

彭利媚,刘林飞,陈祥开,等. 利用PMC方法评估海南测震台网地震监测能力[J]. 华南地震, 2022, 42(3): 21-28. PENG Limei, LIU Linfei, CHEN Xiangkai, et al. Assessment of Earthquake Monitoring Capability of Hainan Seismic Network Based on PMC Method[J]. South China journal of seismology, 2022, 42(3): 21-28]

## 利用PMC方法评估海南测震台网地震监测能力

彭利媚<sup>1</sup>, 刘林飞<sup>2, 3</sup>, 陈祥开<sup>1</sup>, 曾维顺<sup>1</sup>, 丁有兴<sup>1</sup>, 孙佩雯<sup>1</sup>, 李 健<sup>1</sup>, 李冬雅<sup>1</sup>

(1. 海南省地震局, 海口 570100; 2. 山西省地震局, 太原 030021;  
3. 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 太原 030025)

**摘要:** 利用“基于概率的完整性震级”PMC方法, 采用海南测震台网地震编目报告数据和台站资料, 计算了海南测震台网21个台站对海南岛陆及周边海域地震的检测概率、测震台网的合成检测概率及最小完整性震级。单台检测概率结果显示: 由于受台站布局、台基等因素影响, 海南岛陆中部台站的检测能力较强, 琼北地区4个火山口台和三亚台检测能力差。合成检测概率及最小完整性震级结果显示: 以屯昌为中心点以及周边的琼中、文昌、定安地区为检测高值地区; 接入广东广西共享台, 海南岛陆90%的地区基于概率的最小完整性震级 $M_p$ 达到 $M_L$ 1.5左右, 海南岛陆西南部分地区及海岸线50 km范围内 $M_p$ 达到 $M_L$ 2.0左右。结果表明: 海南岛陆中北部地震监测能力较强, 西南部及周边海域地震监测能力较弱, 研究结果希望能为进一步优化海南测震台网布局提供一些参考依据。

**关键词:** 最小完整性震级; PMC方法; 海南测震台网; 地震监测能力

中图分类号: P315.78

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)03-0021-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.03.03

## Assessment of Earthquake Monitoring Capability of Hainan Seismic Network Based on PMC Method

PENG Limei<sup>1</sup>, LIU Linfei<sup>2, 3</sup>, CHEN Xiangkai<sup>1</sup>, ZENG Weishu<sup>1</sup>,  
DING Youxing<sup>1</sup>, SUN Peiwen<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, LI Dongya<sup>1</sup>

(1. Hainan Earthquake Agency, Haikou 572900, China; 2. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, China; 3. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan Seismic Station, Taiyuan 030025, China)

**Abstract:** In this paper, using the PMC method of "probability based integrity magnitude" and the earthquake cataloging report data and station data of Hainan Seismic Network, the detection probability of 22 stations of Hainan Seismic Network for earthquakes on the land of Hainan Island and the surrounding sea area, the synthetic

收稿日期: 2022-04-15

基金项目: 海南省地震局科技创新团队地壳深部反演与地震机理创新团队资助

作者简介: 彭利媚(1978-), 女, 高级工程师, 主要从事地震监测及编目工作。

E-mail: 623294290@qq.com

通信作者: 刘林飞(1977-), 男, 工程师, 主要从事地震预警与系统运维工作。

E-mail: liulf2013@126.com

detection probability of seismic network and the minimum integrity magnitude are calculated. The results of single station detection probability show that due to the influence of station layout, station foundation, site response and other factors, the detection ability of stations in the central land of Hainan Island is strong, while the detection ability of four volcanic vent's stations and Sanya Station is poor. The results of synthetic detection probability and minimum integrity magnitude show that Tunchang is the central point and surrounding Qiongzong, Wenchang and Ding'an areas are the high detection value areas; with access to Guangdong and Guangxi shared station, the probability based minimum integrity magnitude  $M_p$  of 90% of Hainan Island reaches about  $M_L 1.5$ ,  $M_p$  in some areas in the southwest of Hainan Island and within 50 km of the coastline reaches about  $M_L 2.0$ . The results show that the seismic monitoring ability in the northern part of Hainan Island is strong, and the seismic ability in the southwest and surrounding sea areas is weak. The research results of this paper hope to provide some reference for further optimizing the layout of Hainan seismic network.

**Keywords:** Minimum integrity magnitude; PMC method; Hainan Seismic Network; Earthquake monitoring capability

## 0 引言

地震台网承担着地震监测的重要工作,地震观测资料的产出是地震预报、应急响应、工程地震研究等工作的基础。地震观测资料的质量在一定程度上受地震台网监测能力的影响,因此科学地对地震台网的监测能力进行评估,是非常有必要的,具有重要的意义。

目前,比较常用的评估测震台网监测能力方法主要有三类:一是根据震级衰减关系和噪声水平给出理论监测能力<sup>[1-3]</sup>,这类方法不受历史地震事件的限制,但是得出的结果与实际情况存在一定的差距;二是统计地震学方法,根据测震台网记录到的最小地震震级进行评估<sup>[4-5]</sup>;三是近年来比较前沿的PMC方法<sup>[6-9]</sup>,PMC方法是利用台网实际产出的地震目录和台站资料,能够比较客观评估地震监测能力,具有较高的精度,也适用于少震、弱震地区。海南数字测震台网经过“九五”、“十五”、背景场项目建设,现有测震台站24个,其中4个火山口台,共享广东、广西15个台站数据后,测震台网的监测能力有所提高,但是由于海南岛四周环海,台站分布不均匀,海南岛陆周边海域地区监测能力存在显著的区域不平衡等问题。海南岛属少震区,PMC方法能够实现对弱震和少震地震活动地区的“无缝”评估<sup>[10]</sup>。所以本文利用PMC方法,采用海南测震台网地震编目报告数据和台站资料,计算得到海南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,评估海南测震台网的监测能力,希望能为进一步优化海南测震台网布局提供

一些参考依据。

## 1 PMC方法原理

本文使用的软件是内蒙古地震局刘芳老师等编写的评估软件。根据软件说明书,前提条件和准备工作如下:①要求在研究时段内各台站地震震级的定义、台网对地震的触发条件保持不变;②在震级 $M$ (本文中震级 $M$ 是指地方震震级 $M_L$ )和震中距 $L$ 的二维分布图布上标注每个台站记录到的地震情况,并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 $M$ 和震中距 $L$ 的经验换算关系。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<sup>[11]</sup>。计算原理如下:

地方震震级测定随震中距衰减关系一般表示为:

$$M=c_1\log A-c_2\log L^*+c_3 \quad (1)$$

式(1)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。对于某个台站记录到两个地震的振幅均为 $A$ 的情况下,测得的与两个时间震中距 $L_1$ 和 $L_2$ 相对应的的震级分别为:

$$M_1=c_1\log A-c_2\log L_1+c_3 \quad (2)$$

$$M_2=c_1\log A-c_2\log L_2+c_3 \quad (3)$$

在震级-距离二维图上表示的台站监测概率需要构建 $M$ 与 $L$ 的经验转换关系。将公式(2)与(3)相减可得:

$$\Delta M^*=|c_2\log L_1-c_2\log L_2| \quad (4)$$

式(4)中震级差 $\Delta M^*$ 仅与震中距 $L$ 有关。根据规定<sup>[12]</sup>,我国地方震震级( $M_L$ )的测定采用仿真短周期位移记录(DD-1或伍德-安德森)的S波或Lg波最大振幅来测定:

$$M_L = \lg(A) + R(L) \quad (5)$$

式(5)中 $R(L)$ 为台站的量规函数。由此,公式(4)中的 $\Delta M^*$ 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-距离二维图上位置 $(M, L)$ 对应的台站检测概率时,需选定计算所用数据。Schorlemmer和Woessner<sup>[11]</sup>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,计算与位置 $(M, L)$ 对应的震级差 $\Delta M = M' - M$ ,以及利用公式(4)和(5)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<sup>[11, 13]</sup>:

$$L_M = \sqrt{\Delta M^2 + \Delta M^{*2}} \leq 0.1 \quad (6)$$

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 $N_+$ 和未被检测的地震事件数 $N_-$ ,并计算台站在 $(M, L)$ 处的检测概率:

$$P_D(M, L) = \frac{N_+}{N_+ + N_-} \quad (7)$$

“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:

$$P_E(M, x, t) = 1 - \sum_{i=0}^3 P_E^i \quad (8)$$

式(8)中, $P_E^0$ 、 $P_E^1$ 、 $P_E^2$ 和 $P_E^3$ 分别表示有0个、1个、2个和3个台站记录到的概率。台站没有检测能力的概率为

$$P_E^0 = \prod_{i=1}^s P_{N,i} \quad (9)$$

使用组合式的方法,得到能够被 $j$ 个台站记录到的概率为

$$P_E^j = \sum_{i=1}^{s_{C_j}} \left[ \prod_D C_j^S(i) \prod_N C_j^S C_j^S(i) \right] \quad (10)$$

依据式(8)~(10),得到“合成检测概率” $P_E(M, x, t)$ 为

$$P_E(M, x, t) = 1 - \left( \prod_{i=1}^s P_{N,i} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{s_{C_j}} \left[ \prod_D C_j^S(i) \prod_N C_j^S C_j^S(i) \right] \right) \quad (11)$$

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:

$$M_p(x, t) = \min_{M \in M} M \mid P_E(M, x, t) = 1 - Q \quad (12)$$

其中:取 $Q=0.0001$ (误差标准)

## 2 资料的选取

海南测震台网“十五”项目建成后于2007年开始试运行,至2010年台站仪器运行相对稳定,地震编目数据统一。目前,总共有24个台站,其中九所、临高台是2014年新增台,接入广东、广西台站数据后,台站布局不平衡得到一些改善,地震监测能力也有所提高。为了使研究结果更加准确,研究期间数据要相对一致,因此本文选取2010年至2021年7月海南及周边海域发生的地震全国统一编目数据和24个台站资料,利用PMC方法评估海南测震台网地震监测能力。选取的地震从震中分布图(图1)上看,地震分布随机,没有地震丛,更能真实反映台网检测能力,获得的结果更加稳定可靠。

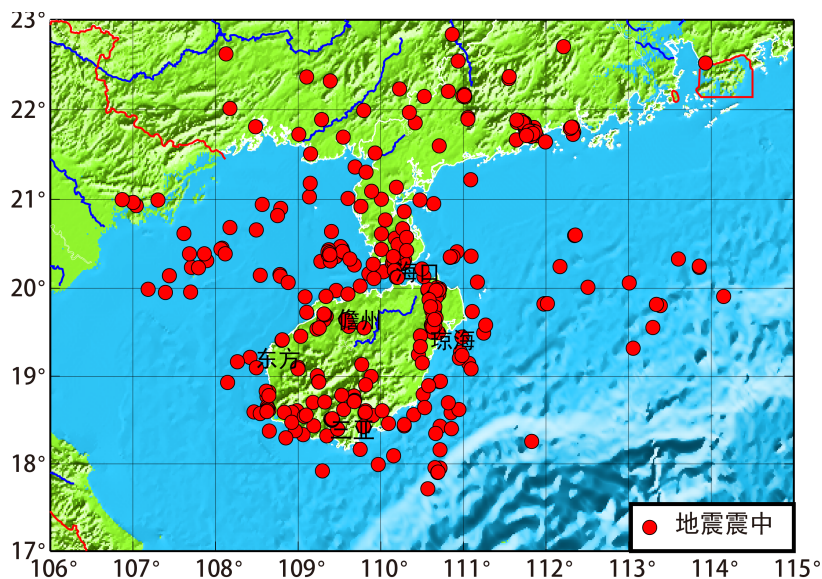


图1 震中分布图

Fig.1 Distribution of earthquakes

3 单台检测概率

本文选取至少4个台记录到的地震事件参与计算,得到海南测震台网21个台站的单台检测概率。由于九所台、临高台是2014年新增台,数据连续性不够,有待以后进一步研究,西沙台距离岛陆约300 km,未能计算出单台检测概率。为了更加直观反应海南测震台网21个台站对所选地震事件检测能力的差异,结合实际地震监测能力情况,本文拟用如下条件进行评估:① $M=M_L1.5$ 时 $P_D$ 是否达到100%;② $L=100$  km且 $P_D=100\%$ 所对应的震级 $M$ ;③ $M=M_L2.0$ 且 $P_D=100\%$ 时的震中距范围;④ $L=200$  km处, $P_D$ 是否达到100%,计算结果满足条件越多的台站则认为该台的检测能力越高<sup>[6]</sup>。满足4个条件的台站认为台站检测能力较强,满足1个

条件或者没有的台站认为台站检测能力弱,其他台站认为检测能力一般。根据以上条件,计算结果如表1,得出检测能力较强的台站有6个,分别是翁田台(WET)、万宁台(WAN)、五指山台(WZS)、澄迈台(CHM)、定安台(DAN)、琼中台(QZN)。检测能力弱的台站5个,分别是三亚台(SAY)、火山口(HSK)、永茂岭台(YML)、演丰台(SHP)、三江台(SAJ)。

检测能力较强的6个台站主要分布在海南岛陆的中北部(图2),台站布局合理,台基好(表1)。以琼中台为例,图3是琼中台单台检测概率,从图上看,随着震中距的增大检测能力逐渐减弱,随着震级的减小检测能力也逐渐减弱,符合测震台站的检测能力规律,检测能力最小震级达到 $M_L1.1$ ,震级 $M_L1.5$ 震中距30 km检测能力达到100%。

表1 海南测震台网21个台站的单台检测概率计算结果  
Table 1 Calculation results of single station detection probability of 21 stations in Hainan seismic network

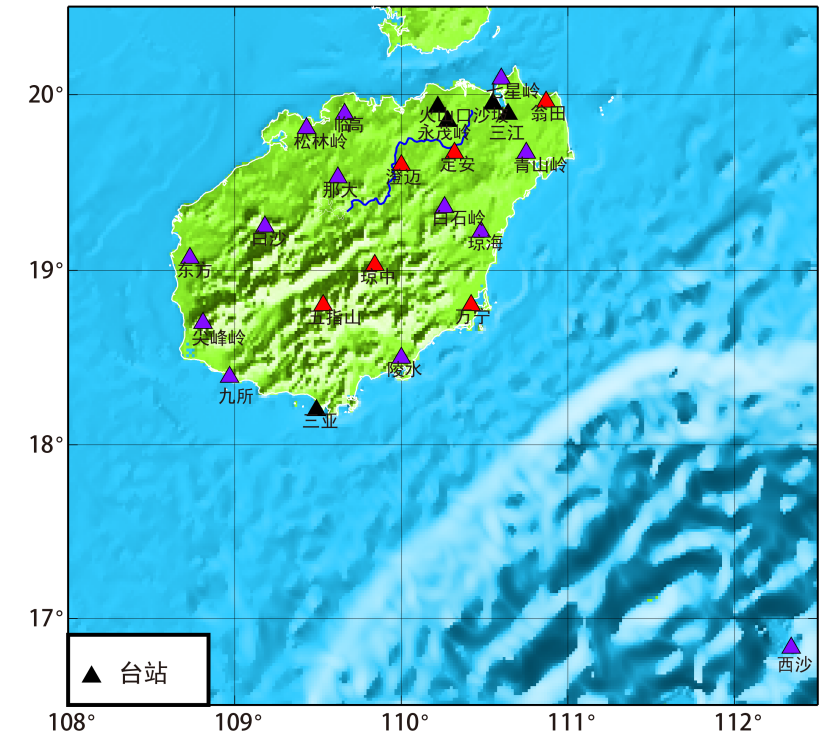
序号	台站 代码	台站 名称	$L/\text{km}$	$M_L$	$L/\text{km}$	$M_L$	检测能力	台基类型	启用 时间/年
			$M_L1.5\&$	$L=100\text{ km}\&$	$M_L2.0\&$	$L=200\text{ km}\&$			
			$P_D=100\%$	$P_D=100\%$	$P_D=100\%$	$P_D=100\%$			
1	WET	翁田台	30	2.5	90	2.6	较强	花岗岩	2007
2	WAN	万宁台	150	1.3	150	2.2	较强	花岗岩	2007
3	WZS	五指山	40	1.6	150	2.2	较强	花岗岩	2007
4	CHM	澄迈台	80	1.5	150	3.3	较强	花岗岩	2007
5	DAN	定安台	40	1.8	150	3.2	较强	玄武岩	2007
6	QZN	琼中台	40	2	150	3.5	较强	花岗岩	2007
7	SAY	三亚台	无	无	40	无	弱	硅质岩	2007
8	HSK	火山口	无	无	无	无	弱	玄武岩	2007
9	YML	永茂岭	无	3.3	无	无	弱	玄武岩	2007
10	SHP	演丰台	无	无	无	无	弱	玄武岩	2007
11	SAJ	三江台	无	无	无	无	弱	玄武岩	2007
12	NAD	那大台	无	1.6	150	3	一般	花岗岩	2007
13	DOF	东方台	无	3	40	3	一般	花岗岩	2007
14	QIH	琼海台	无	2.2	60	无	一般	砂砾岩	2007
15	LSH	陵水台	30	2.1	90	无	一般	花岗岩	2007
16	JFL	尖峰岭	无	1.9	150	2.7	一般	花岗岩	2007
17	BSH	白沙台	无	1.6	150	无	一般	花岗岩	2007
18	SLL	松林岭	无	2	230	2	一般	砂砾岩	2007
19	QXL	七星岭	无	2.1	70	2.5	一般	花岗岩	2007
20	QSL	青山岭	无	1.7	140	2.8	一般	底武岩	2007
21	BSL	白石岭	150	1.4	150	无	一般	花岗岩	2007



检测能力弱的5个台主要分布在琼北的4个火山口台和海南岛陆最南端的三亚台,5个台的台基都不好,三亚台还受到地理位置限制,记录到地震的包裹性不好,从而影响检测能力。4个火山口台以三江台(SAJ)为例,图4是三江台单台检测概率,从图上看,能记录到的地震很少,仅在震级 $M_L2.5$ 震中距20 km的地震检测概率能达到100%,

其他范围能检测到地震的概率很小,检测能力很弱。

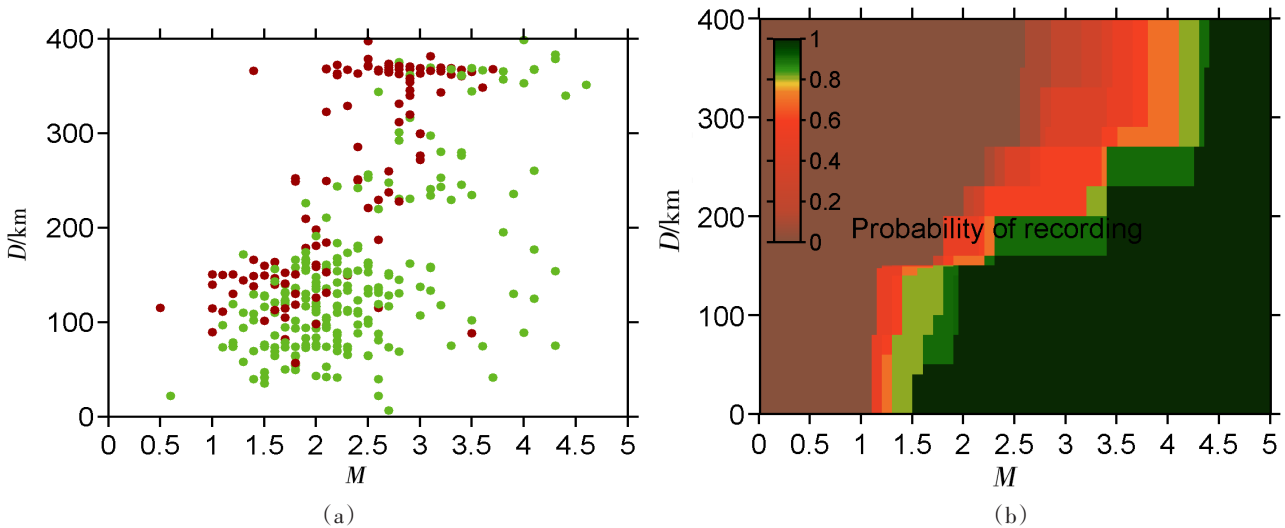
以上分析结果表明,台站布局、台基是影响海南测震台站检测能力的主要因素,合理接入邻省和周边国际共享台站数据可以改善海南台网的台站布局,从而提高海南测震台站的检测能力。



(红色代表检测能力较强的台站,黑色代表检测能力弱的台站,紫色代表其它台站)

图2 台站分布图

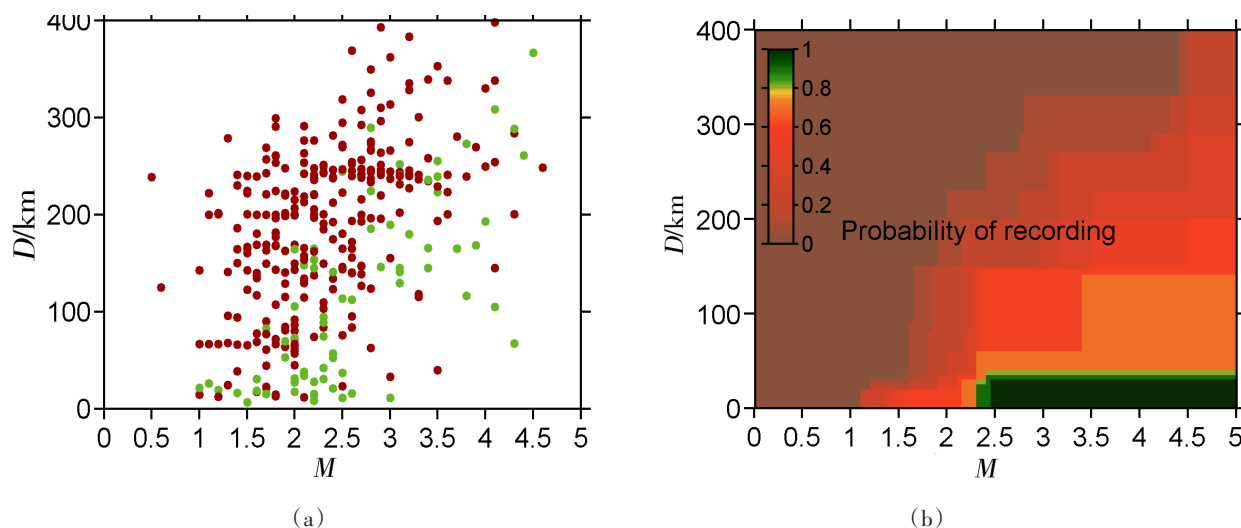
Fig.2 Distribution of stations



(a)是震级—距离图的原始点阵,图中红点为在台站周围发生的但未被该台站记录的地震,绿色为台站实际记录到的地震;(b)为PMC检测方法计算得到的单台检测概率,色标表示震级和震源距下的检测概率值。

图3 琼中台单台检测概率

Fig.3 Single station detection probability of Qiongzhong Station



(a)是震级—距离图的原始点阵,图中红点为在台站周围发生的但未被该台站记录的地震,绿色为台站实际记录到的地震;(b)为PMC检测方法计算得到的单台检测概率,色标表示震级和震源距下的检测概率值。

图4 三江台单台检测概率

Fig.4 Single station detection probability of Sanjiang Station

#### 4 合成检测概率 $P_E$ 及 $M_p$ 空间分布

图5是 $M_L1.2$ 、 $M_L1.3$ 、 $M_L1.5$ 、 $M_L1.8$ 四个震级档的 $P_E$ 的空间分布特征,从图5(a)可以看出,位于岛陆中部的屯昌地区检测能力最强,震级 $M_L1.2$ 的检测概率值达到99%,周边100 km范围内的琼海、定安、琼中和周边的部分地区检测概率值达到80%。从图5(b)可以看出,以屯昌为中心点,周边50 km范围内琼海、定安、琼中地区震级 $M_L1.3$ 的检测概率值达到99%,周边100 km范围内检测概率值达到90%。从图5(c)上看,除了海南岛陆西南的东方、乐方、三亚部分地区,其他地区震级 $M_L1.5$ 的检测概率值达到99%,海岸线50 km范围内的周边海域70%的地区检测概率值达到80%。图5(d)显示,除了海南岛陆南部少部分地区,海南岛陆地区震级 $M_L1.8$ 的检测概率值达到99%,海岸线50 km范围内的周边海域除了琼西南地区检测概率值达到80%,其他地区检测概率值达到99%。

图6是基于概率的最小完整性震级 $M_p$ 的空间分布,接入广东、广西的共享台,海南岛陆北部的检测能力有所提高,以屯昌、琼中、文昌、定安为中心点,周边100 km范围内覆盖面达到整个岛陆90%地区的监测能力最强,最小完整性震级 $M_p$ 达到 $M_L1.5$ 左右,琼西南部分地区监测能力相对弱些,最小完整性震级 $M_p$ 达到 $M_L1.8$ 左右。海岸

线50 km范围内覆盖面达到95%地区,最小完整性震级 $M_p$ 达到 $M_L2.0$ 左右。

$P_E$ 主要是分析不同震级档的检测能力变化情况, $M_p$ 主要是反应研究区域不同区域、不同震级的监测能力。通过对比海南岛陆及周边海域不同震级合成检测概率 $P_E$ 的空间分布与最小完整性震级 $M_p$ 的空间特征,研究表明,两者结果保持一致。综合以上分析,海南岛陆琼中北部监测能力最强,充分说明共享台的重要性。琼西南及周边海域监测能力较弱。为了进一步提高海南测震台网的监测能力,可以增加广东广西和周边国际共享台,加密琼西南台站,以及在海南岛陆周边台基较好、方便维护的小岛上新建台站。

#### 5 结论和讨论

本文基于PMC方法,利用海南测震台网地震编目报告数据和台站资料,科学真实评估了海南测震台网的监测能力,得出如下结论:

计算得出海南测震台网21个台站对海南岛陆及周边海域地震的单台检测概率、测震台网的合成检测概率及最小完整性震级。单台检测概率结果显示,合理分布在琼中北部,台基好的6个台站:翁田台(WET)、万宁台(WAN)、五指山台(WZS)、澄迈台(CHM)、定安台(DAN)、琼中台(QZN)检测能力相对会强;三亚台(SAY)、火山口(HSK)、永茂岭台(YML)、演丰台(SHP)、三江

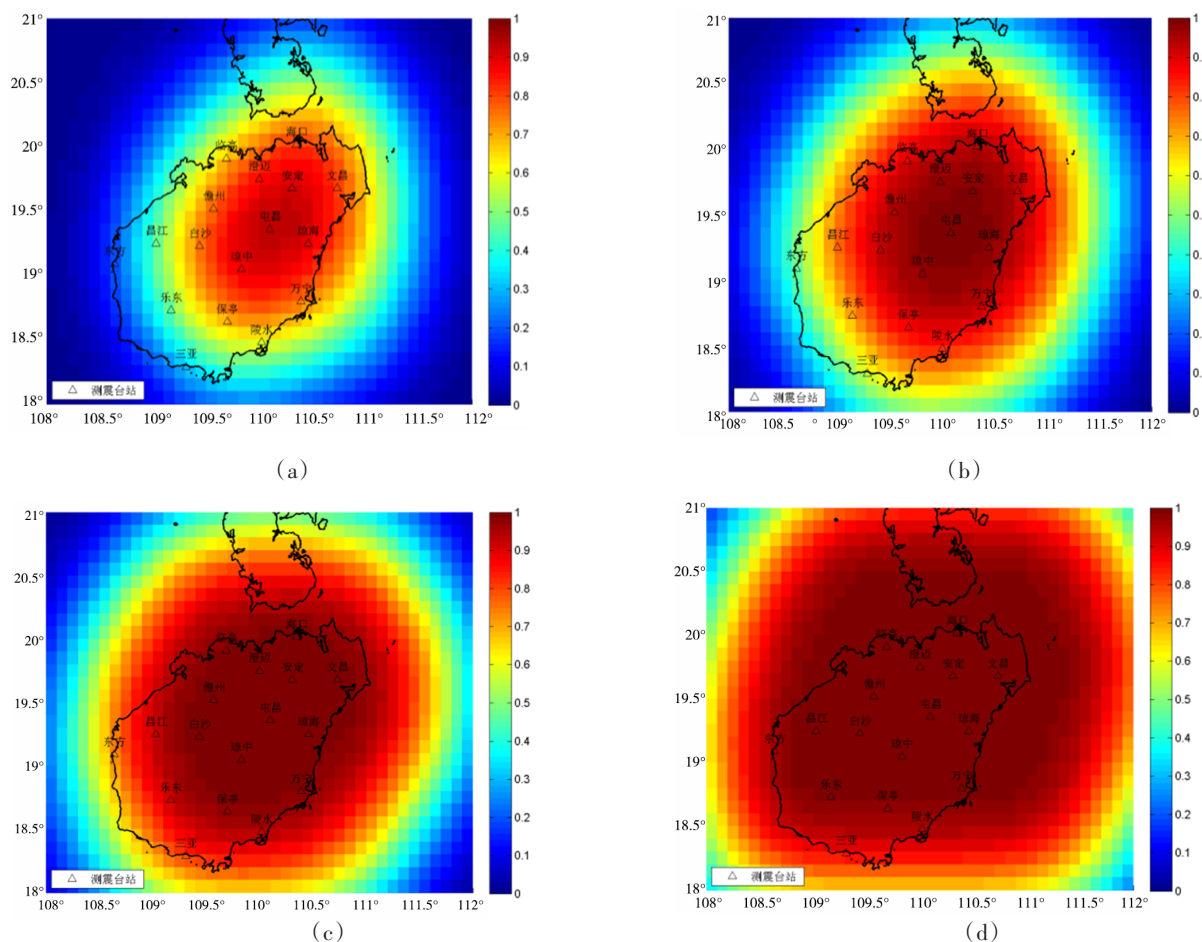
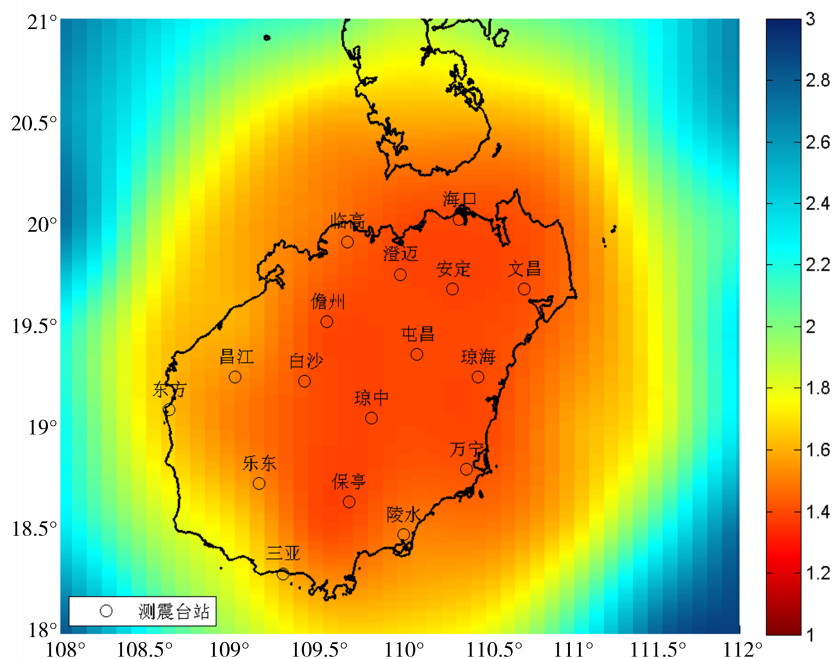


图5 检测概率空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of detection probability

图6 基于概率的最小完整性震级  $M_p$  的空间分布Fig.6 Spatial distribution of the minimum integrity magnitude  $M_p$  based on probability

台(SAJ)5个台站检测能力弱,主要因素是台基不好,三亚台还受地理位置限制。合成检测概率 $P_E$ 及 $M_p$ 空间分布特征显示,海南岛陆90%地区的最小完整性震级 $M_p$ 达到 $M_L1.5$ 左右,覆盖全岛及海岸线50 km范围内95%地区,最小完整性震级 $M_p$ 达到 $M_L2.0$ 左右。屯昌地区监测能力最强,能监测到 $M_L1.2$ 及以下的地震,其次是屯昌周边的琼中、文昌、定安地区,监测能力达到 $M_L1.3$ 左右,其他岛陆地区监测能力达到 $M_L1.5$ 左右,周边海域监测能力达到 $M_L2.0$ 左右。以上结果说明台站的台基和布局的合理性是影响监测能力的主要因素。因此,增加广东广西和周边国际共享台,加密琼西南台站,以及在海南岛陆周边方便维护的小岛上新建台站,能有效提高海南琼西南和周边海域的监测能力。新建台对台基的选择也是非常重要。

本文数据是利用海南测震台网实际产出的观测报告,为了提高编目质量,钟差比较大的台站不参与定位,因通信中断造成台站断记未能记录到地震事件,这些因素造成台站对实际地震检测能力的下降。为此建议以后加强台站仪器的钟差校正,台站增加4G+VPN双链路通信传输数据,提高台站的监测能力。

致谢:感谢内蒙古自治区地震局刘芳研究员为本文研究提供程序、山西省地震局刘林飞工程师在操作过程中给予指导以及审稿老师提出宝贵的意见!

## 参考文献

- [1] 牟磊育,郑钰. 京津冀地区地震台网监测能力分析[J]. 中国地震, 2016, 32(1): 134-142.
- [2] 曹舸斌,蔡明军,李文涛,等. 云南测震台网地震监测能力分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(2): 71-76.
- [3] 袁勇,周冬瑞,谢石文,等. 皖南地区区域地震台网监测能力分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(5): 36-40.
- [4] 高家乙,闫睿,谢健健. 河南地区地震目录最小完整性震级探讨[J]. 地震地磁观测与研究, 2021, 42(5): 5.
- [5] 冯建刚,蒋长胜,韩立波,等. 甘肃测震台网监测能力及地震目录完整性分析[J]. 地震学报, 2012, 34(5): 13.
- [6] 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(5): 919-929.
- [7] 李智超,黄清华. 基于概率完备震级分析方法评估首都圈地震台网检测能力[C] //中国地球物理学会第二十七届年会论文集. 北京:地震出版社, 2011.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王亚文,蒋长胜. 南北地震带地震台网监测能力评估的不同方法比较研究简[J]. 地震学报, 2017, 39(3): 15.
- [11] Schorlemmer D, Woessner J. Probability of Detecting an Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(5): 2103-2117.
- [12] 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.
- [13] Gentili S, Sugan M, Peruzza L, et al. Probabilistic completeness assessment of the past 30 years of seismic monitoring in northeastern Italy[J]. Phys Earth Planet Inter, 2011, 186(1/2): 81-96.