安祥宇,赵倩,王晓睿,等.基于 PMC 方法的辽宁测震台网监测能力评估[J].地震工程学报,2019,41(6):1545-1552.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1545

AN Xiangyu,ZHAO Qian,WANG Xiaorui,et al.Assessment of Earthquake Monitoring Capability of Liaoning Seismic Network Based on PMC Method[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(6):1545-1552.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1545

基于 PMC 方法的辽宁测震台网监测能力评估

安祥宇[1], 赵 倩[1], 王晓睿[2], 王淑辉[1], 徐鹏深[1]

(1. 辽宁省地震局, 辽宁 沈阳 110034; 2. 大连地震台, 辽宁 大连 116000)

摘要: 为获得辽宁测震台网科学准确的监测能力评估结果,分析辽宁及周边地区的地震监测能力时空分布特征,为测震台网的优化提供科学依据。本研究首次将"基于概率的完整性震级"(PMC)方法应用到辽宁测震台网,通过计算获得辽宁地震台网 37 个台站的单台检测概率、测震台网合成检测概率以及基于概率的最小完整性震级 M_P。单台检测概率表明:PMC 方法能够客观地反映台站对地震事件的检测能力;营口—海城老震区周围的台站对较小震级的地震有较高的检测能力,受台网布局影响,位于辽宁边界地区台站的检测能力较弱。M_P 时空分布特征显示:辽宁中部沈阳—辽阳—本溪—鞍山—盘锦地区 $1.5 \geqslant M_P \geqslant 1.2$。辽宁南部大连一带监测能力较低 $M_P \geqslant 3.0$,辽宁西部与河北交界地区 $3.0 \geqslant M_P \geqslant 2.5$,辽宁其他区域 $2.5 \geqslant M_P \geqslant 1.8$。研究结果表明,为进一步提高辽宁地震台网监测能力,需在辽宁东部、东南部建设台站以提高该区域台站密度,在辽宁西部地区建设部分台站和重新规划需要引入的河北共享台站,以提高该区域的台站密度及改善台站空间布局和该区域的监测能力。

关键词: 监测能力; 最小完整性震级; 基于概率的完整性震级方法

中图分类号: P315.7 **文献标志码**:A **文章编号**: 1000-0844(2019)06-1545-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.06.1545

Assessment of Earthquake Monitoring Capability of Liaoning Seismic Network Based on PMC Method

AN Xiangyu[1], ZHAO Qian[1], WANG Xiaorui[2], WANG Shuhui[1], XU Pengshen[1]

(*1.Earthquake Agency of Liaoning Province, Shenyang 110034, Liaoning, China;*
2.Dalian Seismic Station, Dalian 116000, Liaoning, China)

Abstract: To obtain accurate assessment results on the earthquake monitoring capability of Liaoning seismic network, analyze the spatial and temporal distribution characteristics of earthquake monitoring in Liaoning province and its neighboring regions, and provide scientific basis for seismic network optimization, the probability-based magnitude of completeness (PMC) method was first applied to the Liaoning seismic network. To investigate the seismic detection capability of 37 stations in Liaoning seismic network, this research selected the seismic observation report and station information from January 2010 to December 2017. The results show that the PMC method

收稿日期:2018-09-20

基金项目:辽宁省地震局青年基金(LZ201829)

第一作者简介:安祥宇(1986-),男,工程师,从事地震监测工作。E-mail:79806763@qq.com。

can objectively reflect the capability of stations to detect earthquake events. Stations around the old Yingkou—Haicheng seismic region exhibit higher detecting capability for earthquakes with smaller magnitudes. Given the network distribution, stations at the edge of Liaoning province present lower detecting capability. The spatiotemporal distribution characteristics of minimum PMC (M_P) demonstrate the following values: $1.2 \leqslant M_P \leqslant 1.5$ in Shenyang—Liaoyang—Benxi—Anshan—Panjin area of central Liaoning; $M_P \geqslant 3.0$ in Dalian area of south Liaoning; and $2.5 \geqslant M_P \geqslant 1.8$ in other areas of Liaoning. The study results indicate that to further strengthen the monitoring capability of Liaoning seismic network, more stations should be constructed in east and southeast Liaoning to increase station density. Furthermore, the introduction of Hebei-shared stations in west Liaoning can increase the detecting capability of the study area.

Keywords: monitoring capability; minimum magnitude of completeness; probability-based magnitude of completeness method

0 引言

地震台网是承担地震监测工作的重要部门,地震台网产出的地震观测资料是地震预报、工程地震等许多地球科学研究的基础。地震观测资料的质量优劣在一定程度上受到地震台网监测能力的影响,因此科学地对地震台网进行地震监测能力评估,对地震监测预报和地球科学研究具有重要的意义。

常用的监测能力评估方法大致可以分为两类:一类是基于地震波形分析的方法,这类方法依赖于静态噪声值和震级计算公式的理论监测能力评估[1],通过计算静态噪声值求得观测系统振幅比,使用近震震级公式求出量规函数值,通过量规函数值再计算台站的控制距离。这种方法是国内区域台网评估监测能力的主要方法,赣南、山东等多个区域地震台网应用此类方法评估监测能力[2-3]。这类评估方法需要处理大量的地震波连续波形数据,要求所使用期间的连续波形数据不能有明显干扰,需要耗费较长时间,并且这种理论评估方法与真实的地震监测能力存在一定的差异。另一类是统计地震学的方法,这类方法假定地震频次和震级满足 *G-R* 关系[4],将地震频次和震级拟合,将恰当的拟合拐点作为完备震级。这类常用的方法如最大曲率法[5-6]、90%和 95%拟合度的 GFT 方法[7]、全震级范围法[8]等,但这类方法通常只给出完备震级在空间和时间上的均值,对地震台网检测能力的细节特征描述不够突出。

2008 年 Schorkemmer 等提出"基于概率的完备震级(probabillity-based magnitude of completeness,PMC)"方法[9],为地震台网监测能力评估上提供新的手段。近年来该方法广泛地应用于国内外地震台网的监测能力研究上。PMC 方法利用地震台网实际产出的地震观测资料进行客观评估,具有较高的评估精度,评估结果中也包含了部分因地震观测报告中的一些人为因素导致监测能力实际降低的情况,也适用于少震、弱震地区的地震监测能力评估。目前该方法已经在美国南加州地震台网、瑞士台网等国外地震台网率先应用[9-10]。近几年在中国地震台网及部分区域台网,如山东地震台网、内蒙古地震台网、首都圈地震台网等开展了相关应用研究[11-14]。

辽宁测震台网经过"九五"、"十五"、"十一五"等项目建设,现有测震台站 37 个,其中 5 个国家台,32 个区域台。通过长时期的台站建设,现阶段辽宁测震台网的监测能力显著提高,但是由于辽南半岛地形狭窄,台站分布不均匀,台站密度较低,辽宁地区监测能力存在显著的区域不均衡等问题。本研究使用辽宁测震台网的地震观测报告和相关台站信息,利用 PMC 方法计算得到辽宁测震台网台站的单台检测概率、合成检测概率及最小完整性震级 M_P。通过分析合成检测概率及最小完整性震级 M_P 的空间分布特征,评估辽宁地震台网的监测能力,为辽宁台网布局的进一步优化提供参考依据。

1 PMC 方法简介

PMC 方法利用地方震震级公式和地震观测报告中的发震时刻、震中位置、震级、台站的震中距、震相到时、每一个台站震级等数据,以及台站的基本信息,计算获得单台检测概率 P_D,再综合单台检测概率 P_D 获得合成检测概率 P_E 和最小完整性震级 M_P。具体计算主要有两个步骤:

第一步单台检测概率计算,利用观测报告中的震级 M 和震源距 L 给出各个台站对不同震级、震

源距的检测概率 P_D。但是在研究 P_D 之前需要确定研究时间段内台网对地震震级的定义及地震触发条件是一致的；在震级 M 和震中距 L 的二维坐标系中标注台站对地震的记录情况，作为计算单台检测概率的原始数据；基于区域台网震级定义，获得震级 M 和震中距 L 的换算关系。相关计算原理如下：

根据区域台网震级测定衰减关系有：

$$M = c_1 \lg A - c_2 \lg L^* + c_3 \tag{1}$$

式中：A 为仪器记录的振幅值；L^* 是震中距；c_1、c_2、c_3 是常数。

对于某个台站记录到相同振幅的两个地震，测得不同震中距 L_1、L_2 对应的震级分别如下表示：

$$M_2 = c_1 \lg A - c_2 \lg L_1 + c_3 \tag{2}$$

$$M_3 = c_1 \lg A - c_2 \lg L_2 + c_3 \tag{3}$$

在震级-距离坐标系中表示的台站检测概率需要构建 M 与 L 的经验转换关系，由式(2)减式(3)所得：

$$\Delta M^* = | c_2 \lg L_1 - c_2 \lg L_2 | \tag{4}$$

式中：ΔM^* 是震级差；L_1、L_2 为两个事件的震源距；c_2 为常数。辽宁测震台网主要测定地方震震级 M_L，即量取仿真短周期位移记录(DD-1 或 W.A.)的 S 波或 L_g 波的最大振幅来测定震级[15]，震级公式为：

$$M_L = \lg(A) + R(L) \tag{5}$$

式中：A 是以 μm 为单位的地动位移；$R(L)$为量规函数。因此式(4)中的 ΔM^* 仅与相应震中距 L 的量规函数 $R(L)$有关，通过以上计算可以实现震源距和震级的单位转换。在计算震级-距离的坐标系中的点位(M,L)所对应的台站检测概率时，使用 Schorlemmer 等定义的选取准则[9]：台站记录到附近某次震级为 M'、震中距为 L' 的地震事件，计算与位置(M,L) 对应的震级差 $\Delta M = M' - M$，以及利用式(4)、(5) 计算因不同震源距引起的震级差 $\Delta M^* = R(L') - R(L)$。数据选取条件采用如下形式[9]：

$$L_M = \sqrt{\Delta M^2 + \Delta M^{*2}} \leqslant 0.1 \tag{6}$$

式中：ΔM 为地震事件的震级与参考点(M,L) 的震级 M 之差；ΔM^* 为地震事件的震级与根据震级测定公式将震源距 L 转换多震级 M^* 之差。当符合上述条件的地震事件数 $N_t \geqslant 10$ 时，计算台站在(M,L) 位置处的检测概率，具体公式如下：

$$P_D(M,L) = \frac{N^+}{N^+ + N^-} \tag{7}$$

式中：P_D 被表示在位置(M,L) 处的概率值；N^+ 被台站检测到的地震事件数；N^- 未被检测到的地震事件。

第二步“合成检测概率 $P_E(M,x,t)$”计算。将各单台检测概率 $P_D(M,L)$ 综合，计算空间位置 x 处的地震同时被 i 个台站检测到的概率 P_E^i，即在台网包含了 s 个台站情况下，有 sC_i 种组合的台站检测概率 P_D 的乘积、求和，公式如下：

$$sC_i = \binom{s}{i} = \frac{s!}{i!\ (s-i)} \tag{8}$$

其中当 $i=0$ 时，P_E^0 由如下公式得到：

$$P_E^0 = \prod_{i=1}^{S} [1 - P_{D,i}(M,L)] \tag{9}$$

Schorlemmer 等规定 $P_E(M,x,t)$ 为至少 4 个台站能记录到同一地震的联合概率[9]，考虑到辽宁测震台网的实际情况，这里设定至少需要 3 个台站记录到。由此，合成检测概率 $P_E(M,x,t)$ 可以通过扣除被 0、1、2 个台站记录情况下的联合概率：

$$P_E(M,x,t) = 1 - \sum_{i=0}^{2} P_E{}^i \tag{10}$$

式中：P_E^0，P_E^1，P_E^2，分别表示一定位置和震级的地震能够被台网中 0，1，2 个台站记录到的概率。因此对所有震级档 M，在位置 x 处，时刻 t 的最小完整性震级 M_P 通过如下公式获得：

$$M_P(x,t) = \min_{M \in M_0} M \mid P_E(M,x,t) = 1 - Q \tag{11}$$

其中：Q 为地震被漏记的阈值水平，本次研究 $Q = 0.000\ 1$[13]；M_0 为可能的地震区间。

2　研究资料

辽宁测震台网经过“十五”和“十一五”建设后拥有 37 个测震台站，图 1 是辽宁测震台网台站及地震事件空间分布图。图中可以看出辽宁中部地区台站分布较为密集，辽宁东部及东南部台站分布相对稀疏，这样的台网布局能够显著提高辽宁测震台网对于营口－海城老震区的地震监测能力，但是辽宁东部及东南部大连沿海一段监测能力可能较差。为考察辽宁测震台网 37 个台站的地震检测能力，本次研究选取辽宁台网运行稳定、地震编目质量较高的阶段分析，因此使用 2010—2017 年间 M_L 0.0 以上地震的观测报告，利用 PMC 方法进行辽宁测震台网监测能力评估。

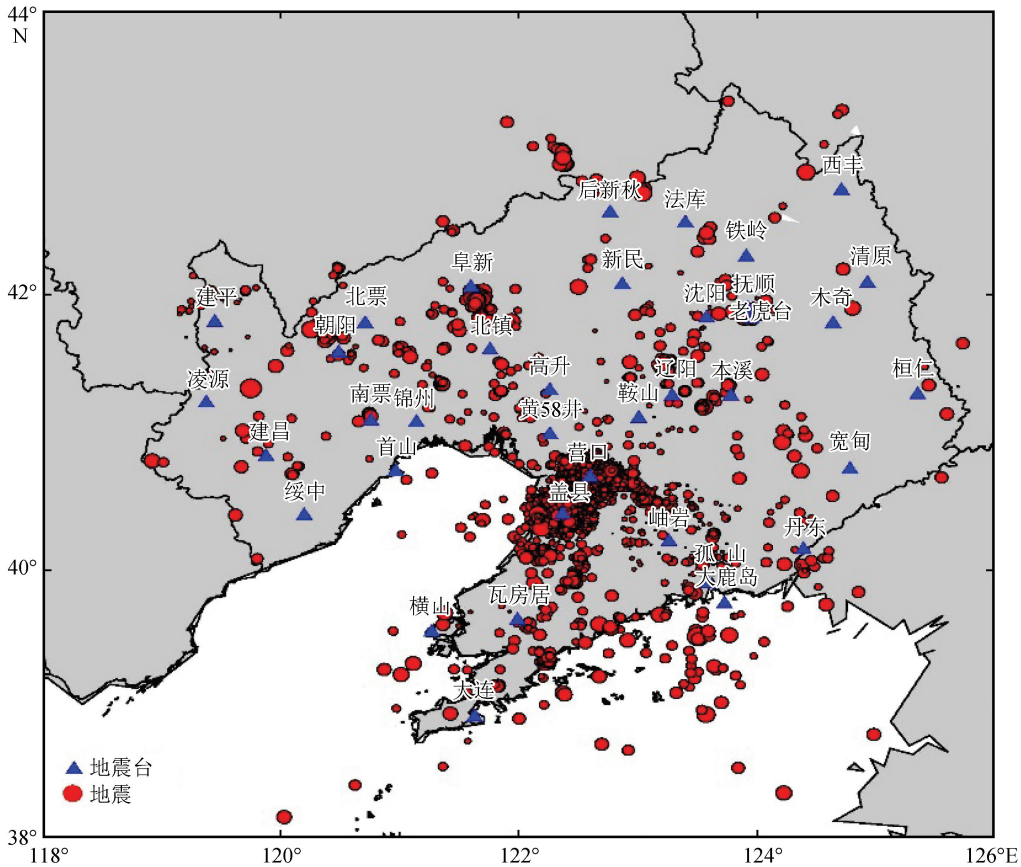


图 1 辽宁测震台网台站及 2010—2017 年 M_L 0.0 以上地震空间分布图

Fig.1 Distribution map of stations in Liaoning seismic network and the $M_L \geqslant 0.0$ earthquakes during 2010－2017

3 单台检测概率计算和分析

单台检测概率 P_D 是 PMC 程序的核心模块，考虑到辽宁测震台网实际产出的观测报告情况，本次 P_D 计算选取被至少 3 个台站记录到的地震事件参与计算，并获得 37 个台站的单台检测概率。为能直观反映辽宁地区地震台网 37 个台站对地震事件检测能力的差异，本文使用以下条件评估：(1) $M=M_L1.0$ 时 P_D 是否达到 100%时；(2) $M=M_L3.0$ 且 $P_D=100\%$ 时的震中距范围；(3) $L=100$ km 且 $P_D=100\%$ 时对应的震级 M；(4) $L=300$ km 处，P_D 是否达到 100%。统计结果如表 1 所列[13]。根据上述条件我们认为满足条件越多的台站检测能力越好。由表 1 可知：辽宁地区检测能力较好的台站有 4 个(ANS、YKO、GAX、XYN)，检测能力较差的台站 3 个(SUZ，H58，JIP)，其中绥中台基本上无检测能力。图 2 给出盖县台、绥中台的检测结果。从图中可以看出，盖县台在 $M_L1.0$ 时 P_D 达到 100%，检测震级下限甚至达到 $M_L0.2$，说明盖县台对低震级档有较高的检测能力，同时发现虽然盖县台检测能力较强，但是在 $M_L0.2\sim1.5$ 地震也仅是在 50 km 范围内能达到 100%检测能力。震级-距离原始数据点阵图中也可以发现盖县台参与了大量的震中距 50 km 左右的地震事件定位，主要原因是营口—海城一带是辽宁省的老震区，盖县台位于老震区附近，能够清晰地记录到大量的该区域较小的地震事件，并且发现辽宁地区检测能力较好的台站均分布于老震区附近，体现了辽宁测震台网在台网规划上对老震区监测能力的重视，老震区周围的台站运行质量和台基水平较高，在地震编目工作上使用率较高。

由绥中台的单台检测概率图可以看出，绥中台在震级 M_L 大于 4.2 级，震中距在 200 km 内的情况下单台检测概率才能达到 100%，检测能力较差。震级-距离原始数据点阵图中也反映了辽宁测震台网使用绥中台参与事件定位的震级一般在 $M_L2.0$ 地震以上，参与事件定位的数量较少。导致绥中台检测能力较差原因可能有两方面：(1)受台网布局影响，绥中台位于辽宁西部靠近渤海湾位置，处于辽宁边界地带，能够记录到的地震事件有限；(2)在地震

编目过程中为了保证地震编目质量,将一些未能记录到清晰的初至震相的台站舍去,人为导致检测能力下降。以上仅以单台检测能力较好的盖县台、单台检测能力较差的绥中台作为示例进行说明,辽宁其他台站检测结果可以通过测震台站单台检测能力统计表获得,如表 1 所列。

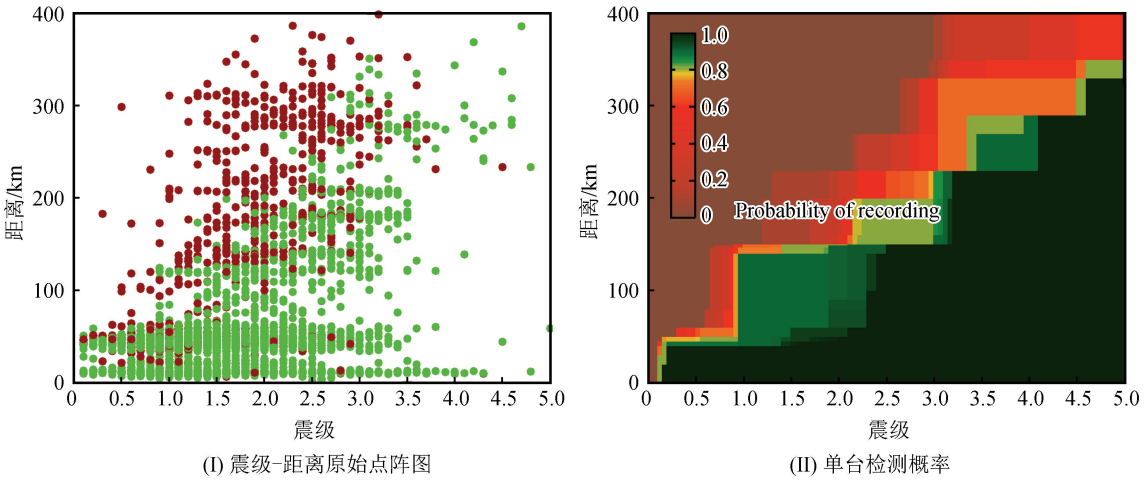
表 1　辽宁测震台站单台检测概率统计表

Table 1　Statistical table of single station detection probability of Liaoning seismograph station

序号	台站名	代码	L/km M_L1.0 & P_D=100%	M_L L=100 km & P_D=100%	L/km M_L3.0 & P_D=100%	M_L L=300 km & P_D=100%
1	鞍山台	ANS	45	2.9	145	4.4
2	北票台	BEP	无	2.0	130	无
3	本溪台	BXI	无	2.4	150	无
4	北镇台	BZH	无	2.0	220	无
5	朝阳台	CHY	无	2.6	150	无
6	丹东台	DDO	无	2.4	160	无
7	大连台	DL2	无	2.7	160	无
8	大鹿岛台	DLD	无	2.5	100	无
9	法库台	FKU	无	2.3	200	无
10	抚顺台	FSH	无	2.2	150	无
11	阜新台	FXI	无	2.1	150	无
12	盖县台	GAX	50	2.3	145	4.6
13	高升台	GSH	无	3.0	150	4.7
14	孤山台	GUS	无	2.2	145	无
15	黄 58 台	H58	无	3.4	无	无
16	横山台	HSH	无	3.2	30	无
17	怀仁台	HUR	无	2.6	160	无
18	后新秋台	HXQ	无	2.4	190	无
19	建昌台	JCA	无	2.5	150	4.6
20	建平台	JIP	无	无	30	无
21	锦州台	JZH	无	2.8	170	4.3
22	宽甸台	KDN	无	2.1	150	无
23	老虎台	LHT	无	3.9	10	无
24	凌源台	LYA	无	2.0	150	4.6
25	辽阳台	LYN	无	2.3	100	无
26	木奇台	MQI	无	1.2	20	无
27	南票台	NAP	无	2.5	160	无
28	清源台	QYU	无	2.2	160	无
29	首山台	SHS	无	2.6	110	无
30	沈阳台	SNY	无	2.1	170	4.7
31	绥中台	SUZ	无	无	无	无
32	铁岭台	TIL	无	1.9	160	无
33	瓦房店台	WFD	无	2.2	160	无
34	西丰台	XFN	无	2.2	150	3.6
35	新民台	XMN	无	2.7	150	无
36	岫岩台	XYN	60	1.9	190	3.7
37	营口台	YKO	50	2.1	170	4.5

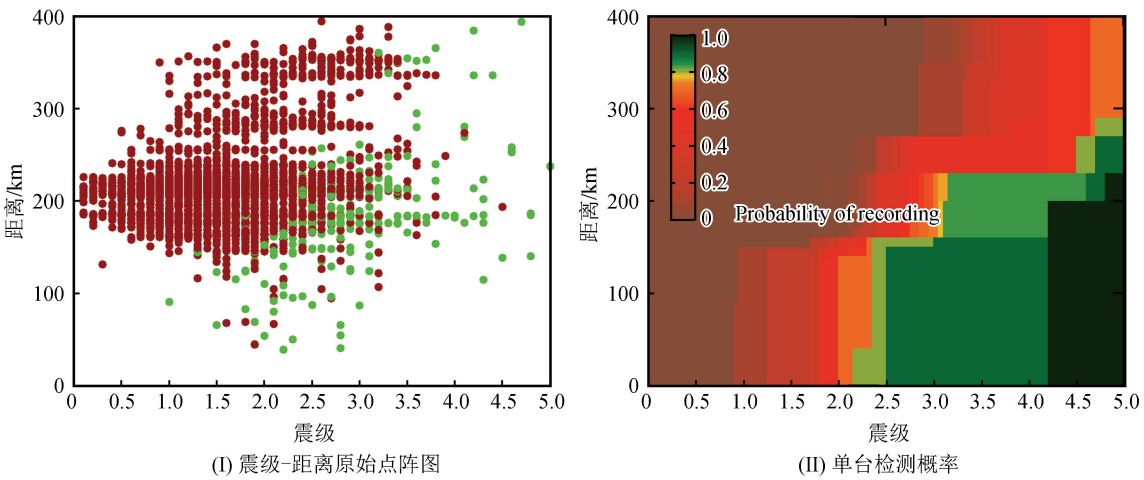
4　合成检测概率 P_E 及 M_P 空间分布特征

综合 37 个台站的单台检测概率获得合成检测概率 P_E 及基于概率的完整震级 M_P 空间分布特征。P_E 和 M_P 的空间分布特征作为 PMC 方法的两种综合结果均可以用来表示测震台网监测能力。合成监测能力 P_E 计算时,以 0.1 级为档位计算了从 1.0～3.0 级所有震级档的合成检测概率。图 3 分别给出 M_L1.0、M_L1.5、M_L2.0,三个震级档的 P_E 的空间分布特征和完整性震级 M_P 的空间分布特征。图 3(a)是辽宁地区 M_L1.0 地震的检测能力的分布特征,从图中可以发现辽宁地区对 M_L1.0 地震的检测能力较弱,仅在辽阳—鞍山一带检测概率达到 90% 左右。图 3(b)是 M_L1.5 地震的检测情况,从图中可以看出,在沈阳—辽阳—本溪—鞍山—盘锦一带对 M_L1.5 地震的检测能力最强,检测概率能达到



(I) 震级-距离原始点阵图　(II) 单台检测概率

(a) 盖县台



(I) 震级-距离原始点阵图　(II) 单台检测概率

(b) 绥中台

图 2　辽宁测震台网单台检测概率

Fig.2　Single station detection probability of Liaoning seismic network

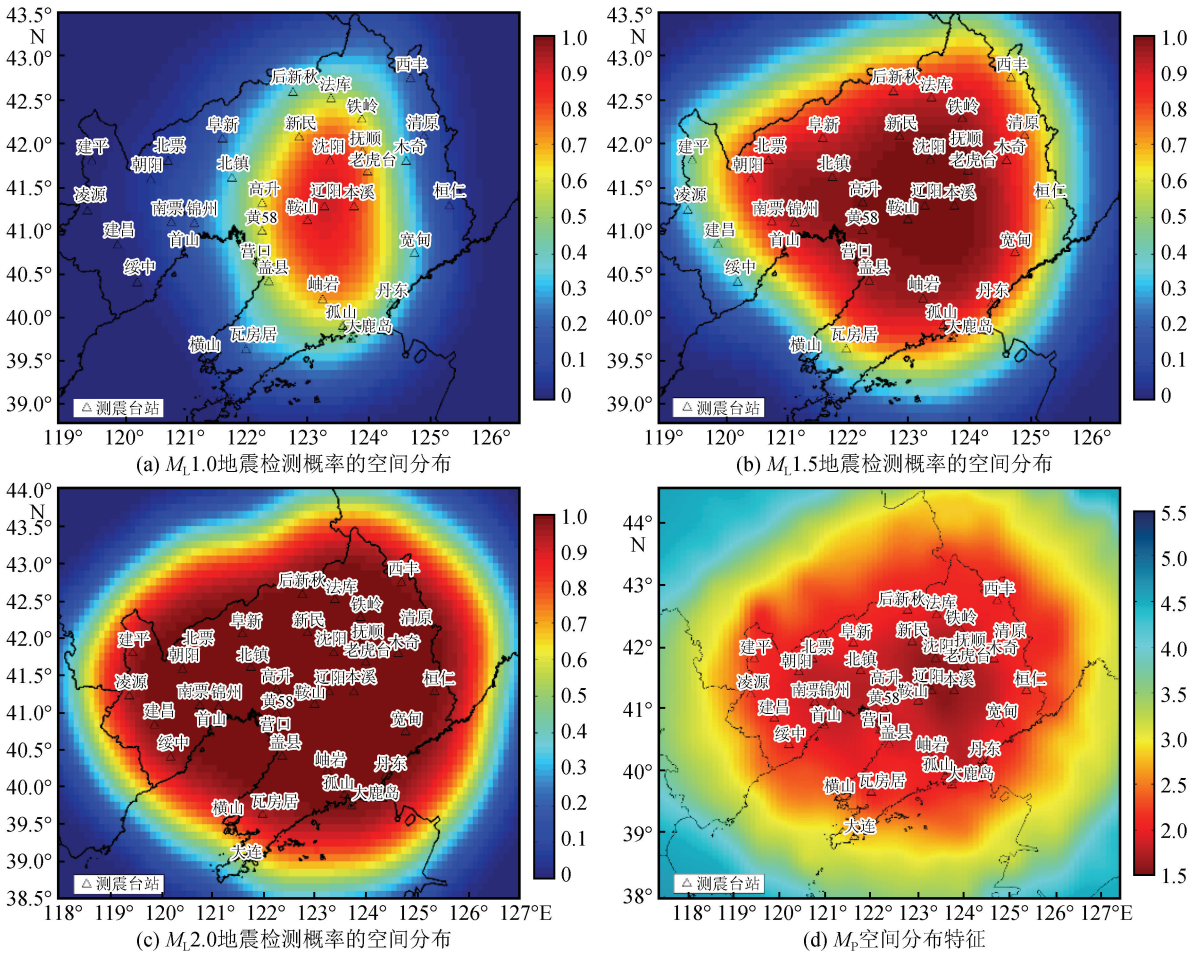
100%。同时综合所有震级档的合成监测能力结果，发现在沈阳—辽阳—本溪一带对 M_L1.2 地震具备100%概率的检测能力，是整个辽宁地区检测能力最强的地区。对于 M_L2.0 地震，如图 3(c)所示，辽宁地区 95%以上区域的检测能力达到 100%，仅在瓦房店以南的大连地区、辽宁与河北交界地区 M_L2.0 地震的检测能力相对较差。从图 3(d)的完整性震级 M_P 的空间分布上看，辽宁大连一带的监测能力在 M_L3.0 以上，辽宁与河北交界地带的监测能力在 M_L2.5～3.0 之间，大连地区受半岛狭窄地形限制，台站密度较低，这是导致大连地区监测能力较低的主要因素，而辽宁与河北交界地区监测能力较差，可能受到人为减少邻省台站数据使用的影响。通过对 P_E 的空间分布特征与 M_P 的空间分布特征对比研究，发现这两种结果表示的辽宁台网的监测能力分布上基本一致，P_E 对于某一震级档的检测能力表达更加精细，而 M_P 的空间分布特征能够更加直观地展现出整个辽宁区域对于不同震级的监测情况。

5　结论与讨论

5.1　获得的认识

本文使用 PMC 方法计算得到辽宁测震台网 37 个台站的单台检测概率、合成检测概率及最小完整性震级 M_P 的空间分布特征，通过对计算结果的研究评估了辽宁测震台网的监测能力，并获得如下认识：(1)PMC 方法计算获得的台站检测概率能够反映台站对周边地震的检测情况，该方法基于实际地震计算，较好地评估了辽宁测震台网的监测能力。(2)辽宁测震台网受台站空间分布不均匀影响，在辽宁大连一带 M_P 达到 3.0 以上，是整个辽宁地区监测能力最为薄弱地区，可以通过在辽宁东部、东南部建设台站以提高监测能力。辽宁与河北交界地区

M_P 在 2.5～2.8 左右，是辽宁地区第二个监测能力薄弱的地区，虽然辽宁测震台网已经接入河北共享台站数据，但是由于接入台站数量较少且辽宁西部边界地区的台站分布呈直线型分布，边界地区的台站分布不合理可能导致监测能力降低。可以通过在辽宁西部地区建设台站或接入更多的河北共享台站的数据来提高该区域的台站密度，进而改善台站空间布局，以便提高该区域的监测能力。（3）由于 PMC 方法使用的是测震台网产出的实际观测报告作为原始数据进行计算，在地震定位时人为放弃了部分信噪比低或震中距较远台站的数据使用，可能会导致台站监测能力的实际下降，建议测震台网在产出地震观测报告时，提高台站数据的使用率，减少人为原因引起的监测能力下降。



(a) M_L1.0地震检测概率的空间分布　(b) M_L1.5地震检测概率的空间分布

(c) M_L2.0地震检测概率的空间分布　(d) M_P空间分布特征

图 3　合成检测概率分布及 M_P 空间分布特征

Fig.3　Synthetic detection probability distribution and M_P spatial distribution characteristics

5.2　影响因素

影响辽宁台网单台检测概率及合成检测概率的因素主要有三种：第一种由于台站分布密度的不均匀性，台站密度较高地区检测能力较高，如沈阳—辽阳—本溪—鞍山—盘锦一带位于辽宁中部，合成检测概率显示该区域能够 100％检测到 M_L1.5 地震，甚至在沈阳—辽阳—本溪一带对 M_L1.2 地震也具有 100％的检测能力，整个辽宁中部地区的检测能力明显高于其他区域。而辽宁南部大连地区受半岛地形限制，整个区域台站密度低，通过 M_P 空间分布特征可以看出，辽宁大连一带的监测能力在 M_L3.0 以上，监测能力明显低于辽宁其他区域。第二种是在地震编目时，为保证定位残差较小、标注震相位置准确、保证地震定位精度，在人工分析地震时会舍弃一些信噪比较差、震中距较大的台站的数据，导致部分台站单台检测概率降低，进而导致合成检测概率也会降低。第三种为保证评估结果的可靠性，同时考虑到辽宁测震台网的实际情况，本文使用的是 3 个台站记录到清晰震相的地震进行计算，对计算结果存在一定影响。并且本次计算只使用了辽宁测震台网产出的地震观测报告，由于辽宁接入邻省共享台站较少且空间分布较差，辽宁台网在地震编目时

使用邻省共享台站数据较少，本次检测能力评估缺失了部分邻省共享台站的检测能力情况，可能影响辽宁边界地区的监测能力评估结果。

5.3 其他因素

PMC 方法要求台站周边的地震活动要具有均匀性，而辽宁地区地震活动存在典型的不均匀性，虽然在本次计算已经删除了部分丛集地震，但是仍会对单台检测概率的计算结果存在一定的影响。此外，由于不同的监测能力评估方法得到的评估结果存在差异，本文仅是引入 PMC 方法评估辽宁测震台网监测能力，可能与其他方法获得的辽宁测震台网监测能力评估结果存在一定的差异。

致谢：本研究使用的是内蒙古地震局刘芳老师提供的 PMC 方法计算程序，并在程序使用过程中得到了内蒙古地震局张帆的帮助，在此一并感。

参考文献(References)

[1] SERENO T J, BRATT S R. Seismic Detection Capability at Noress and Implications for the Detection Threshold of a Hypothetical Network in the Soviet Union[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(B8): 10397-10414.

[2] 张黎珍，胡翠娥，李传江.赣南遥测数字地震台网监测能力估算[J].华南地震，2002，22(4)：34-38.
ZHANG Lizhen, HU Cuie, LI Chuanjiang. Evaluation of the Earthquake—Monitoring Capability of South Jiangxi Seismological Network[J]. South China Journal of Seismology, 2002, 22(4): 34-38.

[3] 季爱东，周彦文，李铂，等.山东数字地震台网的监测能力[J].地震研究，2009，32(2)132-136.
JI Aidong, ZHOU Yanwen, LI Bo, et al. Monitoring Capacity of Shandong Digital Seismic Network[J]. Journal of Seismological Research, 2009, 32(2): 132-136.

[4] GUTENBERG B. RICHTER C F. Frequency of Earthquakes in California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1944, 34(4): 185-188.

[5] OGATA Y, KATSURA K. Analysis of Temporal and Spatial Heterogeneity of Magnitude Frequency Distribution Inferred from Earthquake Catalogues[J]. Geophysical Journal International, 1993, 113(3): 727-738.

[6] 尹欣欣，曾文浩，李少华，等.青海祁连 M_S5.2 地震微震检测与目录完备性研究[J].地震工程学报，2019，41(1)：183-188.
YIN Xinxin, ZENG Wenhao, LI Shaohua, et al. Missing Earthquakes Detection and Completeness of Earthquake Catalogs of the 2015 Qilian, Qinghai M_S5.2 Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 183-188.

[7] WIEMER S, WYSS M. Minimum Magnitude of Completeness Reporting in Earthquake Catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(4): 859-869.

[8] WOESSNER J, WIEMER S. Assessing the Quality of Earthquake Catalogues: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95(2): 684-698.

[9] SCHORLEMMER D, WOESSNER J. Probability of Detecting an Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(5): 2103-2117.

[10] NANJO K Z, SCHORLEMMER D, WOESSUER J, et al. Earthquake Detection Capability of the Swiss Seismic Network[J]. Geophysical Journal International, 2010, 181(3): 1713-1724.

[11] 王亚文，蒋长胜，刘芳等.中国地震台网监测能力评估和台站检测能力评分(2008—2015 年)[J]，地球物理学报，2017，60(7)：2767-2778.
WANG Yawen, JIANG Changsheng, LIU Fang, et al. Assessment if Earthquake Monitoring Capability and Score of Seismic Station Detection Capability in China Seismic Network (2008—2015)[J]. Chinese J Geophys, 2017, 60(7): 2767-2778.

[12] 王鹏，郑建常，李铂.基于 PMC 方法的山东省测震台网监测能力评估[J].地球物理学进展，2016，31(6)：2408-2414.
WANG Peng, ZHENG Jianchang, LI Bo. Analysis of Detection Capability of Shandong Regional Seismic Network Based on PMC Method[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2408-2414.

[13] 刘芳，蒋长胜，张帆，等.内蒙古区域地震台网监测能力研究[J].地震学报，2014，36(5)：919-929.
LIU Fang, JIANG Changsheng, ZHANG Fan, et al. A Study on Detectioncapability of the Inner Mongoliaregional Seismic Network[J]. Acta Seismologica Sinica, 2014, 36(5): 919-929.

[14] 李智超，黄清华.基于概率完备震级评估首都圈地震台网检测能力[J].地球物理学报，2014，57(8)：2584-2593.
LI Zhichao, HUANG Qinghua. Assessment of Detectability of the Capital-circle Seismic Network by Using the Probability-based Magnitude of Completeness (PMC) Method[J]. Chinese Journal of Geophys, 2014, 57(8): 2584-2593.

[15] 中国地震局监测预报司.数字地震观测技术[M].北京：地震出版社，2003.
Department of Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. Digital Seismic Observation Technique[M]. Beijing: Seismological Press, 2003.