

doi:10.3799/dqkx.2013.000

基于 EMR 方法的内蒙古测震台网监测能力

刘芳¹, 蒋长胜^{2*}, 张帆¹, 张文韬¹, 张晖¹, 杨彦明¹, 梁莹¹, 尹战军¹

1. 内蒙古自治区地震局, 内蒙古呼和浩特 010051
2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要: 为考察内蒙古及邻区地震监测能力的时空分布特征, 并为该地区的地球科学研究和测震台网的进一步优化布局提供科学参考, 根据内蒙古测震台网发展的各历史阶段, 分析了地震定位台站数据和台站张角的时空分布, 并采用完整性震级范围 (EMR) 方法, 研究了最小完整性震级 M_c 的时空分布特征。结果表明, 台站张角和台站数的时空演化能够定性、客观地反映内蒙古测震台网台站数量由少到多, 地震监测能力由弱到强逐步完善的发展过程。而 EMR 方法给出的 M_c 时空分布, 可定量描述内蒙古测震台网各历史时期 M_c 时空的监测能力变化。结果显示, 1990—2001 年的模拟记录期间, 呼和浩特地区 M_c 值约为 $M_L 2.0$, 与蒙古交界地区可达 $M_L 3.0$ 以上。2002—2007 年的模拟和数字化并行期间, 内蒙古中西部以及与外省交界地区监测能力有所提升。2008—2012 年的“十五”数字台网运行期间, 测震台网的建设有效克服了行政区划狭长、台站布局不合理的现状, 绝大多数地区 $M_L 2.2$ 以上地震基本完整。相关研究将为内蒙古地区地震观测系统的进一步优化布局、地震观测产品用于地震预测预报研究和地震危险性分析提供重要的参考依据。

关键词: 内蒙古; 测震台网; 震级 M_c ; 完整性震级范围; 地震; 地震学。

中图分类号: P315 **文章编号:** 1000-2383(2013)06-1356-07 **收稿日期:** 2013-02-02

Monitoring Capacity of Seismic Network in Inner Mongolia Region Based on EMR Method

LIU Fang¹, JIANG Chang-sheng^{2*}, ZHANG Fan¹, ZHANG Wen-tao¹, ZHANG Hui¹,
YANG Yan-ming¹, LIANG Ying¹, YIN Zhan-jun¹

1. Seismological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China
2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: In this paper monitoring capacity of Inner Mongolia seismic network is evaluated, aiming at offering information for scientific layout of seismic stations. We analyze the temporal and spatial character of record stations number, maximum station coverage azimuth and minimum magnitude of completeness (M_c) based on the observation reports and catalogues in Inner Mongolia regions. The results reflect the development of the monitoring capacity. The M_c in Hohhot region was around $M_L 2.0$ and over $M_L 3.0$ in the juncture of Mongolia and Inner Mongolia during “analogy” era (1990—2001). The monitoring capacity has been improved in the Midwest of Inner Mongolia region and the adjacent areas during “analogy digital parallel” era (2002—2007), with M_c reaching as low as $M_L 2.2$ in most of Inner Mongolia and its adjacent areas during “digital” era and the 10th five-year project period (2008—2012) because the layout of stations is more reasonable and the influence of long narrow region shape has been overcome. This study facilitates the future seismic activity analysis and the seismic hazard assessment in this region.

Key words: Inner Mongolia; seismic network; magnitude; entire-magnitude range (EMR); earthquakes; seismology.

区域地震台网监测能力的科学评估, 是进行区域地震活动和地震危险性分析, 以及其他地球科学研究的重要基础。作为表征区域地震台网监测能力最重要的物理量——最小完整性震级 (Minimum

基金项目: 地震科技星火计划 (No. XH026Y); 国家国际科技合作项目 (No. 2012DFG20510)。
作者简介: 刘芳 (1963—), 女, 高级工程师, 主要从事地震监测、地震预报及地震编目工作。E-mail: 617188212@qq.com
* 通讯作者: 蒋长胜, E-mail: Jiangcs@cea-igp.ac.cn

Magnitude of Completeness, M_c)是指地震 100% 被地震台网记录到的震级水平(Rydelek and Sacks, 1989; Taylor *et al.*, 1990; Wiemer and Wyss, 2000),在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(Stein, 1999)、地震定标率研究(Knopoff, 2000)、时间相依的地震危险性分析(Wiemer and Wyss, 2002)、余震序列研究(Enescu and Ito, 2002; Woessner *et al.*, 2004)等研究中直接决定了结果信度. 由于地震台站空间分布的非均匀性、震相数据信噪比的时空复杂变化和定位过程中观测数据的人为选择等因素,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(Woessner and Wiemer, 2005; 蒋长胜等, 2008), M_c 的一个微小变化,可导致完整性震级以上的地震数目发生显著变化. 因此科学评估 M_c 是衡量地震台网监测能力、进行台网科学布局的,以及大多数地震活动和地震危险性分析中最关键因素之一.

内蒙古自治区横跨我国西北、华北和东北地区,该地区地质构造复杂、地震活动较为强烈(曹刚, 2001). 1954 年 2 月 11 日包头地震台正式投入运行起,内蒙古区域地震台网经过“九五”、“十五”和“十一五”建设,地震监测能力显著提升,地震观测事业得到长足发展. 由于位处边疆地区,内蒙古区域地震台网在我国地震监测、国防建设中发挥了重要作用. 但由于地震台网建设受到地域辽阔、地形狭长、行政区域划分不规则等限制,地震监测能力存在明显的区域不均衡,为从事该地区的地球科学研究带来复杂性. 本研究将在对内蒙古区域地震台网观测资料、台网分布特征的系统分析基础上,利用“完整性震级范围”(Entire-Magnitude-Range, EMR)方法(Woessner and Wiemer, 2005),考察 M_c 的时空分布特征,讨论影响其变化的主要因素,为该地区的地震台网优化布局、监测能力科学评估和地球科学研究提供基础参考.

1 内蒙古测震台网和观测资料

内蒙古区域地震台网的发展可分为 3 个阶段,第 1 阶段:1972—2001 年的模拟记录阶段. 该时期相继建成了包头、呼和浩特、乌加河、百灵庙等 14 个台站. 1979 年经国务院批准从东北三省和宁夏回族自治区接收满洲里、海拉尔、乌兰浩特等 12 个地震台,为加强呼和浩特—包头地区的大震速报,1986

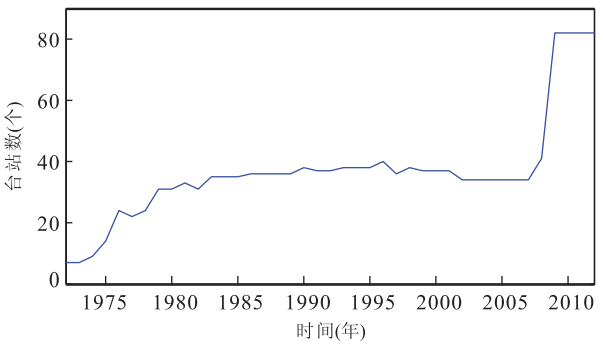


图 1 1972—2012 年内蒙古台网台站数随时间变化曲线
Fig. 1 The curve of numbers of earthquake stations variation with time

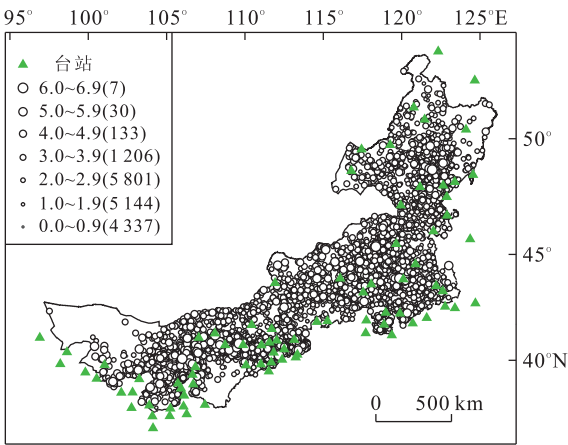


图 2 1976—2012 年内蒙古测震台网台站分布和 $M_L 0.0$ 以上地震的空间分布
Fig. 2 The distribution of earthquake and seismic stations in Inner Mongolia and adjacent areas

年新建成由 7 个遥测地震台和 1 个记录中心组成的呼和浩特地震遥测台,这个阶段地震台由 1972 年的 7 个台站增加到 34 个台站. 第 2 阶段:2002—2007 年模拟与数字并行阶段. 完成了 15 个数字化台站改造,同时建成呼和浩特数字台网,共计 34 个地震台. 第 3 阶段:2008 年以来“十五”数字化完成阶段. 形成区内测震台站 39 个,连同并入的甘肃、宁夏、山西、河北、吉林、辽宁、黑龙江七邻省 43 个台站,共计 82 个台站,实现了全区地震监测数字化. 台站数随时间的变化如图 1 所示,由图可见,2008 年以来“十五”数字化完成后,内蒙古测震台网的台站数量得到显著增加. 本研究使用了内蒙古测震台网 1976—2012 年地震目录和观测报告,相关资料的基本情况详见刘芳等(2013),相应的 0 级以上地震事件和使用的地震台站空间分布如图 2 所示.

2 台网布局对监测能力的影响

2.1 定位台站张角的时空分布

地震震中被台站包围的程度是决定地震监测能力中的地震定位精度的主要因素之一,在研究中,常用台站张角 α ,即定位所用台站相对震中的方位角的最大空白角度来表示。 α 越大表明地震监测能力越低,反之越高。为描述内蒙古测震台网不同历史时期 α 的时空变化特征,本文分别考察了 α 的震级—时间演化,以及测震台网发展各历史时期的空间分布特征。

使用 1 年时间步长、0.2 个震级单位进行震级分档,计算并给出了 1976—2012 年各震级档 $\alpha \leq 180^\circ$ 事件所占比例随时间的变化图像,如图 3 所示。由图可见,相同震级档的 $\alpha \leq 180^\circ$ 地震事件比例随时间有系统增加,尤其是 2008 年之后提高显著增加,可达 70% 左右。值得注意的是,2001—2007 年的 $\alpha \leq 180^\circ$ 地震事件比例相比 1996—2000 年有所降低,这可能与在此期间进行地震台站数字化改造、台站数量有所降低有关。

为考察内蒙古测震台网发展各历史时期的 $\alpha \leq 180^\circ$ 地震事件空间分布特征,这里采用 $1^\circ \times 1^\circ$ 的空间网格划分,分别计算网格内 $\alpha \leq 180^\circ$ 地震事件比例,结果如图 3 所示。由图 4a 可见,1976—2001 年的模拟记录时期,内蒙古北部及与蒙古交界区域地震台站张角较小的地震事件比例较低,显示了较低的监测能力;2002—2007 年的模拟和数字记录并行阶段,台网经过数字化改造, $\alpha \leq 180^\circ$ 的空间网格数有所增加,但相对有限(图 4b);2008 年“十五”数字化完成后,由于台站数量的显著增加、邻省台站的并入, $\alpha \leq 180^\circ$ 的网格数明显增加,内蒙古全区的地震监测能力显著增强(图 4c)。

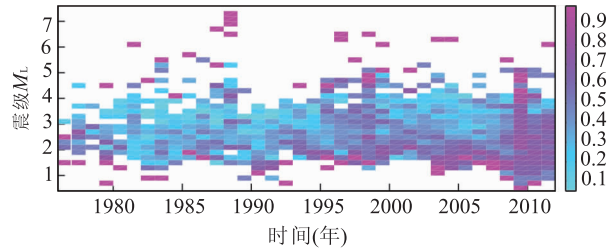


图 3 1976—2012 年内蒙古测震台网记录地震事件的台站最大张角 $\alpha \leq 180^\circ$ 随时间变化(不同颜色代表相应震级档 $\alpha \leq 180^\circ$ 地震事件比例)

Fig. 3 The change of maximum station coverage azimuth ($\alpha \leq 180^\circ$) with time (1976—2012)

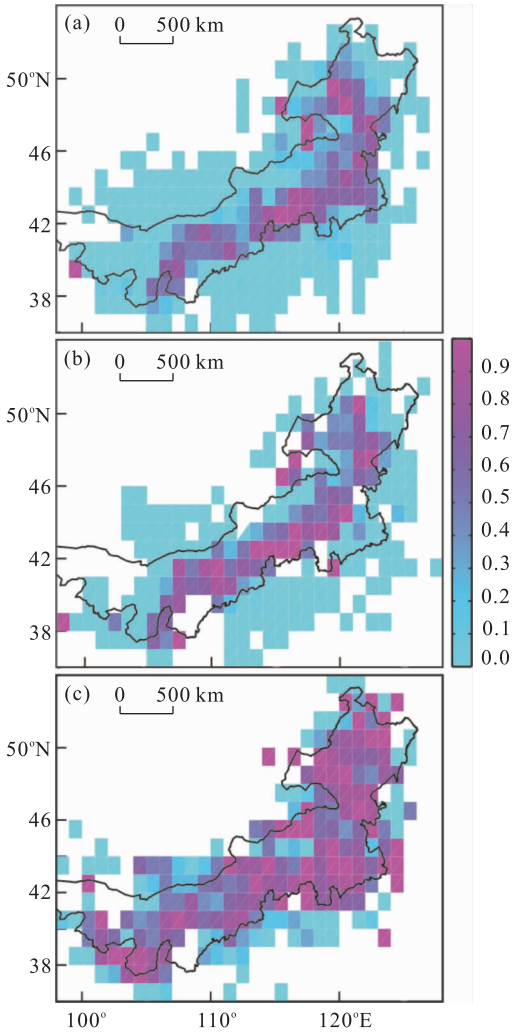


图 4 不同阶段内蒙古测震台网台站张角 $\alpha \leq 180^\circ$ 的空间分布(图中不同颜色 $\alpha \leq 180^\circ$ 的地震事件比例)

Fig. 4 The spatial distribution of station coverage azimuth ($\alpha \leq 180^\circ$) at different stages

a. 1976—2001 年; b. 2002—2007 年; c. 2008—2012 年

2.2 定位台站数的时空分布

参与地震定位的台站数的多少可一定程度反映地震监测能力的变化。对不同震级档选取 0.2 个震级单位的窗长,统计震级与参与定位台站数 N 的关系,结果如图 5 所示。由图 5a 给出的 1976—2001 年模拟记录时期和图 5b 给出的 2002—2007 年“模拟和数字化并行”期间的比较来看,地震定位所用台站数无明显差别,测震台网监测能力的改善有限。图 5c 给出的 2008 年“十五”台站数字化改造完成后,相同震级档地震定位所用台站总数显著增加,表明地震监测能力显著提升。

进一步考察各震级档地震定位台站数均值 $\bar{N}$ 随时间的变化,采用 1 年时间步长、0.2 个震级单位进行震级分档, $\bar{N}$ 随时间的变化图像如图 6 所示。

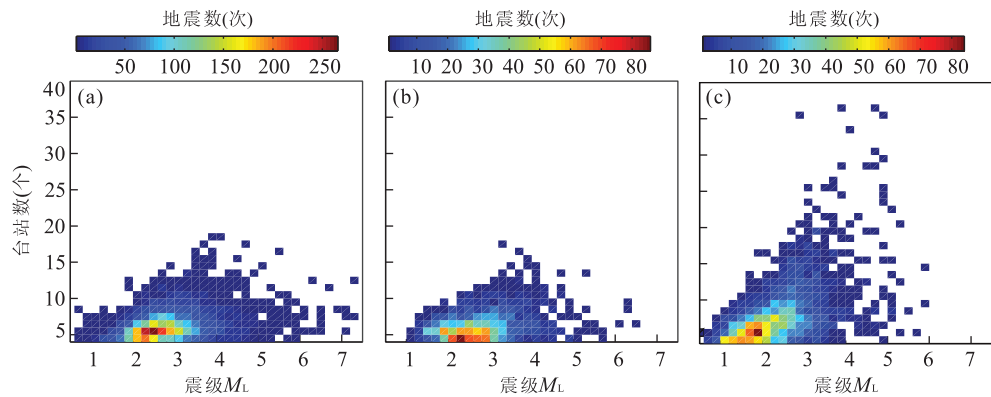


图 5 内蒙古测震台网不同阶段震级与定位所用台站数的分布关系
Fig. 5 The relationship between the magnitude and the number of used stations at different stages
a. 1976—2001 年; b. 2002—2007 年; c. 2008—2012 年

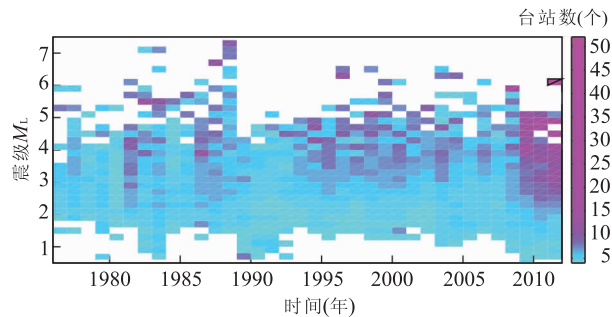


图 6 内蒙古测震台网 1976—2012 年各震级档定位台站数均值随时间的变化
Fig. 6 The change of average number of used stations with time
图中色差为所在时间段、相应震级档定位台站数均值,空白格点为定位台站 ≤ 3 个

由图可见,相同震级档 $\bar{N}$ 总体上随时间逐渐增加的,尤其是 2008 年前后显著增加, $M_L 3.0$ 地震 $\bar{N}$ 可达 10 以上,表明监测能力显著提升. 与图 4 给出的 2001—2007 年台站张角反常变化相类似,图 6 中 $\bar{N}$ 在此期间也同样出现一定程度的降低,表明台站数字化改造造成的台站数降低一定程度降低了监测能力.

3 内蒙古及邻区整体 M_c 的 EMR 方法估计

在研究内蒙古及邻区最小完整性震级 M_c 和不确定度 δM_c 的空间分布特征时,仅局限于内蒙古测震台网的观测资料会在台网的边缘部分造成分析结果的不可靠性. 由于我国的测震台网实行区域台网分别管理、资料相互整合的工作模式,因此,本研究

在考察最小完整性震级 M_c 和不确定度 δM_c 的空间分布特征时,使用了各区域台网整合后的、中国地震台网中心提供的《全国微震目录》. 分析内蒙古测震台网建台以来的改造历史,1990 年是模拟记录以来台站数最多的起始时间,因此,本文采用基于 G-R 关系的“完整性震级范围”(Entire-Magnitude-Range, EMR)方法 (Woessner and Wiemer, 2005),对 1990—2012 年 5 月 1 日期间的内蒙古及邻区整体 M_c 进行了评估.

3.1 用于 M_c 评估的 EMR 方法

基于统计地震学的 M_c 计算方法,主要基于震级不小于 M_c 的地震在震级—频度分布上满足 G-R 关系 (Gutenberg and Richter, 1944) 的假定:

$$\log_{10} N = a - bM \tag{1}$$

其中, N 为 $\geq M$ 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 . 目前,基于 G-R 关系的完整性震级范围 (Entire-Magnitude-Range, EMR) 方法 (Woessner and Wiemer, 2005) 在国际上得到广泛应用,EMR 方法为接近真实地估计 M_c ,对震级高于 M_c 的采用幂律分布,并使用最大似然法估计 a 值和 b 值,而对于震级低于 M_c 的则采用正态累积分布函数 $q(M|\mu\sigma)$ 来描述作为震级 M 函数的检测能力, $q(M|\mu\sigma)$ 表示测震台网对某一震级下检测一个地震的概率 (Woessner and Wiemer, 2005):

$$q(M|\mu\sigma) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{M_c} \exp\left(-\frac{(M-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dM, & M < M_c \\ 1, & M \geq M_c \end{cases}, \tag{2}$$

这里的 μ 是 50% 的地震被记录到时就对应的震级, σ 为相应的标准差. 其中较高的 σ 值对应台网监

测能力的快速下降. 当 $M \geq M_c$ 时检测概率为 1. 参数 μ 和 σ 采用最大似然估计. EMR 方法的最佳模型定义为数据拟合中对参数 μ, σ, a 和 b 的对数似然函数最大化. 对 M_c 的不确定度 δM_c 一般使用 bootstrap 方法 (Efron, 1979; Chernick, 1999; 韩立波等, 2012) 的蒙特卡罗近似来估计 (Schorlemmer *et al.*, 2003; Woessner and Wiemer, 2005). 由于计算 M_c 的不同方法基于的假设不同, 结果存在一定差异. Woessner and Wiemer (2005) 将 EMR 方法与其他基于 G-R 关系的方法对比研究表明, EMR 方法对理论和实际地震目录的拟合情况均好于其他方法.

3.2 M_c 的时空分布特征

受 EMR 方法对地震数目要求的限制, 本研究仅考察 1990 年以来的 M_c 时空分布特征. 利用中国地震台网中心提供的 1990/01/01—2012/05/11《全国微震目录》, 对内蒙古及邻省地区采用 EMR 方法测定 M_c , 并采用 bootstrap 方法进行 100 次重采样估算 δM_c . 结果显示, 区域内整体的 $M_c = M_L 1.9$, 如图 7 所示. 图 6 子图中还给出了估算 M_c 的最大似然值 MLE 在 $M_L 1.0 \sim 2.5$ 之间的变化情况, 为表示方便, MLE 的数值取了相反符号. 由于测震台网发展过程中地震监测能力的空间差异较大, 区域内整体的 M_c 结果不能直接用于地震活动性和地震危险性分析, 尚需进行分时段、分区域的细致研究.

为更好地研究最小完整性震级 M_c 的空间分布特征, 采用 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的空间网格划分, 以空间每个格点为圆心选择地震进行 EMR 方法计算, 设定最小空间半径 $r_{\min} = 100$ km, 最大半径 $r_{\max} = 200$ km, 地震数目下限设为 50 个, δM_c 的 bootstrap 重采样次数设为 100 次. 计算获得的 1990—2001 年、2002—2007 年、2008—2012 年 3 个时段的内蒙古及邻区 M_c 和 δM_c 空间分布, 如图 8 所示.

由图 8a 可见, 1990—2001 年的模拟记录时期, 内蒙古除呼和浩特地区 M_c 接近 $M_L 2.0$ 外, 其他地区均明显高于河北、宁夏等其他交界省份, 在西部的阿拉善等地区 M_c 可达 $M_L 3.0$ 以上. 图 8b 给出的 2002—2007 年模拟和数字化并行期间, 由于“呼和浩特数字台网”的建成, 以及省外部分台站数据的引入, 使得内蒙古中西部地区、阿拉善盟地区以及内蒙古与外省交界地区监测能力有所提升, M_c 值明显降低. 但与蒙古交界地区、锡林郭勒盟北部地区 M_c 值仍然很高. 图 8c 给出的 2008—2012 年“十五”测震台网运行期间, 内蒙古及邻区地震监测能力得到了

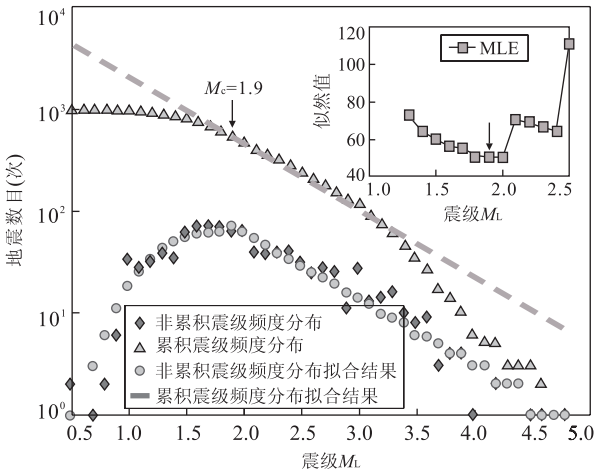


图 7 内蒙古及邻区地震目录最小完整性震级 M_c 分析
Fig. 7 Inner Mongolia and adjacent areas catalogue completeness minimum magnitude (M_c) analysis

图中分别给出了累积和非累积的震级—频度分布, 以及相应的理论拟合结果. 黑色倒三角箭头标出了 M_c 的位置, 子图中给出了 EMR 方法参数的最大似然估计值 (MLE) 在 $M_L 0.6 \sim 2.5$ 之间的变化情况

整体的大幅度提高, 有效地克服了内蒙古行政区划狭长而导致测震台站布局不合理的现状, 内蒙古及邻区的绝大多数地区 $M_L 2.2$ 以上地震基本完整.

4 结论与讨论

为科学评估内蒙古测震台网的地震监测能力, 本研究在对测震台网各发展阶段的定位台站数和台站张角的分析基础上, 采用目前国际上广泛采用的 EMR 方法, 给出了最小完整性震级 M_c 的时空分布特征. 相关研究获得如下认识.

(1) 根据内蒙古测震台网发展建设的不同阶段, 分别考察了 1976—2001 年、2002—2007 年和 2008—2012 年的各历史时期的地震定位台站张角和台站数的时空分布, 结果表明, 台站张角和台站数的时空演化能够定性、客观地反映内蒙古测震台网台站数量由少到多, 地震监测能力由弱到强逐步完善的发展过程. 相关研究可为定性评估区域测震台网监测能力的变化提供参考.

(2) 采用 EMR 方法分别考察了 1990—2001 年、2002—2007 年和 2008—2012 年的 M_c 时空分布. 结果显示, 1990—2001 年模拟记录期间, 内蒙古与外省交界地区 M_c 明显高于省内, 呼和浩特地区 M_c 值最高可达 $M_L 2.0$, 其他区域 M_c 值较大, 尤其是与蒙古交界地区可达 $M_L 3.0$ 以上. 2002—2007 年的模拟和数字化并行期间, 由于呼和浩特数字台

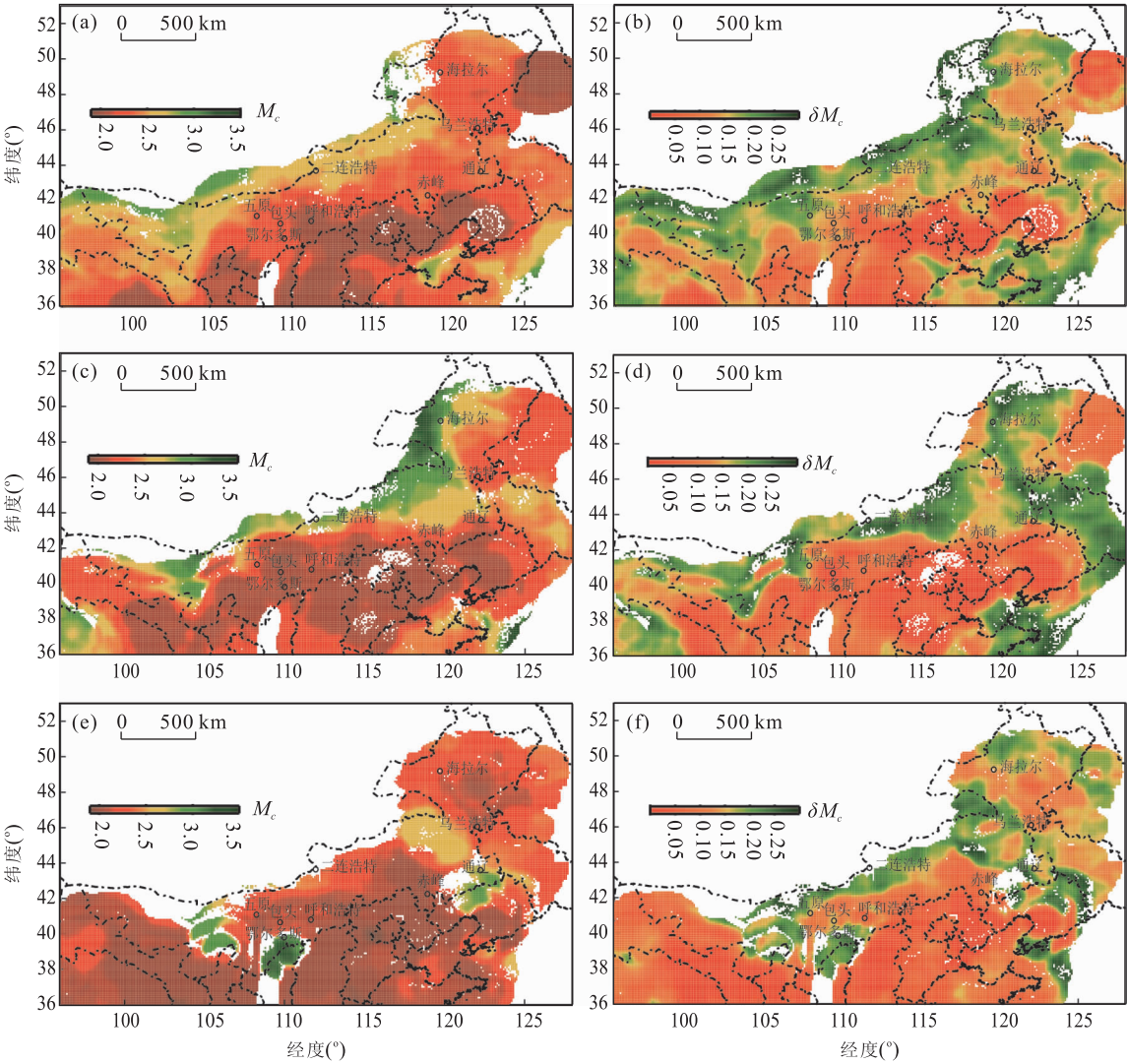


图8 内蒙古及邻区EMR方法给出的 M_c 和 δM_c 的空间分布

Fig. 8 The spatial distribution of M_c and δM_c in Inner Mongolia and adjacent areas

a, b. 1990/01/01—2001/12/31; c, d. 2002/01/01—2007/12/31; e, f. 2008/01/01—2012/5/11. a, c, e 为 M_c 的空间分布; d, e, f 为 δM_c 的空间分布

网的建成及部分台站完成数字化改造,使得内蒙古中西部地区、阿拉善盟地区以及内蒙古与外省交界地区监测能力有所提升. 2008—2012 年的“十五”数字台网建成后,内蒙古及邻区地震监测能力得到了整体的大幅度提高,有效地克服了内蒙古行政区划狭长而导致台站布局不合理的现状,绝大多数地区 $M_L2.2$ 以上地震基本完整. 相关研究将为内蒙古地区地震观测系统的进一步优化布局、地震观测产品用于地震预测预报研究和地震危险性分析提供重要的参考依据.

(3)内蒙古地区的地震监测能力受地理条件、监测能力建设的发展历史等影响,目前的监测能力仍较为有限,尽管“十五”以来内蒙古地区监测能力得到显著提升,但由图 4c 可见,对于 1.0 级以下地震,

定位所用台站数仍普遍低于 5 个,由此带来的定位精度有限,可能对该地区开展微震研究带来较大困难. 而增加地震台站数量、进一步优化台网布局仍是显著提高该地区监测能力的主要途径. 本文采用的是台网的实际数据产品对监测能力进行评估,相对于根据台站布设的空间几何等进行的理论监测能力评估不同,能够更好地反应地震监测能力的客观变化. 由于管理规定、技术规范等人为因素、区域速度模型的变化以及特殊事件发生的客观因素等均会影响真实的台网监测能力,本文所采用的 M_c 的 EMR 评估方法尚难以分辨这些特殊因素的影响. 从地震台网监测能力的广义定义上,最小完整性震级 M_c 也不能全面反映包括地震台网的定位精度等影响因素,而这些因素同时受到内蒙古地区地壳结构横向

均匀性差异较大(Zheng *et al.*, 2011)等多方面的影响,需要另行研究。此外,由于受地震事件样本限制,少震、弱震区无法给出计算结果,但并不意味着这些地区无监测能力。

致谢:本研究使用了中国地震台中提供的《全国微震目录》,内蒙古自治区地震局监测预报中心为本研究提供了区域地震台网地震目录和观测报告,稿件得到了 CSEP 中国检验中心筹备组专家的指导,研究中使用了 ETH 研发的 ZMAP 软件包,两位评审专家提出了诸多有益建议对稿件的质量提升帮助很大,在此一并表示感谢。

References

- Cao, G., 2001. Inner Mongolia Seismological Research. The Earthquake Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chernick, M. R., 1999. Bootstrap Methods, A Practitioner's Guide. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley-Interscience Publication, USA.
- Efron, B., 1979. Bootstrap Methods: Another Look at the Jackknife. *The Annals of Statistics*, 7(1): 1—26. doi: 10.1007/978-1-4612-4380-9_41
- Enescu, B., Ito, K., 2002. Spatial Analysis of the Frequency-Magnitude Distribution and Decay Rate of Aftershock Activity of the 2000 Western Tottori Earthquake. *Earth Planet Space*, 54: 847—859.
- Gutenberg, R., Richter, C. F., 1944. Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of Seismological Society of America*, 34(4): 185—188.
- Han, L. B., Jiang, C. S., Li, Y. E., et al., 2012. Minimum Magnitude of Completeness in the North-South Seismic Belt for Collaboratory Study of Earthquake Predictability. *Earthquake*, 32(1): 17—27 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, C. S., Wu, Z. L., Li, Y. T., 2008. Estimating the Location Accuracy of the Beijing Capital Digital Seismograph Network Using Repeating Events. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(3): 817—827 (in Chinese with English abstract).
- Knopoff, L., 2000. The Magnitude Distribution of Declustered Earthquakes in Southern California. *Proceedings of National Academy of Sciences*, 97(22): 11880—11884. doi: 10.1073/pnas.190241297
- Liu, F., Jiang, C. S., Yang, Y. M., et al., 2013. Material Integrity Anailys of Inner Mongolia Earthquake Networks. *The Earthquake Geomagnetic Observation and Research*, 34(1/2): 176—183 (in Chinese with English abstract).
- Rydelek, P. A., Sacks, I. S., 1989. Testing the Completeness of Earthquake Catalogues and the Hypothesis of Self-Similarity. *Nature*, 337: 251—253. doi: 10.1038/337251a0
- Schorlemmer, D., Neri, G., Wiemer, S., et al., 2003. Stability and Significance Tests for B-Value Anomalies; Example from the Tyrrhenian Sea. *Geophysical Research Letters*, 30(16): 1835. doi: 10.1029/2003GL017335
- Stein, R. S., 1999. The Rrole of Stress Transfer in Earthquake Occurrence. *Nature*, 402: 605—609. doi: 10.1038/45144
- Taylor, D. W. A., Snoke, J. A., Sacks, I. S., et al., 1990. Nonlinear Frequency-Magnitude Relationships for the Hokkaido Corner, Japan. *Bulletin of Seismological Society of America*, 80(2): 340—353.
- Wiemer, S., Wyss, M., 2000. Minimum Magnitude of Complete Reporting in Earthquake Catalogs; Examples from Alaska, the Western United States and Japan. *Bulletin of Seismological Society of America*, 90(4): 859—869.
- Wiemer, S., Wyss, M., 2002. Mapping Spatial Variability of the Frequency-Magnitude Distribution of Earthquakes. *Advances in Geophysics*, 45: 259—302. doi: org/10.1016/S0065-2687(02)80007-3
- Woessner, J., Hauksson, E., Wiemer, S., et al., 2004. The 1997 Kagoshima (Japan) Earthquake Doublet: A Quantitative Analysis of Aftershock Rate Changes. *Geophysical Research Letters*, 31(3): L03605. doi: 10.1029/2003/GL018858
- Woessner, J., Wiemer, S., 2005. Assessing the Quality of Earthquake Catalogs: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainties. *Bulletin of Seismological Society of America*, 95(4): 684—698. doi: 10.1785/0120040007
- Zheng, Y., Shen, W., Zhou, L. Q., et al., 2011. Crust and Uppermost Mantle beneath the North China Craton, Northeastern China, and the Sea of Japan from Ambient Noise Tomography. *Journal of Geophysical Research*, 116(B12): 312. doi: 10.1029/2011JB008637

附中文参考文献

- 曹刚, 2001. 内蒙古地震研究. 北京:地震出版社, 3.
- 韩立波, 蒋长胜, 李艳娥, 等, 2012. 用于地震可预测性研究 CSEP 计划的南北地震带地区地震最小完整性震级 M_c 研究. 地震, 32(1): 17—27.
- 蒋长胜, 吴忠良, 李宇彤, 2008. 首都圈地区重复地震及其在区域地震台网定位精度评价中的应用. 地球物理学报, 51(3): 817—827.
- 刘芳, 蒋长胜, 杨彦明, 等, 2013. 内蒙古测震台网地震监测资料完整性分析. 地震地磁观测与研究, 34(1/2): 176—183.