的对比 (Wüster *et al.*, 2000; 孟玉梅等, 2001), 使用统计算法评价其“优化”的程度 (Rabinowitz, Steinberg, 1990; Doufexopoulou, Korakitis, 1992; Bartal *et al.*, 2000), 以及利用重复地震的分布和间距小于 1 km 的假定描述监测能力空间分布 (蒋长胜等, 2008) 等。但是, 由于“标定”事件位置固定、覆盖范围有限, 台网比对和统计算法无法给出监测水平的小尺度空间非均匀性, 重复地震方法依赖于重复地震事件的分布等所限, 难以全面客观地给出整个区域地震台网监测范围内的地震监测效能的评估。

云南地区构造运动强烈, 地震活动频繁。1957 年昆明地震台建成并投入观测至今, 云南地震观测已由最初的单台站模拟记录发展为区域数字地震观测台网, 地震观测系统得到长足发展, 开展云南地区有现代地震观测历史以来的 M_c 研究, 是

^{*} 收稿日期: 2012-08-06.

基金项目: 云南省应用基础研究重点项目 (2010CC006) 和云南省重点项目 (jcyb-20080601-9-4) 联合资助。

进一步提高该地区地震监测能力和进行地震危险性分析的重要基础。

由于数字地震观测历史的有限性,基于震级—频度分布、满足 G-R 关系计算 M_c 的统计地震学方法仍是解决上述问题的最有效途径。本研究将运用基于 G-R 关系的交互式分析方法,研究 1970~2011 年云南地区 M_c 时空分布特征,采用“最大曲率”(maximum curvature-method, 简称为 MAXC)方法和拟合度分别为 90% 和 95% 的拟合优度(goodness-of-fit, 简称为 GFT)方法分析云南地震区(带)的 M_c 时间演化,为地震观测台网科学布局 and 地震监测能力的提高提供科学参考。

1 研究方法

假定震级不小于 M_c 的地震在震级—频度分布上满足 G-R 关系 (Gutenberg, Richter, 1944), 即

$$\lg N = a - bM. \quad (1)$$

并认为这些地震的记录是完整的 (Wiemer, Wyss, 2000; Cao, Gao, 2002; Marsan, 2003; Woessner *et al.*, 2005; Amorèse, 2007)。(1) 式中, N 是 $\geq M$ 的累积地震数, a 和 b 为常数, 当震级—频度分布中能够最好地满足 G-R 关系时对应的最小起始震级即为 M_c 。具体而言, 确定最小起始震级的方法包括“完整性震级范围”(entire-magnitude-range, 简称为 EMR)方法 (Woessner, Wiemer, 2005)、“最大曲率”MAXC 方法和拟合度分别为 90% 和 95% 的 GFT 方法 (Wiemer, Wyss, 2000) 等。

在基于 G-R 关系的统计地震学方法中,前人研究更多关注最小起始震级的确定,在高震级端则考虑不多。实际上,由于数据有限,在 M_c 空间分布特征等研究中,观测到的地震震级—频度分布往往会在高震级段出现对 G-R 线性关系的偏离,对 M_c 的确定产生影响。这种高震级端相对 G-R 关系拟合结果偏少和偏多的情况分别对应地震的亚临界状态和超临界状态 (Main, 1996)。因此,我们不但需要对网格化空间格点逐一核对震级—频度的分布、G-R 关系拟合情

况,还需考虑震级上限的合理选取问题。为此,笔者采用了基于 G-R 关系的交互式分析方法,其具体步骤如下:

(1) 在给定时空范围内对震级—频度分布进行线性最小二乘拟合,采用交互式操作,选定初始的完整性震级上限 $M_{\max 0}$ 和下限 $M_{\min 0}$ 。

(2) 分别在高于和低于 $M_{\max 0}$ 和 $M_{\min 0}$ 增选 5 个震级档,两两组合限定震级—频度分布范围,并进行最小二乘拟合,计算各种组合对应的拟合均方根残差 RMS。

(3) 选择 RMS 最小值对应的最小完整性震级上限 $M_{\max 1}$ 和下限 $M_{\min 1}$, 此时 $M_c = M_{\min 1}$ 。在分区的 M_c 时间演化特征研究中,由于各构造分区的空间限制小、地震数据相对较多,研究中同时使用了“最大曲率”MAXC 方法和拟合度分别为 90% 和 95% 的 GFT 方法。其中 MAXC 方法是将在震级—频度分布曲线的一阶导数的最大值对应的震级作为 M_c , 而 GFT 方法是通过搜索实际和理论震级—频度分布下的拟合度百分比来确定 M_c 。同时采用 90% 和 95% 的拟合度 GFT 方法,这里分别称为 GFT95% 和 GFT90% 以示区别。通过设定优先级为 GFT95% > GFT90% > MAXC, 选取可计算且优先级高的 M_c 结果作为最终结果,该方法称为多参数方法。

2 资料

2.1 云南地震观测台网

1957 年昆明地震台建成投入观测,使云南的地震观测进入了仪器观测时代;1964 年底地球物理研究所西南工作站开始筹建“西南控制台网”;1968 年底建成以川滇交界渡口为中心,是当时全国规模最大的区域台网;1970 年台网一分为二,北部属四川地震台网、南部属云南地震台网 (皇甫岗等, 2010)。1970~2011 年,云南区域地震台网由 13 个增加到 63 个^①。图 1 给出了云南地区 1970 年以来固定地震观测台站数量和年地震频度 ($M_L \geq 0.1$) 的时间变化,地震台站数量总体呈增长趋势,期间也存在模拟观测到数字观测转换、无线传输子台信号干扰停测等原因导致的台站数

① 云南省地震局. 云南地震目录 (1965~1975, 1976~1980, 1981~1983, 1984~1986, 1987~1988, 1989~1990, 1991~1993, 1994~1996, 1997~2001)。

量的起伏变化。总体来看，年地震频度随着台站数量的增减呈准同步变化，表明台网监测能力的提高与台站数量增加有较大关系。此外，年地震频度存在一定程度的起伏，可能与地震活动水平有关，如 1976 年、1988 年、1989 年地震频度明显高于同期地震频度数，可能与 1976 年 5 月 29 日龙

陵 7.3、7.4 级地震，1988 年 11 月 6 日澜沧—耿马 7.6、7.2 级地震活动有关。

云南区域地震台网的发展大致可分为 5 个阶段：第 1 阶段（1970 ~ 1975 年）：区域地震台逐步建设阶段，台站数量由 13 个扩建为 23 个（图 2a）；第 2 阶段（1976 ~ 1984 年）：电信传输地震

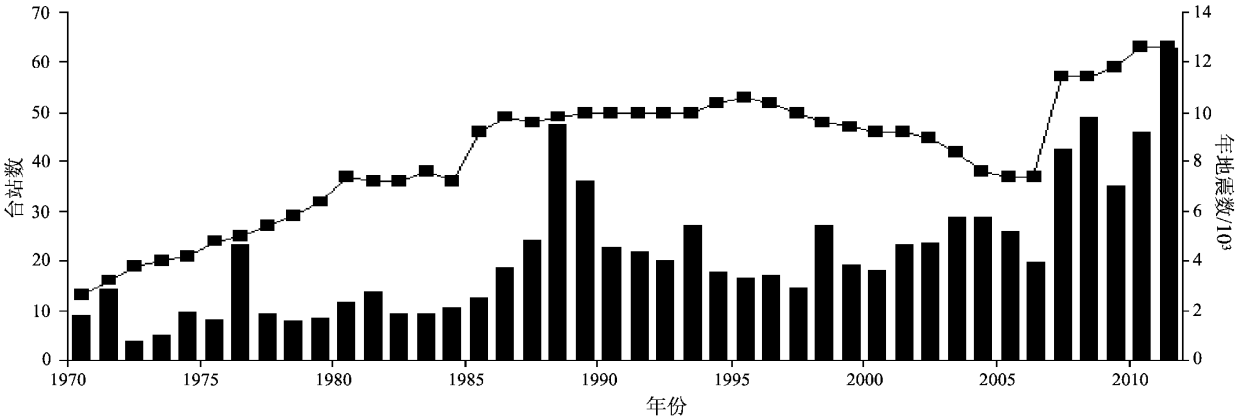


图 1 1970 年以来云南地区固定地震观测台站数量和年地震数 ($M_L \geq 0.1$) 随时间变化
Fig. 1 Number of the fixed seismic station and annual $M_L \geq 0.1$ earthquakes varying with time in Yunnan region since 1970

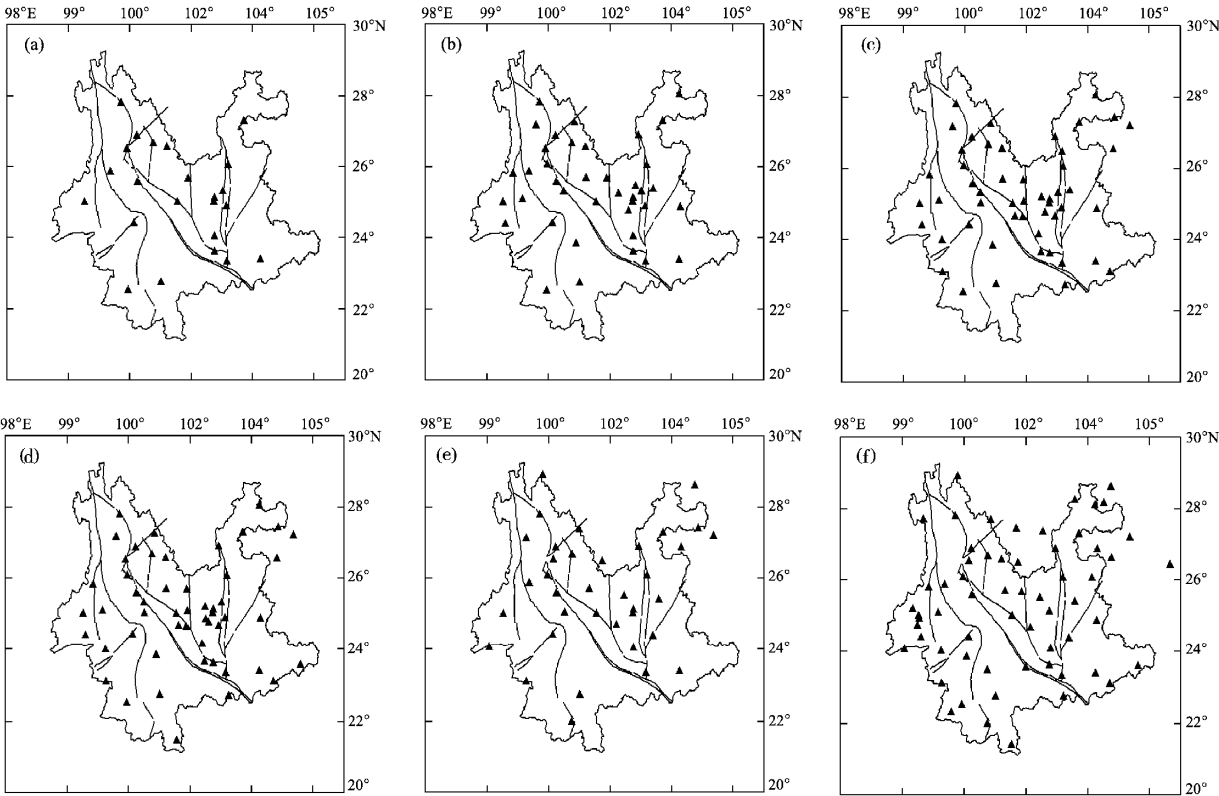


图 2 不同时段云南地区地震观测台站分布图
(a) 1970 ~ 1975 年；(b) 1976 ~ 1984 年；(c) 1985 ~ 1996 年；(d) 1997 ~ 2004 年；
(e) 2005 ~ 2006 年；(f) 2007 ~ 2011 年

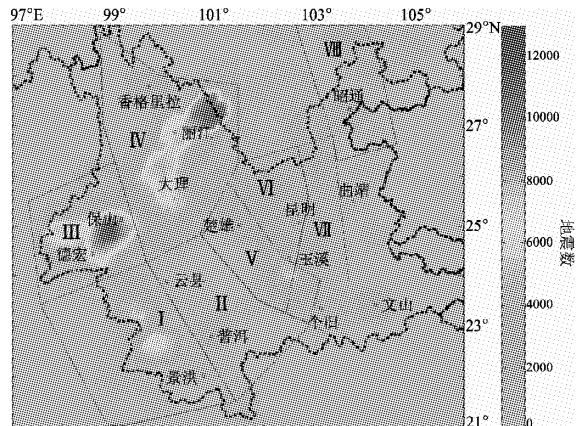
Fig. 2 Distribution of seismic observation stations in different development period in Yunnan region

台网建设阶段,为改善云南区域地震监测台网布局,1976年正式筹建云南电信传输地震台网,到1984年昆明区域遥测地震台网整体建成(皇甫岗等,2010),台站数量由24个增加为36个(图2b);第3阶段(1985~1996年):区域遥测地震台网观测阶段,有线传输和无线传输子台发挥监测效能,可以更快地检测地震事件,在线和实时自动检测与分析台网内及其邻近地区的地震,进行大震速报,这一阶段参与地震定位的台站总数可达到52个(图2c);第4阶段(1997~2007年):数字地震台网建设阶段。1997年开始,逐步建成由26台数字地震仪构成的昆明数字地震遥测台网,成为我国第一个区域数字地震遥测台网(皇甫岗等,2010),使观测技术提高到了一个新的水平。但是1997~2004年期间,云南正式地震目录的产出仍以电信传输地震记录为主,数字地震记录为辅;2005~2006年全面启用数字地震记录,同时纳入了南北地震带强化震情跟踪建设的云南及邻近地区数字地震记录,地震定位所用台站数量达37个。为了客观反映云南地区 M_c 的变化情况,本文将第4阶段分为1997~2004年(图2d)和2005~2006年(图2e)2个时段分别进行分析;第5阶段(2007~2011年):云南“十五”数字化台网建设阶段。2007年建成由46个24位数字化地震仪构成的云南“十五”数字化台网,再加上网缘四川省和贵州省台站,2007年台站数量为57个;随着网缘更多台站和腾冲火山数字化测震台网子台数据的共享,2011年云南地震定位所用台站数量达到63个,极大地提升了云南地区地震监测能力(图2f)。

2.2 云南地区地震活动分布

本文选取云南地区($21^{\circ} \sim 29^{\circ}N$, $97^{\circ} \sim 106^{\circ}E$)地震目录研究 M_c 空间分布特征。由于地震活动分布和台站布设的区域差异较大,本文以地震区(带)为单元,分析不同区域 M_c 时间变化特征,为地震台网科学布局的分区策略研究提供参考。根据云南地区地震地质构造和地震分布特点,可以分成8个主要地震活动区(带)(闻学泽,易桂喜,2003),分别是澜沧—耿马区、思普区、腾冲—龙陵、大理—丽江—盐源区、楚雄—建水带、元谋区、小江带、马边—昭通带(图3)。1970~2011年云南地区共记录地震182 422次(含余震),其中0~0.9级10 475次,1.0~1.9级93

319次,2.0~2.9级62 696次,3.0~3.9级13 932次,4.0~4.9级1 704次,5.0~5.9级250次,6.0~6.9级38次,7.0~7.9级8次。大理—丽江—盐源区、腾冲—龙陵地震密度最高,澜沧—耿马区次之。



I: 澜沧—耿马区; II: 思茅—普洱区; III: 腾冲—龙陵; IV: 大理—丽江—盐源区; V: 楚雄—建水带; VI: 元谋区; VII: 小江带; VIII: 马边—昭通带

图3 云南地区地震密度分布和地震带(区)划分
Fig. 3 Distribution of earthquake density and division of seismic zones in Yunnan region

3 M_c 的空间分布特征

为研究 M_c 的空间分布特征,笔者采用 $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ 对研究区进行网格化,挑选以网格格点为圆心、半径为40 km范围的地震进行基于G-R关系的交互式分析方法计算,对地震数少于50次的网格不计算。

图4给出了基于G-R关系的交互式分析方法的示例(对应 $25.0^{\circ}N$, $99.4^{\circ}E$ 的网格点)。图4a为震级—频度分布和 $M_{\max 0}$ 与 $M_{\min 0}$ 的确定示意图,图4b为各种 $M_{\max 0}$ 与 $M_{\min 0}$ 组合对应的RMS分布。由图4b可见,当 $M_{\min 0} = M_L 1.1$ 和 $M_{\max 0} = M_L 4.2$ 时RMS有最小值,由此可判定 $M_c = M_L 1.1$ 。但是,在小样本事件的 M_c 分析中,如果不考虑高震级段 $M_{\max 0}$ 的选取, M_c 的结果将存在较大差别(当 $M_{\max 1}$ 固定为最大震级 $M_L 4.6$ 时, $M_c = M_L 1.0$)。

图5给出了不同时段云南地区 M_c 的空间分布。由图5a可见,1970~2011年在腾冲—龙陵、大理—丽江—盐源区、楚雄—建水带、元谋

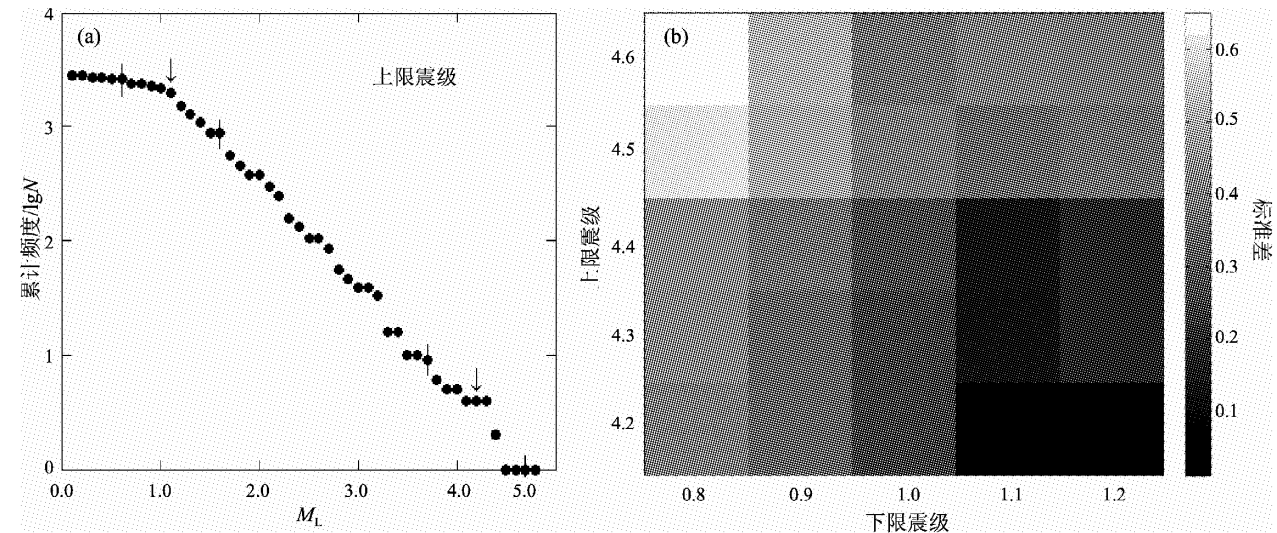


图 4 基于 G-R 关系的交互式分析方法的示例

(a) 震级—频度分布和 M_{max0} 与 M_{min0} 的确定; (b) M_{max0} 与 M_{min0} 组合对应的 RMS 分布

Fig. 4 Demonstration of alternation analyze method based on G-R relation

(a) Magnitude-frequency relation and determination of M_{max0} and M_{min0} ; (b) Combination of M_{max0} and M_{min0} corresponding to the distribution of RMS

区和小江带 M_c 值最小; 澜沧—耿马区、思普区和马边—昭通带较高; 中缅、中老和中越交界一带最高, 这与地震台网分布的密集程度一致。

图 5b ~ g 给出了分时段云南地区 M_c 的空间分布, 各时段的划分与图 2 一致。总体而言, 云南地区 M_c 明显减小, 由 $M_L 2.5$ 左右减小为 $M_L 1.5$ 左右; 若排除部分网格点地震数目少于 50 次不能计算的因素, 具有监测能力区域的覆盖面积逐时段明显扩大, 表明云南地区整体监测能力得到明显提升。1970 ~ 1975 年大理—丽江—盐源区、元谋区和通海—建水一带 M_c 可达 $M_L 2.0 \sim 2.5$, 其余区 (带) M_c 在 $M_L 3.0$ 左右或不能给出 M_c 值。1976 ~ 1984 年思普区和腾冲—龙陵地区 M_c 达 $M_L 2.5$ 左右, 其余区 (带) 可达 $M_L 2.0$ 左右。1985 ~ 1996 年大理—丽江—盐源区、楚雄—建水带、元谋区、小江带、马边—昭通带可以监测 $M_L 2.0$ 以下的地震, 澜沧—耿马区、思普区和腾冲—龙陵地区可以监测 $M_L 2.5$ 左右的地震。1997 ~ 2004 年 M_c 变化最为明显的是澜沧—耿马区、思普区和腾冲—龙陵地区, 由 $M_L 2.5$ 左右减小为 $M_L 2.0$ 或 $M_L 1.5$ 左右。2005 ~ 2006 年云南省 M_c 提升为 $M_L 2.0$ 以下。2007 ~ 2011 年云南省 M_c 可控制在 $M_L 1.5$ 左右, 川、滇、黔交界地区及中缅、中挝、中越交界地区 M_c 可控制在 $M_L 2.0$ 左右。

4 最小完整性震级 M_c 的分区时间演化分析

对云南地区及地震区 (带), 分别采用多参数方法分析 M_c 时间演化特征。根据各地震区 (带) 地震数的不同调整地震事件窗口, 并滑动计算。云南地区及 8 个地震区 (带) 分别采用了 12 000, 1 320, 500, 2 460, 600, 920, 742, 820, 580 次地震作为事件窗, 为了给出研究区域较为合理的 M_c 时序变化, 这里按照 $GFT95\% > GFT90\% > MAXC$ 的优先级选择每次滑动计算结果, 选择后的 M_c 如图 6 中标注为 M_c -Best 的黑色曲线所示。

由图 6a 可见, 云南地区 M_c 呈逐渐下降趋势, 大致可以划分为两个阶段: ① 1970 ~ 2003 年 M_c 在 $M_L 1.5 \sim 3.5$ 范围内变化, 其中 1970 ~ 1997 年 M_c 在 $M_L 1.5 \sim 2.5$ 之间起伏变化较大, 1998 ~ 2003 年 M_c 在 $M_L 2.5 \sim 1.5$ 呈现显著的趋势下降变化; ② 2004 ~ 2011 年 M_c 约为 $M_L 1.0 \sim 2.0$, 其中 2004 ~ 2007 年 M_c 约为 $M_L 1.8$, 2008 ~ 2011 年 M_c 约为 $M_L 1.5$, M_c 的变化与云南区域地震台网的发展有较大的关系, 其中 1998 年开始云南部分数字地震观测台站作为辅助进行地震定位, 2004 年 12 月开始区域数字地震台站正式用于地震定位; 2008

年云南“十五”数字地震台网正式投入运行。

由图 6b 给出的澜沧—耿马区 M_c 时序变化曲线可见, 1985~1989 年 M_c 大致由 $M_L3.5$ 减小为 $M_L2.0$, 1990~2003 年 M_c 在 $M_L2.0 \sim 3.5$ 之间波动变化, 2004~2011 年 M_c 约为 $M_L1.5 \sim 2.5$, 思普区 1970~1989 年 M_c 约为 $M_L2.0 \sim 4.0$, 1990~2007 年 M_c 约为 $M_L2.0 \sim 3.0$, 2008~2011 年 M_c 约为 $M_L1.0 \sim 2.0$ (图 6c); 腾冲—龙陵地区 1970~2001 年 M_c 约为 $M_L2.5 \sim 3.0$, 2002~2005 年 M_c 大致由 $M_L2.5$ 降为 $M_L1.5$, 2005~2011 年 M_c 约为

$M_L1.0 \sim 2.0$ (图 6d); 大理—丽江—盐源区 1970~1998 年 M_c 约为 $M_L2.0$ 左右, 1999~2004 年 M_c 约为 $M_L1.5 \sim 2.0$, 2005~2011 年 M_c 约为 $M_L1.0 \sim 1.5$; 楚雄—建水带 (图 6f) 1970~1992 年 M_c 大致由 $M_L3.0$ 减小 $M_L1.5$, 1993~2008 年 M_c 约为 $M_L1.5 \sim 2.5$, 相对于 GFT90% 和 MAXC 分析方法, GFT95% 方法给出的滑动计算结果波动较大, 2009~2011 年 M_c 约为 $M_L1.5$ (图 6e); 元谋区 1970~2011 年 M_c 约为 $M_L1.0 \sim 2.0$ (图 6g)。小江带 1970~2000 年 M_c 约为 $M_L1.5 \sim 2.5$, 2001~2011

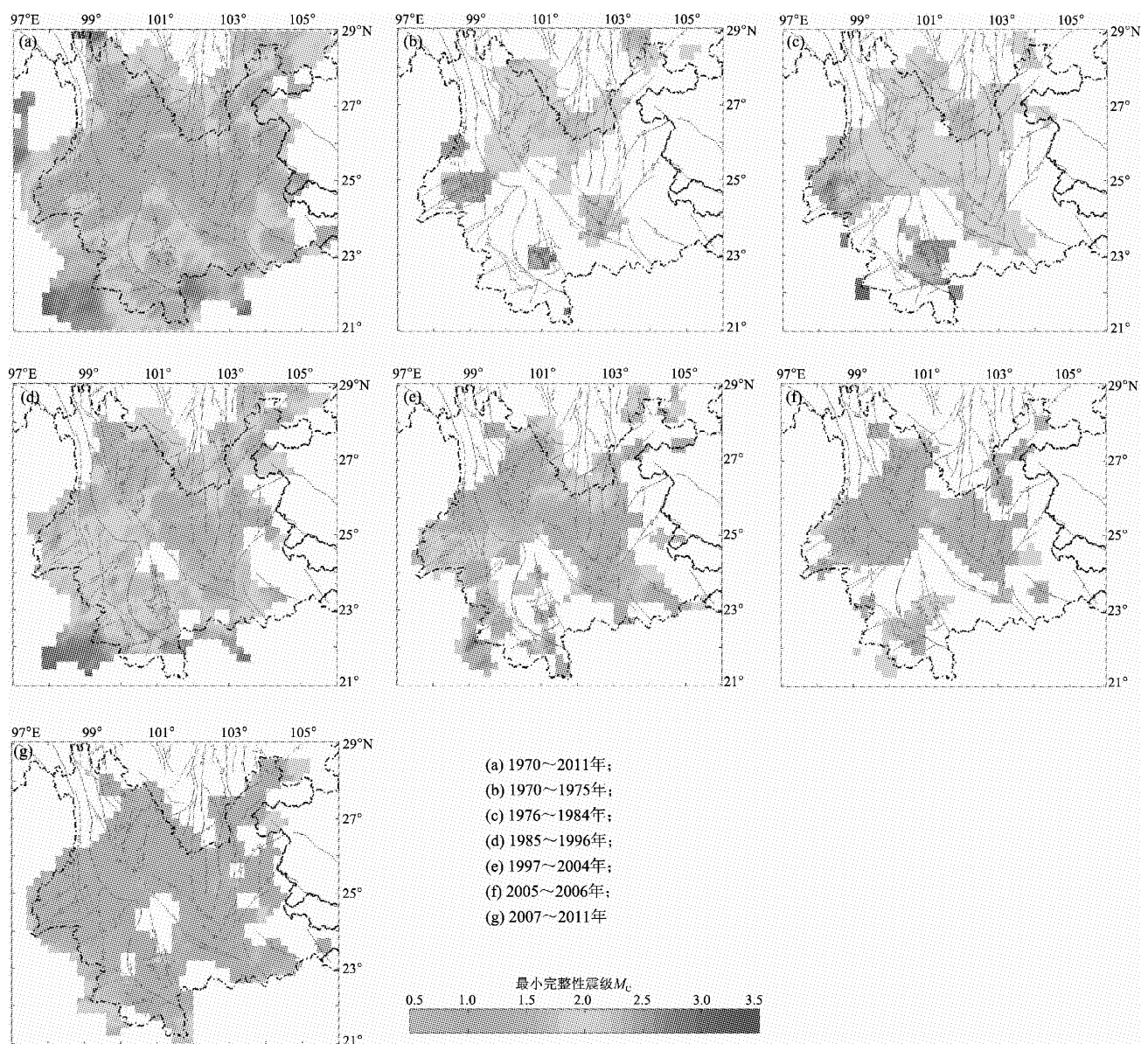


图 5 云南地区不同时段 M_c 的空间分布
(a) 1970~2011 年; (b) 1970~1975 年; (c) 1976~1984 年; (d) 1985~1996 年;
(e) 1997~2004 年; (f) 2005~2006 年; (g) 2007~2011 年

Fig. 5 Spatial distribution of M_c in different development periods in Yunnan region

年 M_c 约为 $M_L1.5$ (图 6h); 马边—昭通带 1970 ~ 2003 年 M_c 约为 $M_L1.5 \sim 2.5$, 2004 ~ 2009 年 M_c 在 $M_L1.0 \sim 2.0$ 之间波动变化, 2010 ~ 2011 年 M_c 约为 $M_L1.5 \sim 2.0$ (图 6i)。

5 讨论与结论

笔者采用了基于 G-R 关系的交互式统计地震学方法计算的 M_c 值空间分布特征与苏有锦等 (2003) 利用基于 G-R 关系的震级—频度分布方法计算得到的川滇地区 M_c 空间分布大体一致, 但笔者根据云南地震台网发展的不同阶段给出了更

为细化的空间变化特征, 而且所采用的交互式分析方法考虑了在地震数量有限情况下高震级端引起的 M_c 计算不确定性。但基于 G-R 关系的统计地震学方法研究, 相关结果仍需与其它计算方法的结果进行对比分析。

M_c 的空间分布特征表明, M_c 值最小的区域为 20 世纪 60 年代开始台站布设密度较高的区域, 如大理—丽江区、楚雄—建水带、小江带等, 这些区域及附近地区“十五”期间建设了环洱海数字化测震台网 (5 台)、昆明市数字化测震台网 (8 台)、曲靖市数字化测震台网 (5 台)、腾冲火山数字化测震台网 (8 台) 等小型台网 (皇甫岗等,

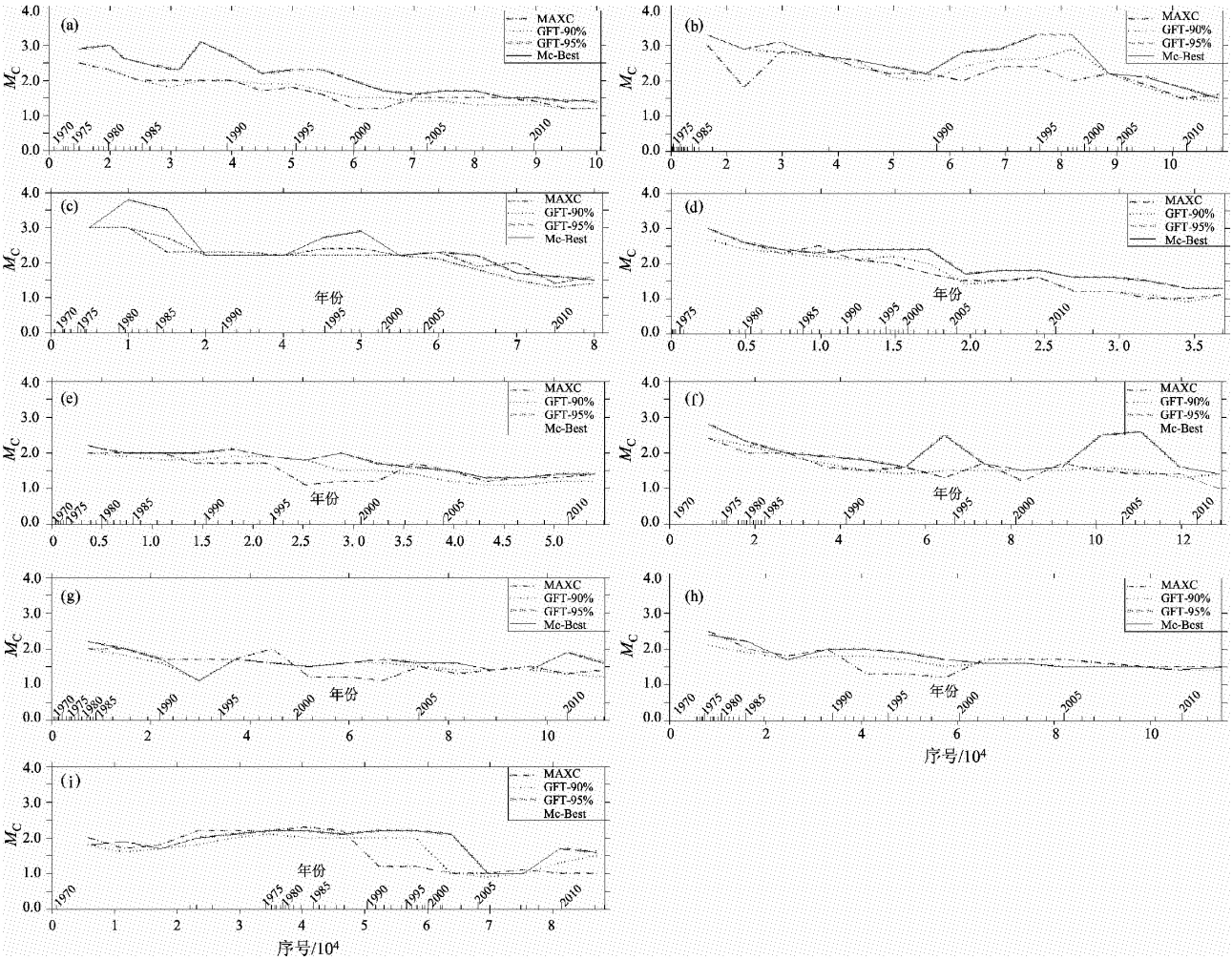


图 6 云南地区及各地震区 (带) M_c 的时间演化

(a) 云南地区; (b) 澜沧—耿马区; (c) 思茅—普洱区; (d) 腾冲—龙陵; (e) 大理—丽江—盐源; (f) 楚雄—建水带; (g) 元谋区; (h) 小江带; (i) 马边—昭通带

Fig. 6 Temporal variation of M_c in Yunnan region and every seismic zone

(a) Yunnan region; (b) Lancang-Gengma zone; (c) Simao-Pu'er zone; (d) Tengchong-Longling zone; (e) Dali-Lijiang-Yanyuan zone; (f) Chuxiong-Jianshui zone; (g) Yuanmou zone; (h) Xiaojiang zone; (i) Mabian-Zhaotong zone

2010)。若将小型台网运用于云南区域地震监测,必将进一步提升地震定位能力。腾冲火山数字化测震台网现已在区域地震定位中发挥了重要作用,如2008年8月21日盈江5.9级地震序列 $M_c = 2.1$,而2011年3月10日盈江5.8级地震序列 $M_c = 1.3$ 。滇东北川滇交界、滇西北川滇藏交界地区 M_c 较高,是因为这些区域测震台站数量较少,但是经过“十五”建设,川滇交界地区数据共享,进一步将昭通市数字化测震台网(7台)用于区域地震定位,必将提升该区的地震监控能力。在几十年的台站建设过程中,思普区、澜沧—耿马区属台站布设较稀、监控能力较弱的区域,但该区的水库数字化测震台网,如景洪(4台)、溪洛渡(18台)、金安桥(9台)、糯扎渡(12台)等(皇甫岗等,2010)在区域地震定位中有待进一步发挥作用,台站建设也需进一步提升和完善。

对 M_c 时空特征分析结果表明, M_c 的时间演化特征总体一致,如大理—丽江—盐源区利用交互式分析方法和多参数方法给出的 M_c 值总体一致。实际上,采用不同原理的计算方法得到的 M_c 之间仍可能存在一定偏差(Nanjo *et al.*, 2010),如交互式分析方法计算得到楚雄—建水带自1985年开始 M_c 可控制在 $M_L 2.0$ 以下,至2008年 M_c 可控制在 $M_L 1.5$ 左右,多参数方法计算结果表明1993~2008年 M_c 在 $M_L 1.5 \sim 2.5$ 之间波动变化较大,这可能是观测资料和资料处理的区域非均匀性影响 M_c 的结果。因此在地震危险性分析中尽量使用较小 M_c 的情况下,这些复杂性仍需考虑。此外,由于计算方法依赖于地震事件数目是否足够,一些地震活动率较低地区未得到计算结果。在分区 M_c 的时间演化研究中,由于是基于定量结果的定性讨论,具体的 M_c 数值仅能反映区域的平均结果,这些都是本研究中的局限。

笔者通过整理1970年以来云南地区地震观测发展历史、现状和台网台站布设,根据台站数量与年地震数关系,将台网的发展分为6个时间段,采用基于G-R关系的交互式分析方法,分别研究了6个时段的 M_c 空间分布特征,采用多参数方法研究了分区的 M_c 时间演化特征。结果表明,云南区域地震台网发展不同时段 M_c 的空间分布存在较大的非均匀性,大理—丽江—盐源区、元谋区、小江带等区(带)监测能力较好,澜沧—耿马区、思普区等区(带)监测能力较低。云南“十五”

区域数字地震台网运行以来,云南省 M_c 可达 $M_L 1.5$ 左右,如大理—丽江—盐源区 M_c 可控制在 $M_L 1.0 \sim 1.5$,小江带 M_c 约为 $M_L 1.5$,腾冲—龙陵区 M_c 可控制在 $M_L 1.0 \sim 2.0$,澜沧—耿马区 M_c 可控制在 $M_L 1.5 \sim 2.5$,思普区 M_c 约为 $M_L 1.0 \sim 2.0$ 。对澜沧—耿马区、思普区、腾冲—龙陵区、大理—丽江—盐源区、楚雄—建水带、元谋区、小江带、马边—昭通带 M_c 时间变化特征分析结果,还可为各地震区(带)开展地震危险性分析等工作提供参考。

参考文献:

- 郭颢,刘启元,陈九辉,等.2002.首都圈数字地震台网的微震定位实验[J].地震地质,24(3):453-460.
- 皇甫岗,陈颢,秦嘉政,等.2010.云南地震活动性[M].昆明:云南科技出版社.
- 蒋长胜,吴忠良,李宇彤.2008.首都圈地区“重复地震事件”及其在区域地震台网定位精度评价中的应用[J].地球物理学报,51(3):817-827.
- 孟玉梅,赵永,王斌.2001.中国地震观测台网地震速报定位偏差的分析[J].地震,21(3):65-69.
- 苏有锦,李永莉,李忠华,等.2003.川滇地区区域地震目录完整性最小震级分析[J].地震研究,26(增刊):10-16.
- 闻学泽,易桂喜.2003.川滇地区地震活动统计单元的新划分[J].地震研究,26(增刊):1-9.
- Amorèse D.2007. Applying a change-point detection method on frequency-magnitude distributions[J]. BSSA,97(5):1742-1749.
- Bartal Y, Somer Z, Leonard G, *et al.* 2000. Optimal seismic networks in Israel in the context of the comprehensive Test Ban Treaty[J]. BSSA, 90(1):151-165.
- Cao A M, Gao S S. 2002. Temporal variation of seismic b-values beneath northeastern Japan island arc[J]. Geophys Res Lett, 29(9):1334, doi:10.1029/2001GL013775.
- Doufexopoulou M, Korakitis R. 1992. Resolution analysis of seismic networks[J]. Phys Earth Planet Interi, 75(1-3):121-129.
- Enescu B, Ito K. 2002. Spatial analysis of the frequency-magnitude distribution and decay rate of aftershock activity of the 2000 Western Tottori earthquake[J]. Earth Planet Space, 54:847-859.
- Gomberg J, Reasenber P, Bodin P, Harris R. 2001. Earthquake triggering by seismic waves following the Landers and Hector Mine earthquakes [J]. Nature, 411(6836):462-466.
- Gutenberg R, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California [J]. BSSA, 34:185-188.
- Knopoff L. 2000. The magnitude distribution of declustered earthquakes in Southern California [J]. Proc Nat Acad Sci, 97(22):11 880-11 884.
- Main I G. 1996. Statistical physics, Seismogenesis, and seismic hazard [J]. Rev Geophys, 34(4):433-462.
- Main I. 2000. Apparent breaks in scaling in the earthquake cumulative

- frequency-magnitude distribution; Fact or artifact [J]. BSSA, 90 (1): 86 – 97.
- Marsan D. 2003. Triggering of seismicity at short timescales following Californian earthquakes [J]. JGR, 108 (B5): 2266, doi: 10.1029/2002JB001946.
- Nanjo K Z, Schorlemmer D, Woessner J, *et al.* 2010. Earthquake detection capability of the Swiss Seismic Network [J]. Geophys J Inter, 181 (3): 1713 – 1724.
- Rabinowitz N, Steinberg D M. 1990. Optimal configuration of a seismographic network: A statistical approach [J]. BSSA, 80 (1): 187 – 196.
- Stein R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence [J]. Nature, 402: 605 – 609.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States and Japan [J]. BSSA, 90 (4): 859 – 869.
- Woessner J, Hauksson E, Wiemer S, *et al.* 2004. The 1997 Kogoshima (Japan) earthquake doublet: A quantitative analysis of aftershock rate changes [J]. Geophys Res Lett, 31: L03605, doi: 10.1029/2003/GL018858.
- Woessner J, Wiemer S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty [J]. BSSA, 95 (2): 684 – 698.
- Wüster J, Rivière F, Crusem R, *et al.* 2000. GSETT – 3: Evaluation of the detection and location capabilities of an experimental global seismic monitoring system [J]. BSSA, 90 (1): 166 – 186.

Research on Minimum Magnitude of Completeness for Earthquake Catalogue in Yunnan Region

LIU Li-fang¹, LI Zhi-hai², JIANG Chang-sheng³

(1. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

(3. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China)

Abstract

We study the minimum magnitude of completeness M_C in Yunnan with intense tectonic movement, high frequent of earthquake activity and non-uniform distribution of seismic stations, which could provided useful information for seismic risk evaluation and scientific layout of seismic stations etc. . On the basis of development stage of Yunnan Regional Network (YRN), we studied the spatial distribution feature by using interactive analysis method based on the G-R relation and investigated temporal variation of M_C in 8 seismic zone in Yunnan by means of multi-parameter description. The result shows that in different stage of YRN, M_C is distributed inhomogeneously; the monitoring capability of YRN in Dali-Lijiang-Yanyuan zone, Yuanmou zone, and Xiaojiang earthquake belt is strong, but weak in Lancang-Genma zone, Simao-Pu'er belt, etc. . Since the running of YRN improved during the Tenth Five-year Plan (2001 – 2005), M_C in Yunnan reached $M_L 1.5$ or so, ranged between $M_L 1.0 - 1.5$ in Dali-Lijiang-Yanyuan zone, $M_L 1.5$ in in Xiaojiang zone, $M_L 1.0 - 2.0$ in Tenchong-Longling, $M_L 1.5 - 2.5$ in Lancang-Genma, and $M_L 1.0 - 2.0$ in Simao-Pu'er. The temporal variation of M_C for 8 seismic zones shows that adding stations and optimizing network are the effective ways for improving seismic monitoring capability in Yunnan region.

Key words: earthquake catalogue; minimum magnitude of completeness; seismic monitoring capability; magnitude-frequency distribution