

刘芳, 蒋长胜, 张帆, 杨彦明, 梁莹, 王磊, 苗春兰. 2014. 内蒙古区域地震台网监测能力研究. 地震学报, 36(5): 919-929. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.015.
Liu F, Jiang C S, Zhang F, Yang Y M, Liang Y, Wang L, Miao C L. 2014. A study on detection capability of the Inner Mongolia regional seismic network. *Acta Seismologica Sinica*, 36(5): 919-929. doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.015.

内蒙古区域地震台网监测能力研究^{*}

刘 芳¹⁾ 蒋长胜^{2),*} 张 帆¹⁾ 杨彦明¹⁾
梁 莹¹⁾ 王 磊¹⁾ 苗春兰³⁾

1) 中国呼和浩特 010051 内蒙古自治区地震局

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

3) 中国北京 100045 中国地震台网中心

摘要 国际上新近发展的“基于概率的完整性震级”(PMC)方法,具有可考察地震定位中由于台站人为选择等造成的台网监测能力下降,以及避免传统基于 G-R 关系的统计算法因地震数目过少而无法评估等优点. 本研究利用 PMC 方法,计算得到内蒙古区域地震台网 39 个台站对周边地震事件的检测概率及台网检测概率. 单台检测概率结果显示: PMC 方法能够客观地反映 39 个台站对地震事件的检测能力; 因台网布局等影响,内蒙古区域地震台网中西部和中东部地区的台站检测能力较强,而靠近蒙古、俄罗斯边境的台站,阿拉善右旗附近地区的台站,以及邻近吉林、黑龙江等地区的台站检测能力较低. 合成检测概率结果显示,由于邻省台站的引入,全区 80% 的地区基于概率的最小完整性震级 M_p 达到 2.2 左右,其余地区 M_p 达到 3.3 左右. 为提高地震台网监测能力,建议在监测能力较弱的中蒙交界地区、东北部地区,以及阿拉善左旗以西地区适度加密台站,进一步优化台网布局.

关键词 内蒙古区域地震台网 最小完整性震级 基于概率的完整性震级方法

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2014.05.015 中图分类号: P315.08 文献标志码: A

A study on detection capability of the Inner Mongolia regional seismic network

Liu Fang¹⁾ Jiang Changsheng^{2),*} Zhang Fan¹⁾ Yang Yanming¹⁾
Liang Ying¹⁾ Wang Lei¹⁾ Miao Chunlan³⁾

1) Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China

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

3) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract: As a new developed method for estimating earthquake detection probabilities, the probability-based magnitude of completeness (PMC) method can

* 基金项目 地震科技星火计划项目(XH12009)、国家国际科技合作专项项目(2012DFG20510)、国家科技支撑计划项目(2012BAK19B01, 2012BAK15B01)和内蒙古自治区科技计划项目(20130437)联合资助.

收稿日期 2013-11-01 收到初稿, 2013-12-25 决定采用修改稿.

* 通讯作者 e-mail: jiangcs@cea-igp.ac.cn

avoid decreasing the detection capability resulted by artificial factors, and can access the detection capability in the areas where traditional Gutenberg-Richter relationship-based method is ineffective due to lack of earthquakes. In this study, we determine the detection probability of all 39 stations of the Inner Mongolia seismic network by using the PMC method. The results show that the PMC method can reflect the network earthquake monitoring capacity objectively. The detection probability is better than other regions in the midwestern and the mid-eastern region of Inner Mongolia, due to better coverage of seismic stations, however, it is poor in the Alxa Youqi region, the Sino-Russian border, and Sino-Mongolia border. Synthesized detection probability results indicate that minimum probability-based magnitude of completeness, M_p , can reach $M_L 2.2$ in the 80% area of the Inner Mongolia when the stations of the neighboring networks are involved, and only about $M_L 3.3$ in other areas. In order to enhance the monitoring capacity of Inner Mongolia regional seismic network, more stations are still needed to emplace in the Sino-Mongolia border region, the northeastern region of Inner Mongolia, and to the west of Alxa Zuoqi to optimize the layout of seismic network.

Key words: Inner Mongolia regional seismic network; minimum completeness magnitude; probability-based magnitude of completeness method

引言

对地震台网监测能力的科学评估,是开展地震危险性分析、区域速度结构探查等地球科学研究的重要基础(Stein, 1999; Knopoff, 2000; Main, 2000; Gomberg *et al*, 2001; Enescu, Ito, 2002; Wiemer, Wyss, 2002; Woessner *et al*, 2004). 地震台网监测能力,一方面是指定位能力,目前常用的评估方法主要有考虑台站几何分布和台址条件等进行的监测能力理论评估(吴开统等, 1991)、“参考事件”标定(郭飙等, 2002)、不同台网定位结果对比(Wüster *et al*, 2000)、使用统计算法评价其“优化”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(Schaff, Richards, 2004)描述监测能力空间分布(蒋长胜, 吴忠良, 2005; 蒋长胜等, 2008)等.

而作为地震台网监测能力评估的另一个重要方面,即最小完整性震级 M_c ,则多基于统计地震学方法进行评估.一般可分为两类:一类是假定震级不小于 M_c 的地震在震级-频度分布上满足 G-R 关系(Gutenberg, Richter, 1944)

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

并认为这些地震的记录是完整的(Wiemer, Wyss, 2000; Cao, Gao, 2002; Marsan, 2003; Woessner, Wiemer, 2005; Amorèse, 2007);另一类则是基于非 G-R 关系的方法,例如基于概率的完整性震级(probability-based magnitude of completeness, 简称为 PMC)方法(Schorlemmer, Woessner, 2008)和贝叶斯完整性震级(Bayesian magnitude of completeness, 简称为 BMC)方法(Mignan *et al*, 2011, 2013)等.

近年来,PMC 方法得到了广泛关注,目前已在美国南加州地震台网(Schorlemmer, Woessner, 2008)、瑞士(Nanjo *et al*, 2010)和意大利(Schorlemmer *et al*, 2010; Gentili *et al*, 2010)等地得到应用.

al, 2011)等地区得到应用. PMC 方法的主要优点在于: ① 对最小完整性震级 M_c 的分析依赖于地震台网的属性, 不需要假定震级的分布关系; ② 使用地震台网实际产出的地震观测报告的评估结果中涵盖了因未使用全部记录清晰台站定位等人为因素造成的台网监测能力的实际下降; ③ 不存在因地震数目过少而无法估算的“空区”, 这使得对区域台网整体空间的完整性评估成为可能; ④ 评价精度较高, 误差低于 0.1 个震级单位 (Nanjo *et al.*, 2010).

内蒙古自治区横跨我国西北、华北和东北地区, 地质构造复杂, 地震活动较为强烈. 内蒙古区域地震台网经过“九五”、“十五”和“十一五”的长期建设, 地震监测能力显著提高, 地震观测事业稳步发展. 但由于地震台网建设受到地域狭长、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, 为该地区的地球科学研究带来了一定难度. 本研究将在系统分析内蒙古区域地震台网观测资料和台网分布特征的基础上, 利用 PMC 方法给出的台站检测概率来评估内蒙古区域地震台网的监测能力, 并进一步提出优化台网布局的建议.

1 PMC 方法的计算原理

基于概率的完整性震级 (PMC) 方法是基于区域地震震级定义和实际产出的震相观测报告, 计算每个台站对全部地震在时空上的检测能力 (Schorlemmer, Woessner, 2008). 利用“单台检测概率” P_D 得到“合成检测概率” P_E , 并计算出基于概率的完整性震级 M_P .

作为 PMC 方法的重要组成部分, 每个台站的检测概率的计算步骤为: ① 要求在研究时段内各台站地震震级的定义及台网对地震的触发条件保持不变; ② 给出每个台站记录到的地震震级 M 与震中距 L 的对应情况, 并将其作为计算台站检测概率的原始数据; ③ 基于区域台网震级的定义, 获得震级 M 与震中距 L 的经验换算关系. 其相关计算原理如下:

对于区域地震台网, 震级测定随距离的衰减关系一般可表示为

$$M = c_1 \lg A - c_2 \lg L^* + c_3, \quad (2)$$

式中: A 为仪器记录的振幅; L^* 为震中距; c_1 , c_2 和 c_3 为常数. 在某个台站记录到的两次地震振幅均为 A 的情况下, 测得的与两个事件震中距 L_1 和 L_2 相对应的震级分别为

$$M_1 = c_1 \lg A - c_2 \lg L_1 + c_3, \quad (3)$$

$$M_2 = c_1 \lg A - c_2 \lg L_2 + c_3. \quad (4)$$

在震级-距离二维图上表示的台站检测概率需要构建 M 与 L 的经验转换关系. 将式(3)减去式(4)可得

$$\Delta M^* = c_2 |\lg L_1 - \lg L_2|, \quad (5)$$

上式中震级差 ΔM^* 仅与震中距 L 有关. 目前我国各个区域地震台网的地方震震级 M_L 的测定均采用同一种方法, 即利用仿真短周期位移记录 (DD-1 或伍德-安德森仪器记录) 的 S 波或 Lg 波最大振幅来测定 (中国地震局监测预报司, 2003), 具体表达式为

$$M_L = \lg A + R(L), \quad (6)$$

式中 $R(L)$ 为台站的量规函数. 由此, 式(5)中的 ΔM^* 实际上仅与相应震中距 L 的量规函数 $R(L)$ 有关. 在计算震级-距离二维图上点位 (M , L) 所对应的台站检测概率时, 需选定计算所用数据. Schorlemmer 和 Woessner (2008) 定义了如下选取原则:

对台站周围发生的某次震级为 M' 、震中距为 L' 的地震事件, 计算与点位 (M, L) 对应的震级差 $\Delta M = M' - M$, 以及利用式(5)和式(6)计算因不同距离引起的震级差 $\Delta M^* = R(L') - R(L)$. 数据遴选的度量条件采用如下形式 (Schorlemmer, Woessner, 2008; Gentili *et al*, 2011):

$$L_M \equiv \sqrt{\Delta M^2 + \Delta M^{*2}} \leq 0.1. \quad (7)$$

当符合上述条件的地震事件数 $N_i \geq 10$ 时, 统计被台站检测到的地震事件数 N_+ 和未被检测到的地震事件数 N_- , 并计算台站在 (M, L) 处的检测概率为

$$P_D(M, L) = \frac{N_+}{N_+ + N_-}. \quad (8)$$

“合成检测概率” $P_E(M, x, t)$ 定义为在位置 x 、时刻 t 和震级 M 的地震能被台网中 4 个以上台站记录到的概率. 综合各台结果, 形成时刻 t 、震级 M 、位置 x 时的“合成检测概率” $P_E(M, x, t)$ 和完整性震级 $M_p(x, t)$. 其相关计算原理如下:

$$P_E(M, x, t) = 1 - \sum_{i=0}^3 P_E^i, \quad (9)$$

式中, P_E^0, P_E^1, P_E^2 和 P_E^3 分别表示一定位置和震级的地震能够被台网中 0, 1, 2 和 3 个台站记录到的概率. 台站没有检测能力的概率为

$$P_E^0 = \prod_{i=1}^s P_{N,i}. \quad (10)$$

使用组合式的方法, 得到能够被 j 个台站记录到的概率为

$$P_E^j = \sum_{i=1}^{s_j} \left[\prod_D C_j^i(i) \prod_N C_{C_j}^i(i) \right], \quad (11)$$

依据式(9)—(11), 得到“合成检测概率” $P_E(M, x, t)$ 为

$$P_E(M, x, t) = 1 - \left\{ \prod_{i=1}^s P_{N,i} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{s_j} \left[\prod_D C_j^i(i) \prod_N C_{C_j}^i(i) \right] \right\}, \quad (12)$$

以此合成得到基于概率的完整性震级, 各震级档下完整性震级为

$$M_p(x, t) = \min_{M \in \mathcal{M}} M | P_E(M, x, t) = 1 - Q, \quad (13)$$

其中取 $Q=0.0001$ (误差标准).

2 资料

截至国家“十五”重大项目——“中国数字地震观测网络工程”2008 年验收运行^①, 内蒙古区域地震台网共建成数字化地震台站 39 个, 同时引入甘肃、宁夏、山西、河北、吉林、辽宁、黑龙江等邻省区域地震台网的 43 个地震台站组成地震监测网络, 有效改善了以往地震台网布局不合理的状况, 显著提高了内蒙古地区的地震监测能力. 图 1 给出了 2008 年以来内蒙古区域地震台网的台站分布和 $M_L 0.0$ 以上地震的空间分布. 为考察内蒙古区域地震台网 39 个台站对地震事件的监测能力 (以区别台网整体的“监测能力”), 选取台网稳定运行的 2008 年 10 月—2013 年 8 月的地震观测报告数据, 利用 PMC 方法进行内蒙古区域地震台网监测能力的评估.

^① <http://www.cea.gov.cn/manage/html/static/zgszdzgcvlxm/index.html>. 查询日期: 2013 年 10 月 1 日.

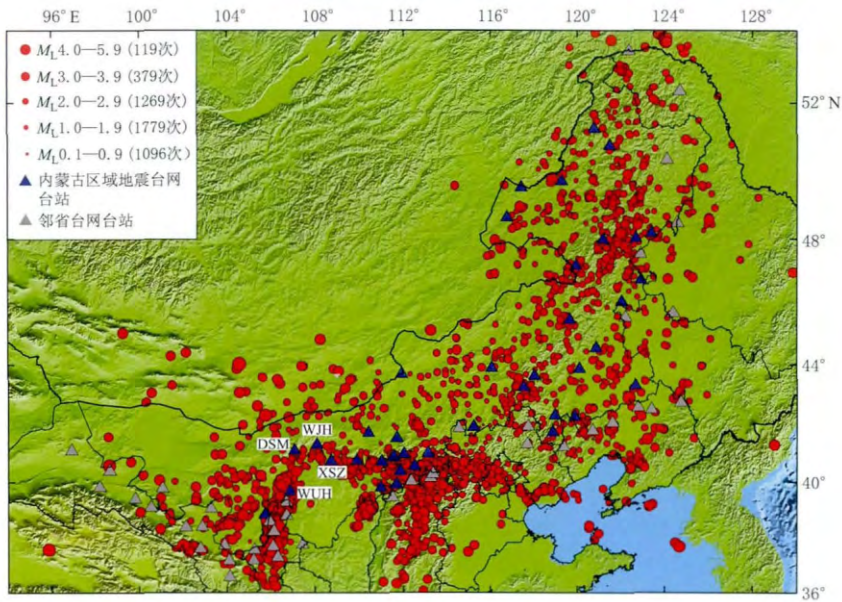


图 1 2008 年 10 月以来 $M_L 0.0$ 以上地震和内蒙古区域地震台网台站的空间分布

Fig. 1 Distribution of seismic stations of the Inner Mongolia regional seismic network and earthquakes over $M_L 0.0$ since October of 2008

3 计算结果

选取可被至少 4 个台站记录到的地震事件，利用 PMC 方法进行台站检测概率 P_D 的计算。由图 2 给出的乌海台(WUH)对周边地震的检测(即参与了该地震的定位)情况可见，

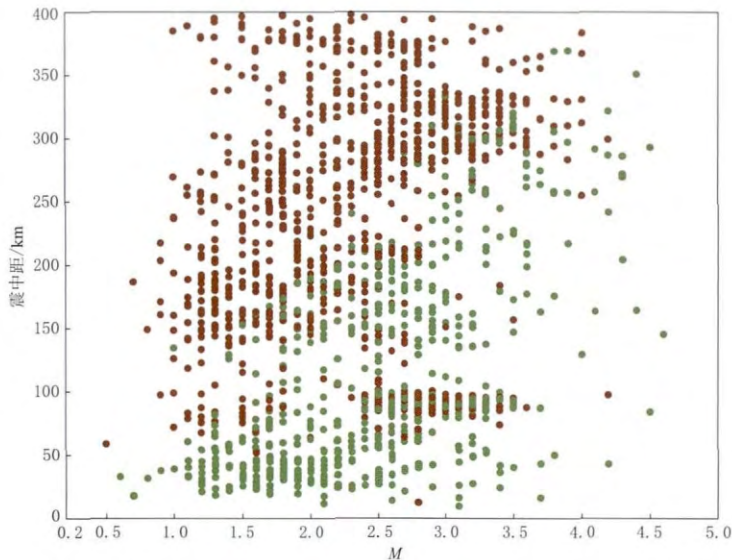


图 2 乌海台(WUH)检测概率计算的原始数据图

图中红色圆点为未参与定位的地震，绿色圆点为定位中使用该台站的地震

Fig. 2 Distribution of raw data triplets of station WUH. Green dots indicate picked events in seismic location, and red dots indicate nonpicked events

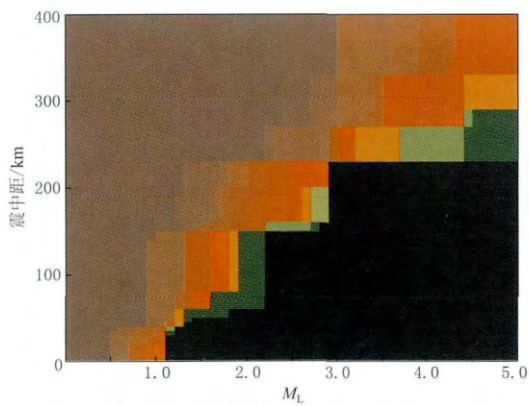


图 3 乌海台的台站检测概率

Fig. 3 Distributions of detection probabilities over magnitude and distance of staion WUH

随着震中距的增大,绿色圆点所示的被检测到地震的震级逐渐增大,监测能力逐渐下降;但同时,在被检测到地震事件的分布范围内,也存在部分未被检测到事件,表明乌海台并未用于全部可检测到地震事件的定位,这种对地震定位台站的人为选取可能会影响台站的检测能力。

图 3 给出了乌海台的 $P_D(M, L)$ 计算结果. 由该图可见,当 $M_L=1.0$ 时, P_D 未达到 100%; 当 $M_L=4.0$ 时, $P_D=100\%$ 所对应的震中距 L 值范围为 0—220 km; 在 $L=100$ km 处,

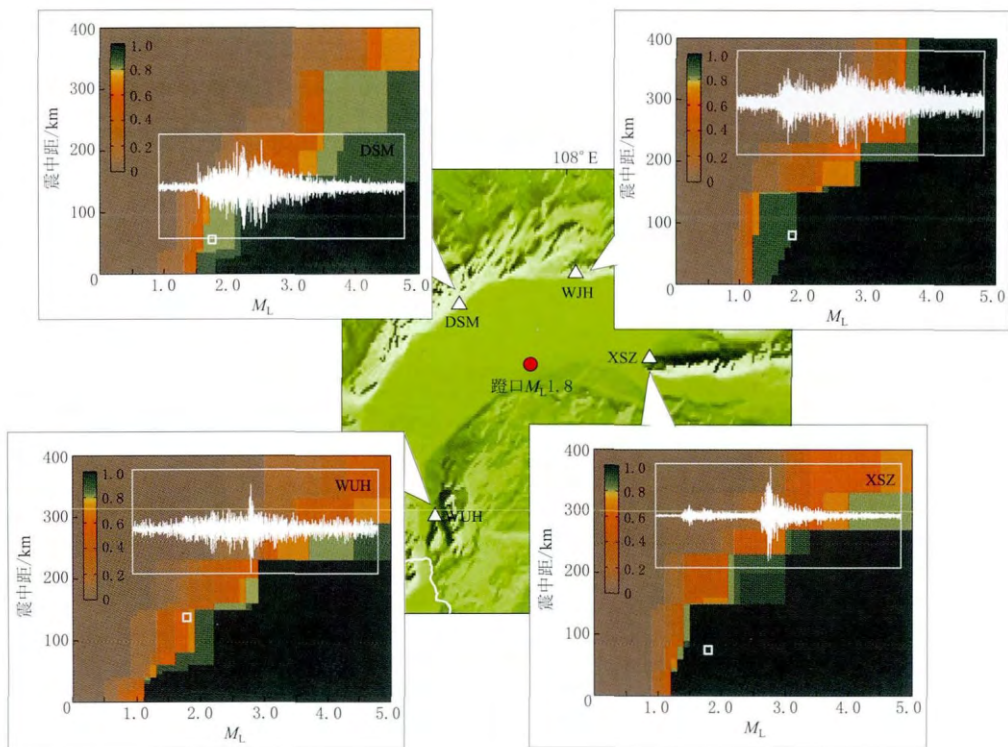


图 4 2009 年 1 月 6 日内蒙古磴口 $M_L 1.8$ 地震和 4 个记录台站的检测概率

图中各子图分别给出了 DSM, WJH, WUH 和 XSZ 台的检测概率以及波形记录情况, 其中波形进行了 0.5 Hz 的高通滤波, 图中白色方块标出了地震在相应的震中距和震级所对应的检测概率

Fig. 4 Detection probabilities and seismograms of the Dengkou, Inner Mongolia, $M_L 1.8$ earthquake on 6 January 2009

The insets contain detection probability distributions of four selected stations (DSM, WJH, WUH and XSZ). Small white squares mark the detection probability of each station for this particular event, given by its magnitude and respective distance to the stations. Seismograms filtered through 0.5 Hz high-pass filter are shown as overlays in white frames

P_D 达到 100% 对应的震级约为 $M_L 2.3$ ；在 $L=300$ km 处， P_D 未达到 100%。

为考察 P_D 能否接近真实地反映台站对地震事件的检测能力，本文以 2009 年 1 月 6 日内蒙古磴口 $M_L 1.8$ 地震(震中 $40^{\circ}42'N$ ， $107^{\circ}41'E$ ，深度 8.8 km)为例，分析 P_D 及实际地震波形记录信噪比情况。如图 4 所示，参与此次地震定位的 4 个台站分别为东升庙(DSM)、乌加河(WJH)、乌海(WUH)和西山嘴(XSZ)。其中：西山嘴和乌加河两台记录信号清晰，对应的震中距和震级的 P_D 值高；东升庙台记录信号较清晰， P_D 值也相对较高；乌海台记录信号较弱， P_D 值较低。对比各台站的检测概率和对直达 P 波震相的波形记录可见，台站的 P_D 值高低可以真实地反映地震记录信号的强度。

4 内蒙古区域地震台网各台站检测概率的对比分析

为定性评估内蒙古区域地震台网 39 个台站对地震事件检测能力的差异，本文尝试利用以下条件来评估：① $M=M_L 1.0$ 时 P_D 是否达到 100%；② $M=M_L 4.0$ 时 $P_D=100\%$ 所对应震中距 L 的数值范围；③ 在 $L=100$ km 处， $P_D=100\%$ 所对应的震级；④ 在 $L=300$ km 处， P_D 是否达到 100%。根据上述条件，将内蒙古区域地震台网 39 个台站 P_D 计算结果的评定结果列于表 1。

由表 1 可见，当 $M=M_L 1.0$ 时，5 个台站(QSH, HLG, LCH, CHR, ZLT)的 P_D 可达 100%，其余 34 个台站 P_D 均低于 100%；当 $M=M_L 4.0$ 时， $P_D=100\%$ 对应的震中距范围为 80—400 km；在 $L=100$ km 处， $P_D=100\%$ 对应的震级范围为 $1.9 \leq M_L \leq 4.1$ ，均值为 $M_L 1.95$ ，只有 3 个台站(BHS, DOSH, CSQ)的 P_D 未达到 100%；在 $L=300$ km 处，7 个台站(HHH, WJH, XIH, XLT, BYT, GNH, MDG)的 $P_D=100\%$ 对应的震级范围为 $3.4 \leq M_L \leq 4.4$ ，其余 32 个台站检测概率均未达到 100%，其中 DOSH 台检测概率最低。

根据表 1 的定性评估结果，进一步给出了内蒙古区域地震台网台站 P_D 的区域特征结果，如表 2 所示。由表 2 可见，内蒙古中西部地区($38^{\circ}-42^{\circ}N$ ， $105^{\circ}-114^{\circ}E$)的 17 个台站中，10 个台站(WUH, DSM, XSZ, WJH, BTO, BLM, HHH, QSH, HLG, JIN)对较小震级事件有较高的检测能力，6 个台站(WLH, BYT, RLT, LCH, CSQ, BHS)检测概率较低，1 个台站(DOSH)几乎无检测能力；中东部地区($41.5^{\circ}-46^{\circ}N$ ， $115^{\circ}-126^{\circ}E$)的 12 个台站中，8 个台站(BAC, XLT, LIX, CHF, NIC, XIH, AGL, WLT)对较小地震有较高的检测能力，其余 4 个台站(LUB, HLH, JIP, TIS)的检测能力较低；东部地区($46^{\circ}-53.5^{\circ}N$ ， $115.5^{\circ}-126^{\circ}E$)的 10 个台站中，5 个台站(NJT, IDR, ARS, ZLT, CHR)对于震级较小的地震事件有较强的检测能力，其余 5 个台站(MZL, MDG, GNH, XIQ, HLR)的检测能力较低。

5 内蒙古区域地震台网监测能力评估

基于概率的完整性震级 M_p 反映了台网监测能力在空间上的分布特征。依据 82 个单台的检测概率，得到了内蒙古区域地震台网的 M_p 分布(图 5)。可以看到：由于邻省台站的引入，使得内蒙古乌兰浩特—扎兰屯一带及蒙黑交界地区最小完整性震级达到最低($M_p \leq 1.5$)，监测能力最强；正蓝旗—赤峰—通辽一带及辽蒙交界、呼和浩特—包头—集宁一带及晋蒙交界、临河—乌海—巴彦浩特一带及蒙甘宁交界， $1.5 \leq M_p \leq 2.0$ ，以及 M_p 为 2.5

表 1 内蒙古区域地震台网台站检测概率 P_D 统计表Table 1 Detection probability, P_D , of the stations of the Inner Mongolia regional seismic network

序号	台站名称	台站代码	$L^{\text{①}}/\text{km}$		$M_L^{\text{②}}$		$L/\text{km}^{\text{③}}$		$M_L^{\text{④}}$	
			$M=M_L 1.0 P_D=100\%$	$L=100 \text{ km} P_D=100\%$	$M=M_L 2.0$	$M=M_L 4.0 P_D=100\%$	$M=M_L 4.0 P_D=100\%$	$L=300 \text{ km} P_D=100\%$	$M=M_L 4.0 P_D=100\%$	$M=M_L 4.0 P_D=100\%$
1	巴彦浩特	BYT	无		1.2		220		4.3	
2	乌海	WUH	无		2.3		220		无	
3	东升庙	DSM	无		2.2		150		无	
4	乌加河	WJH	无		1.9		400		3.9	
5	西山嘴	XSZ	无		1.5		270		无	
6	包头	BTO	无		4.1		300		无	
7	东胜	DOSH	无		无		无		无	
8	清水河	QSH	60		1.6		280		无	
9	和林格尔	HLG	40		2.0		260		无	
10	呼和浩特	HHH	无		4.1		80		4.1	
11	百灵庙	BLM	无		1.2		200		无	
12	乌兰花	WLH	无		1.9		140		无	
13	保和少	BHS	无		无		80		无	
14	察素齐	CSQ	无		无		80		无	
15	凉城	LCH	20		2.5		150		无	
16	集宁	JIN	无		3.2		200		无	
17	二连浩特	RLT	无		0.9		230		无	
18	宝昌	BAC	无		1.4		220		无	
19	锡林浩特	XLT	无		1.5		280		4.1	
20	林西	LIX	无		1.8		150		无	
21	经棚	JIP	无		1.8		220		无	
22	鲁北	LUB	无		1.7		160		无	
23	天山	TIS	无		1.8		200		无	
24	赤峰	CHF	无		2.4		150		无	
25	宁城	NIC	无		1.6		200		无	
26	新惠	XIH	无		2.1		260		4.4	
27	阿古拉	AGL	无		2.8		200		无	
28	乌兰浩特	WLT	无		2.3		230		无	
29	阿尔山	ARS	无		1.4		260		无	
30	绰尔	CHR	50		1.3		160		无	
31	音德尔	IDR	无		1.3		200		无	
32	霍林河	HLH	无		2.7		150		无	
33	扎兰屯	ZLT	80		1.2		270		无	
34	那吉屯	NJT	140		1.0		280		无	
35	海拉尔	HLR	无		2.7		170		无	
36	根河	GNH	无		1.9		400		3.4	
37	西旗	XIQ	无		1.7		280		无	
38	满洲里	MZL	无		1.8		240		无	
39	莫尔道嘎	MDG	无		1.7		350		3.4	

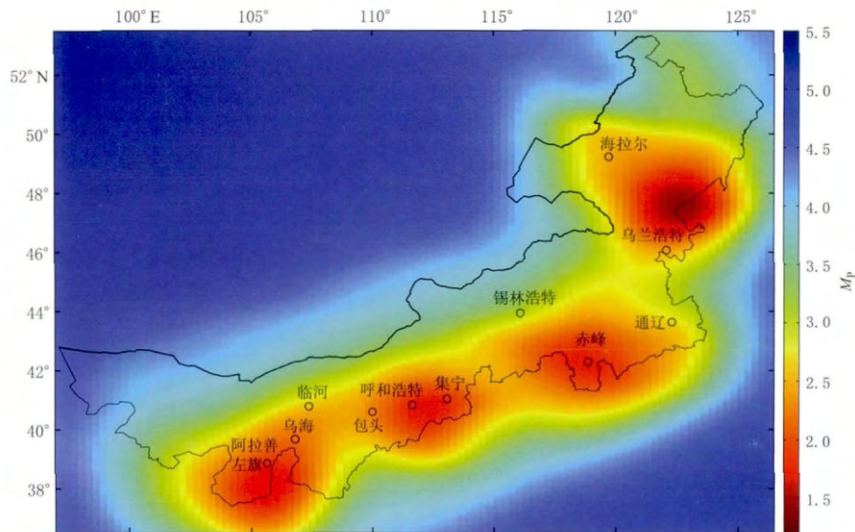
注：①和③表示震级分别为 $M_L 1.0$ 和 $M_L 4.0$ 时检测概率 100% 所对应的震中距 L 值；②和④表示在震中距分别为 100 和 300 km 处检测概率 100% 所对应的震级值。

左右的海拉尔地区，监测能力较强；与蒙古交界的地区 (100° — 118°E) M_p 为 3.5 左右，监测能力较弱；阿拉善左旗以西—阿拉善右旗 (103°E 以西) M_p 为 5.0 左右，监测能力最弱。全区 80% 的地区 M_p 达到 2.2 左右，其余地区 M_p 达到 3.3 左右。

表 2 内蒙古区域地震台网不同区域的台站检测概率统计表

Table 2 Statistical results of the regional detection probability of the stations of the Inner Mongolia regional seismic network

研究区域	检测概率较好的台站个数	检测概率较弱的台站个数	无检测概率的台站个数
中西部地区	10	6	1
中东部地区	8	4	0
东部地区	5	5	0

图 5 内蒙古区域地震台网基于概率的完震性震级 M_p 分布Fig. 5 Distribution of completeness magnitude, M_p , of Inner Mongolia regional seismic network

综合上述结果,建议在内蒙古与蒙古交界地区、东北部地区、阿拉善左旗以西地区增设台站,以提高内蒙古区域地震台网的整体监测能力.

6 讨论与结论

内蒙古区域地震台网影响台站检测概率的原因可能包括:①台站分布稀疏且相对分布不均,本文为确保结果的可靠性而筛选 4 个以上 P 波到时记录到的事件进行计算,导致 $M=M_L+1.0$ 时多数台站 P_D 未达到 100%;②部分靠近边境地区或邻省引入共享台站数量偏少地区的台站,受台站分布方位的影响 P_D 较低;③ DSH 台(井下摆)因 2008 年 8 月雨季进水后被撤掉,而后于 2009 年 1 月在原址上重建,运行了东胜台(地面摆),但受雷击等原因该台运行一直不稳定,运行期间仅对 55 次地震事件在定位中使用,致使东胜台的 P_D 值最低;④由于在地震定位实际操作中以“降低定位残差、提高定位精度”为优先原则,以及人为舍弃震中距较大或震相相对不清楚的台站等因素的影响,可能导致部分台站的检测概率降低.

由于 PMC 方法要求台站周边的地震活动具有均匀性,所以实际地震活动在时空上的丛集分布可能会在一定程度上影响 P_D 的计算结果.此外,PMC 方法假定台站对不同方位地震的监测能力具有各向同性,这与实际情况也可能存在差异,例如在矿山等小尺度区域

(Plenkers *et al.*, 2011).

为科学地评估内蒙古区域地震台网的地震监测能力,本研究采用目前国际上新近发展的 PMC 方法,计算获得了内蒙古区域地震台网 39 个台站的检测概率,并得到如下认识:

1) 利用 PMC 方法获得的内蒙古区域地震台网“十五”时期台站的检测概率,可以反映台站地震事件的实际检测情况.

2) 由于受台网分布稀疏、空间分布不均匀等因素影响,不同区域的台站检测能力存在差异,其中内蒙古中东部与中西部地区台站的检测能力比较接近,而东部地区台站检测能力总体偏低;靠近蒙古、俄罗斯边境的台站,以及邻近无台站的阿拉善右旗地区和邻近吉林省、黑龙江省的台站检测能力普遍偏低,是需要优化台网布局的区域.

3) 在地震定位中对台站的人为不合理遴选,可能会导致台站检测能力的实质性降低.

通过对内蒙古区域地震台网监测能力的评估,认为全区 80% 的地区 M_p 达到了 2.2 左右,其余地区 M_p 达到 3.3 左右. 建议在内蒙古与蒙古交界地区、东北部地区及阿拉善左旗以西地区增设台站,以提高内蒙古地区的整体监测能力.

德国亥姆霍兹地球科学中心(GFZ)的 Danijel Schorlemmer 教授为本研究提供了计算程序,“地震可预测性合作研究”(CSEP)项目中国检验中心筹备组专家对本文工作给予了指导,在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 郭 飙, 刘启元, 陈九辉, 李顺成. 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.
- Guo B, Liu Q Y, Chen J H, Li S C. 2002. Test of epicenter determination of micro earthquakes recorded by the digital seismic network in capital circle[J]. *Seismology and Geology*, 24(3): 453–460 (in Chinese).
- 蒋长胜, 吴忠良. 2005. 由“重复地震”给出的中国地震台网的定位精度估计[J]. 中国地震, 21(2): 147–154.
- Jiang C S, Wu Z L. 2005. Estimating the location accuracy of the China National Seismograph Network using repeating events[J]. *Earthquake Research in China*, 21(2): 147–154 (in Chinese).
- 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.
- Jiang C S, Wu Z L, Li Y T. 2008. Estimating the location accuracy of the Beijing Capital Digital Seismograph Network using repeating events[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(3): 817–827 (in Chinese).
- 吴开统, 焦远碧, 杨满栋. 1991. 中国地震台网布局的优化方案[J]. 地震学刊, (1): 22–37.
- Wu K T, Jiao Y B, Yang M D. 1991. An optimum scheme for distribution of seismic station networks in China[J]. *Journal of Seismology*, (1): 22–37 (in Chinese).
- 中国地震局监测预报司. 2003. 数字地震观测技术[M]. 北京: 地震出版社: 521–522.
- Department of Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. 2003. *Digital Seismic Observation Technique*[M]. Beijing: Seismological Press: 521–522 (in Chinese).
- Amorèse D. 2007. Applying a change-point detection method on frequency-magnitude distributions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 97(5): 1742–1749.
- Bartal Y, Somer Z, Leonard G, Steinberg D M, Horin Y B. 2000. Optimal seismic networks in Israel in the context of the Comprehensive Test Ban Treaty[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 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 Inter*, 75(1/2/3): 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 Planets Space*, **54**(8): 847–859.
- Gentili S, Sugan M, Peruzza L, Schorlemmer D. 2011. Probabilistic completeness assessment of the past 30 years of seismic monitoring in northeastern Italy[J]. *Phys Earth Planet Inter*, **186**(1/2): 81–96.
- 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]. *Bull Seismol Soc Am*, **34**(4): 185–188.
- Knopoff L. 2000. The magnitude distribution of declustered earthquakes in Southern California[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, **97**(22): 11880–11884.
- Main I. 2000. Apparent breaks in scaling in the earthquake cumulative frequency-magnitude distribution: Fact or artifact? [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(1): 86–97.
- Marsan D. 2003. Triggering of seismicity at short timescales following Californian earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **108**(B5): 2266. doi:10.1029/2002JB001946.
- Mignan A, Werner M J, Wiemer S, Chen C C, Wu Y M. 2011. Bayesian estimation of the spatially varying completeness magnitude of earthquake catalogs[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(3): 1371–1385.
- Mignan A, Jiang C S, Zechar J D, Wiemer S, Wu Z, Huang Z B. 2013. Completeness of the mainland China earthquake catalog and implications for the setup of the China Earthquake Forecast Testing Center[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **103**(2A): 845–859.
- Nanjo K Z, Schorlemmer D, Woessner J, Wiemer S, Giardini D. 2010. Earthquake detection capability of the Swiss Seismic Network[J]. *Geophys J Int*, **181**(3): 1713–1724.
- Plenkers K, Schorlemmer D, Kwiatek G, JAUARS Research Group. 2011. On the probability of detecting picoseismicity [J]. *Bull Seismol Soc Am*, **101**(6): 2579–2591.
- Rabinowitz N, Steinberg D K. 1990. Optimal configuration of a seismographic network: A statistical approach[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **80**(1): 187–196.
- Schaff D P, Richards P G. 2004. Repeating seismic events in China[J]. *Science*, **303**(5661): 1176–1178.
- Schorlemmer D, Woessner J. 2008. Probability of detecting an earthquake[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **98**(5): 2103–2117.
- Schorlemmer D, Mele F, Marzocchi W. 2010. A completeness analysis of the national seismic network of Italy[J]. *J Geophys Res*, **115**(B4): B04308. doi:10.1029/2008JB006097.
- Stein R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence[J]. *Nature*, **402**(6762): 605–609.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(4): 859–869.
- Wiemer S, Wyss M. 2002. Mapping spatial variability of the frequency-magnitude distribution of earthquakes[J]. *Adv Geophys*, **45**(I/II/III/IV/V): 259–302.
- Woessner J, Hauksson E, Wiemer S, Neukomm S. 2004. The 1997 Kagoshima (Japan) earthquake doublet: A quantitative analysis of aftershock rate changes[J]. *Geophys Res Lett*, **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[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(4): 684–698.
- Wüster J, Rivière F, Crusem R, Plantet J, Massinon B, Caristan Y. 2000. GSETT-3: Evaluation of the detection and location capabilities of an experimental global seismic monitoring system[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(1): 166–186.

作者简介



武岩 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2006年南京大学地质专业毕业，获学士学位；2011年中国地震局地球物理研究所固体地球物理专业毕业，获博士学位。主要从事

层析成像和利用接收函数研究地下结构等方面的研究。



郝明辉 中国地震灾害防御中心助理研究员。2006年山东大学工程力学专业毕业，获学士学位；2009年山东大学固体力学专业毕业，获硕士学位；2012年中国水利水电研究院水工结构工程专业毕业，获

博士学位。现从事高拱坝抗震分析及地震动输入等相关方面的研究工作。



张攀 武汉大学测绘学院固体地球物理专业在读硕士研究生。2008年武汉大学地球物理专业毕业，获学士学位。主要从事接收函数方面的研究。



李兴旺 长安大学固体地球物理专业在读硕士研究生。2012年长安大学地球物理专业毕业，获理学学士学位。目前主要从事有限频射线层析成像的理论及方法研究。



张晨 武汉大学测绘学院在读博士研究生。2008年武汉大学测绘学院大地测量学与测量工程专业毕业，获工学学士学位；2010年武汉大学中国边界与海洋研究院国际法专业毕业，获法学硕士学位。现主要

从事与地球动力学相关的数值模拟研究。



刘芳 内蒙古自治区地震局测震台网中心高级工程师。1990年中国科学技术大学应用化学专业毕业。长期从事大震速报、地震编目、数字地震及地震预测预报等方面的工作。内蒙古自治区地震学会会员。