

王亚文, 蒋长胜. 2017. 南北地震带地震台网监测能力评估的不同方法比较研究. 地震学报, 39(3): 315-329. doi:10.11939/jass.2017.03.002.

Wang Y W, Jiang C S. 2017. Comparison among different methods for assessing monitoring capability of seismic station in North-South Seismic Belt. Acta Seismologica Sinica, 39(3): 315-329. doi:10.11939/jass.2017.03.002.

南北地震带地震台网监测能力评估 的不同方法比较研究^{*}

王亚文 蒋长胜^{*}

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 为探讨不同地震台网监测能力评估方法的结果差异性及其原因, 本文选用目前国际上比较前沿的“基于概率的完整性震级”(PMC)方法和“完整性震级范围”(EMR)方法, 以及中国地震台网常规采用的“震级-最大距离”方法, 对 2008 年 10 月 1 日—2015 年 9 月 17 日南北地震带地区表征地震监测能力的最小完整性震级进行了比较研究. 研究中考虑了以往关注不够的地震观测质量一致性问题, 统一采用至少 3 个台站记录的地震资料. 结果显示, 3 种方法的结果差异显著, 最小完整性震级的差值在南北地震带个别地区甚至可达 $M_L 2.0$, 其中, PMC 方法获得的最小完整性震级 M_p 值在 32°N 以北地区显著低于其它两种方法, 震级-最大距离方法获得的最小完整性震级 M_L 低值结果仅与高台站密度地区有关, 与包括 EMR 方法获得的最小完整性震级 M_{CEMR} 相比较在统计均值上则呈 $M_{\text{CEMR}} < M_p < M_L$. 进一步对各地震台站的地震检测能力进行评分, 结果显示, 台站运维水平和对记录地震分析的完整程度, 是造成 M_p 值显著不同于其它方法结果的主要原因, 而是否选用相同的记录台站数量等数据质量约束标准, 会造成 EMR 方法与其它方法结果的显著差异. 因此, 考虑到地震台网运行的实际情况和不同评估方法的计算原理, 推荐 PMC 方法用于地震监测能力的评估.

关键词 最小完整性震级 M_p 地震检测能力 基于概率的完整性震级(PMC)方法 完整性震级范围(EMR)方法

doi:10.11939/jass.2017.03.002 中图分类号: P315.08 文献标志码: A

Comparision among different methods for assessing monitoring capability of seismic station in North-South Seismic Belt

Wang Yawen Jiang Changsheng^{*}

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

Abstract: In order to explore the differences and causes of the methods for assessing monitoring capability of different seismic networks, this paper chooses the “probability-based magnitude of completeness” (PMC) and “entire-magnitude-range” (EMR) methods which are the relatively frontier in the

^{*} 基金项目 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(131551KYSB20160002)资助.

收稿日期 2016-07-21 收到初稿, 2016-09-05 决定采用修改稿.

[†] 通讯作者 e-mail: jiangcs@cea-igp.ac.cn



world, and the “magnitude-maximum distance” method applied routinely in China Seismic Networks to compare minimum magnitude of completeness (marked as M_p , M_{cEMR} and M_r , respectively, obtained by the above three methods) in the North-South Seismic Belt region during the time span from 1 October 2008 to 17 September 2015. The consistency of data observation quality is also considered, which is not paid enough attention in previous studies, and the selected seismic events are recorded by at least three stations. The results show that the assessing results of the three methods are significant different, and the difference between any two methods can reach to $M_L 2.0$ for some specific positions in the North-South Seismic Belt. The M_p result is significantly lower than the results by the other two methods in the region to the north of 32°N , low M_r value by the magnitude-maximum distance method is only related to the higher density seismic station region. In general the statistical relationship is $M_{cEMR} < M_p < M_r$. Furthermore, the detection capability score results reveal that the station operational level and the completeness in earthquake record analyses are the main reasons that the M_p significantly differs from the results calculated by other methods, and data quality constraint criteria such as the amount constraint of recorded stations whether used or not, will cause significantly different results of the EMR method from other methods. Considering practical situation of the seismic network in operation and calculation principles of the three assessment methods, the PMC method is more reasonable and recommended for earthquake monitoring ability assessment work.

Key words: minimum magnitude of completeness; seismic detection capability; probability-based magnitude of completeness (PMC); entire-magnitude-range (EMR)

引言

测震台网监测能力评估由于其重要的基础性作用而得以迅速发展,多种评估技术方法得到成功应用,例如完整性震级范围(entire-magnitude-range, 简称为 EMR)方法(Woessner, Wiemer, 2005)、最优拟合度(goodness of fit test, 简称为 GFT)方法(Wiemer, Wyss, 2000)、最大曲率(maximum curvature method, 简称为 MAXC)方法(Wiemer, Wyss, 2000)、 b 值稳定性(M_c by b -value stability, 简称为 MBS)方法(Cao, Gao, 2002)、分段斜率中值(median-based analysis of the segment slope, 简称为 MBASS)分析法(Amorèse, 2007)等基于古登堡-里克特关系的统计地震学方法,以及基于地震波形记录和噪声水平的评估技术(Ringdal, 1975; Gomberg, 1991; Kväerna, Ringdal, 1999). 近年来国际上一些新技术,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; Schorlemmer *et al*, 2010)和基于贝叶斯的完整性震级(Bayes-based magnitude of completeness, 简称为 BMC)方法(Mignan *et al*, 2013),由于其不依赖于地震分布假设并可避免一些区域地震分布的复杂性而得到广泛关注. 目前中国正在参与的国际“地震可预测性合作研究”(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability, 简称为 CSEP)计划(Jordan, 2006)中,按照统一研究区域和数据来源开展地震预测模型“竞争性”研究的需求,首先需要评估最小完整性震级

M_c , 并将其作为相关的地震预测模型构建、检验和测试运行的研究基础。按照 CSEP 计划推荐的“标准化”做法, PMC 方法已成为全球 CSEP 检验中心评估 M_c 的常规评估方法, 并在一些国家的 CSEP 检验中心得到应用 (Schorlemmer, Woessner, 2008; Nanjo *et al*, 2010b; Schorlemmer *et al*, 2010; Gentili *et al*, 2011)。

在不同地震台网监测能力评估方法的应用研究中, 结果差异性及其原因近年来备受关注。Woessner 和 Wiemer (2005) 在北加州地区针对 EMR, MAXC, GFT 和 MBS 等方法的比较研究结果表明, 对表征地震台网监测能力的重要参量——最小完整性震级 M_c , 存在 EMR 方法评估结果高于 MAXC, GFT-90% 和 GFT-95% 方法评估结果的情况。Schorlemmer 和 Woessner (2008) 在南加州地区对 PMC 方法与 EMR 方法的比较研究结果显示, M_c 评估结果在该地区多数点位上 PMC 方法得到的 M_c 小于 EMR 方法所得的 M_c 。黄亦磊等 (2016) 的数值实验结果表明: MAXC 和 GFT 方法可能会低估 M_c 结果, 而 EMR 方法可给出稳定、适中的 M_c 结果; 地震目录的时、空非均匀性对各种评估方法结果均可造成不同程度的影响。王亚文等 (2017) 利用基于 PMC 方法发展的“地震检测能力评分”技术, 考察了中国地震台网的运行质量对评估结果的影响。

由于目前对各种地震监测能力评估方法的应用方案尚无统一认识, 对不同区域的应用差异性及其原因的分析仍在持续开展中。目前已有的比较研究尚未注意到是否应对一些方法进行地震观测资料质量的统一约束, 以及由此可能造成的不同方法的“不可比较性”问题, 而且地震台站本身的运行维护质量、记录地震的分析完整程度是否可能造成不同方法评估结果的差异, 也仍需讨论分析。此外, 关于 CSEP 计划“中国检验中心”(Chinese CSEP Testing Center) 测试区地震监测能力的评估, 目前尚未开展多方法的比较研究。

鉴于此, 本文拟将 CSEP 计划“中国检验中心”的测试区——南北地震带作为研究区, 选用国际上较为前沿的 PMC 方法和 EMR 方法, 以及目前中国地震台网在日常运行中常规使用的震级-最大距离方法 (中国地震局监测预报司, 2007), 考察其评估结果的差异性, 并讨论结果差异产生的可能原因, 以期为南北地震带地区基于统计地震学的地震预测和其它监测分析应用提供参考。

1 最小完整性震级估算方法及计算原理

1.1 基于概率的完整性震级(PMC)方法

PMC 方法 (Schorlemmer, Woessner, 2008; Schorlemmer *et al*, 2010) 无需假定震级分布关系, 利用地震台网实际产出的观测资料评估其监测能力。PMC 方法是基于单个台站的“检测能力”评估进行综合概率计算, 可实现对弱震和少震地震活动地区的“无缝”评估。PMC 方法的计算主要分为以下两个步骤:

第一步: 利用台站周边被检测到的地震事件数目 N_+ 和未被检测到的地震事件数目 N_- , 在震级 M 和震源距离 L 的二维空间中计算单台检测概率 $P_D(M, L)$ 为 (Schorlemmer, Woessner, 2008)

$$P_D(M, L) = \frac{N_+}{N_+ + N_-}, \quad (1)$$

计算中设定所用地震数目 $N \geq 10$, 选取地震事件的阈值 L_M 为 (Schorlemmer, Woessner, 2008; Gentili *et al*, 2011)

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

式中, ΔM 为地震事件的震级与计算参考点(M, L)的震级 M 之差, ΔM^* 为地震事件的震级与由震级测定公式(震级-距离衰减关系)将震源距 L 转换成的震级 M^* 之差.

第二步: 利用各单台检测概率 $P_D(M, L)$, 计算在空间位置 x 处的地震同时被 i 个台站检测到的概率 P_E^i . 当 $i=0$ 时, 有

$$P_E^0 = \prod_{i=1}^s [1 - P_{D,i}(M, L)], \quad (3)$$

进一步计算震级档 M 在位置 x 处 t 时刻的地震台网检测概率 $P_E(M, x, t)$. 考虑到中国地震台网的实际情况, 按照选用至少 3 个台站记录的标准计算(王亚文等, 2017), 这就相当于扣除仅被 0, 1 和 2 个台站记录的联合概率, 即在此条件下的地震台网检测概率可表示为

$$P_E(M, x, t) = 1 - \sum_{i=0}^2 P_E^i. \quad (4)$$

此外, 还可获得所有震级档 M 在位置 x 处 t 时刻的最小完整性震级 M_p 为

$$M_p(x, t) = \min M | P_E(M, x, t) = 1 - Q, \quad (5)$$

式中 Q 为地震被漏记的阈值水平, 这里设定为 0.01.

1.2 完整性震级范围(EMR)方法

EMR 方法(Woessner, Wiemer, 2005)在评估最小完整性震级 M_c (为区别于其它方法的评估结果, 这里表示为 M_{cEMR})时, 为接近真实地描述的地震震级-频度分布关系, 对于震级高于 M_{cEMR} 的部分假设满足古登堡-里克特关系(Gutenberg, Richter, 1944), 并使用最大似然法估计幂律参数(Aki, 1965); 而对于震级低于 M_{cEMR} 的部分则采用正态累积分布函数表示地震台网对某一震级下检测到一次地震的概率:

$$q(M | \xi, \epsilon) = \begin{cases} \frac{1}{\epsilon\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{M_{cEMR}} \exp\left[-\frac{(M-\xi)^2}{2\epsilon^2}\right] dM, & M < M_{cEMR}, \\ 1, & M \geq M_{cEMR}, \end{cases} \quad (6)$$

式中: ξ 为 50% 的地震均被记录到时所对应的震级; ϵ 为标准偏差, ϵ 越大, 所对应台网监测能力下降的速度越快. 参数 ξ 和 ϵ 也同样采用最大似然法估计. 由此, 利用 EMR 方法对真实的震级-频度分布关系进行拟合, 就是使得最小完整性震级 M_{cEMR} 两侧的震级-频度分布数据的似然函数最大化的过程.

1.3 震级-最大距离方法

震级-最大距离方法(中国地震局监测预报司, 2007)是目前我国各区域地震台网计算台网监测能力的常规方法. 其基本原理是: 以各台站为圆心, 并以检测到同一震级的最大距离为半径画圆, 将至少 N 个以上台站的圆弧包围区域作为地震台网对某一震级的监测范围; 之后将不同震级的监测范围叠加, 即可得到整个地震台网的监测能力. 按照中国地震局监测预报司(2007)推荐的计算方式, 即在空间网格点上, 将网格点到台网中所有台站的距离 Δ 以及平均台基噪声有效值 E_N (单位为 m/s) 带入近震震级公式:

$$M_L = \lg E_N + R(\Delta) + 6.1, \quad (7)$$

式中的 R 为台基校正项, 可通过查找近震震级公式的相应表格获得. 为兼顾部分台基噪声水平较低的沉积层较厚地区台站的情况并按照较为苛刻的条件, 即平均台基噪声有效值 E_N 按照满足正常地震观测的 1—20 Hz 频带时地动速度的下限 1×10^{-7} 来计算. 对于每个网格点获得的 N 个计算结果, 按照从小到大的顺序, 选取第 3 个台站作为网格点上最小完整性震级 M_r 的结果.

2 研究区域和所用资料

本文选取南北地震带地区 (19°E — 45°E , 94°N — 110°N) 为研究区. 南北地震带位于我国中部, 作为青藏高原、鄂尔多斯地块、四川盆地、华南地块的交汇部位 (Zhang *et al.*, 2003), 由一系列不相连并有不同变形形式的活动构造带组成, 是中国大陆 I 级活动地块的重要边界带 (邓起东等, 2002; Zhang *et al.*, 2003). 受印度板块和欧亚板块碰撞、推挤作用的影响, 研究区的地壳厚度变化剧烈, 从东部的 30—46 km 增厚至西部的 46—74 km (Li *et al.*, 2006). 南北地震带同时也是中国大陆浅源地震最活跃的巨型地震带 (易桂喜, 闻学泽, 2000), 历史上曾发生过多次 $M_{8.0}$ 以上大地震, 包括 1654 年天水南 $M_{8.0}$ 地震、1739 年银川—平罗 $M_{8.0}$ 地震、1833 年嵩明 $M_{8.0}$ 地震、1879 年武都 $M_{8.0}$ 地震、1920 年海原 $M_{8\frac{1}{2}}$ 地震、1927 年古浪 $M_{8.0}$ 地震, 以及 2008 年汶川 $M_{8.0}$ 地震.

南北地震带地区同时也是中国参与全球 CSEP 计划的“CESP 中国检验中心”研究区域. 按照 CSEP 计划的科学目标, 针对南北地震带地区已先后开展了图像信息学 (pattern informatics, 简称为 PI) 算法等地震预测模型构建 (Zhang *et al.*, 2016), 以及利用 EMR 方法和 BMC 方法开展南北地震带地区最小完整性震级 M_c 的评估工作 (韩立波等, 2012; Mignan *et al.*, 2013).

本文数据主要来源于地震观测报告、地震目录和地震台站信息, 其中, 地震观测报告和地震目录均来自全国统一正式编目地震观测报告^①. 研究时段起自 2008 年 10 月 1 日, 也即“十五”项目中国地震台网数字化改造完成后正式提供地震观测报告等数据产品的时间, 截至 2015 年 9 月 17 日. 选择研究时段内连续运行并用于日常地震编目的固定地震台站, 共包括 54 个南北地震带地区的国家地震台, 以及四川、云南、重庆、青海、贵州、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西等省级区域地震台网的 235 个地震台站. 与研究区域、研究时段和所选台站相对应的地震事件共计 36 万 5 349 个, 地震观测报告中相应的 P 波 (直达波 P_g , 首波 P_n) 震相共计 233 万 4 164 条.

此外, 根据 PMC 方法的计算条件需求, 研究中还进一步筛选了相应的 0 级以上、记录台站至少为 3 个的地震观测报告, 筛选后的地震事件为 26 万 137 个, 所包含的 P 波震相为 212 万 8 915 条.

3 不同方法对南北地震带地震监测能力的评估

为对比研究南北地震带地区 PMC 方法、EMR 方法, 以及震级-最大距离方法计算所得的最小完整性震级 M_c 的差异, 首先统一采用 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间网格对南北地震带进行计算格点划分, 对 2008 年 10 月 1 日—2015 年 9 月 17 日的地震事件按照至少被 3 个台站记

① 中国地震台网中心. 2015. 全国地震编目系统. <http://10.5.202.22/bianmu/index.jsp>.

录的原则进行筛选,通过 3 种方法分别获得相应的结果. 此外,为区分 3 种不同方法计算获得的 M_c 结果,本文用 M_p 表示 PMC 计算结果,用 M_{cEMR} 表示 EMR 方法计算结果,用 M_r 表示震级-最大距离法计算结果.

对于 PMC 方法,为确保所用观测报告的地震定位精度,要求所用地震事件至少被 4 个台站记录(Schorlemmer, Woessner, 2008),但考虑到我国地震台网布设的实际情况,本文选用至少 3 个台站记录计算 M_p ; EMR 方法的计算,则参照 Nanjo(2010a)和韩立波等(2012)所选用的参数,以所计算网格点为圆心,选取地震事件满足最小空间半径 $R_{min}=100\text{ km}$,最大半径 $R_{max}=200\text{ km}$,以及计算用最少地震数 $N=100$. 为确保 M_{cEMR} 计算结果的可信度,使用“自举法”(bootstrap)(Efron, 1979; Chernick, 1999)的蒙特卡罗近似来估计其误差 δM_{cEMR} (Schorlemmer *et al*, 2003; Woessner, Wiemer, 2005),并将 $\delta M_{cEMR} \leq 0.3$ 作为最终结果的筛选条件. 此外,为与 PMC 方法、震级-最大距离法结果进行比较,也同样对地震事件按照至少被 3 个台站记录进行资料筛选.

利用 3 种方法计算所得的最小完整性震级的空间分布如图 1 所示,可见不同方法计算所得结果差异显著. 与 M_r 和 M_{cEMR} 明显不同, M_p 空间分布(图 1a)显示: 南北地震带北部

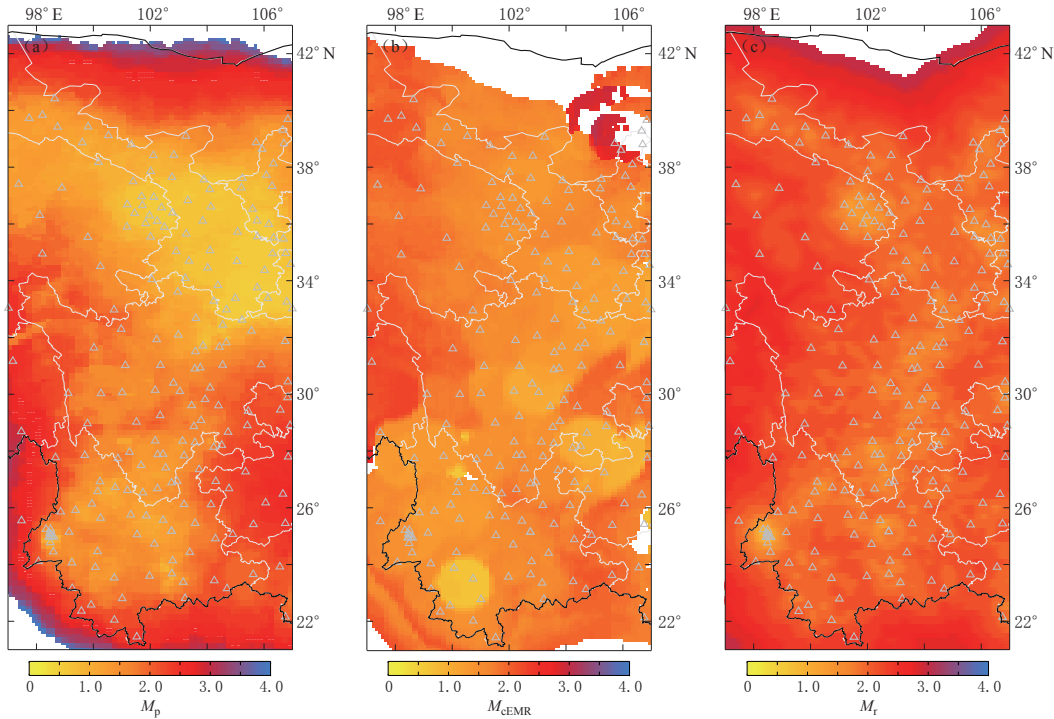


图 1 利用不同方法计算得到的南北地震带地区最小完整性震级的空间分布

图中三角形为计算所用的 289 个地震台站,下同. (a) 利用 PMC 方法计算得到的最小完整性震级 M_p 的空间分布; (b) 利用 EMR 方法计算得到的最小完整性震级 M_{cEMR} (在 $\delta M_c \leq 0.3$ 情况下) 的空间分布; (c) 利用震级-最大距离法计算得到的最小完整性震级 M_r 的空间分布

Fig. 1 Distribution of minimum magnitude of completeness in the North-South Seismic Belt calculated by different methods. The black triangles show the 289 seismic stations used (a) Distribution of M_p calculated by PMC method; (b) Distribution of M_{cEMR} (in the case of $\delta M_c \leq 0.3$) calculated by EMR method; (c) Distribution of M_r calculated by magnitude-maximum distance method

地区(32°N 以北)的监测能力明显高于南段,大部分地区 $M_p \leq M_L 1.0$; 重庆和贵州等地区监测能力明显偏低,部分地区 M_p 约为 $M_L 2.5$. 由图 1b 所示给出的 M_{cEMR} 空间分布可见: 南北地震带中南部地区(34°N 以南)的监测能力较高,大部分地区 $M_{cEMR} \leq M_L 1.5$; 南北地震带北部地区(34°N 以北)的监测能力相对南部偏低,多数地区 $M_{cEMR} \geq M_L 1.5$; 内蒙古大部分地区由于地震数目不足而无法给出计算结果,银川—磴口等部分可获得结果的地区,其 M_{cEMR} 约为 $M_L 2.5$. 图 1c 给出了利用震级-最大距离法计算得到的最小完整性震级 M_r 的空间分布,可以看出, M_r 相比 M_p 和 M_{cEMR} 总体上偏高,表现为相对较低的监测能力. 受计算原理所限, M_r 结果中监测能力高低的分布主要取决于该地区的台站密度.

图 2 给出了 3 种方法在全部空间网格点的计算结果累积分布曲线,可以看出,在南北地震带 10%—90% 的网格点上: M_p 分布在 $M_L 1.0$ —3.0 范围内,正态分布拟合的均值 $\mu \approx M_L 2.0$,标准偏差 $\sigma = 0.7641$; M_{cEMR} 分布在 $M_L 1.3$ —2.2 范围内,正态分布拟合的均值 $\mu \approx M_L 1.7$,标准偏差 $\sigma = 0.3947$; M_r 分布在 $M_L 1.8$ —2.6 范围内,正态分布拟合的均值

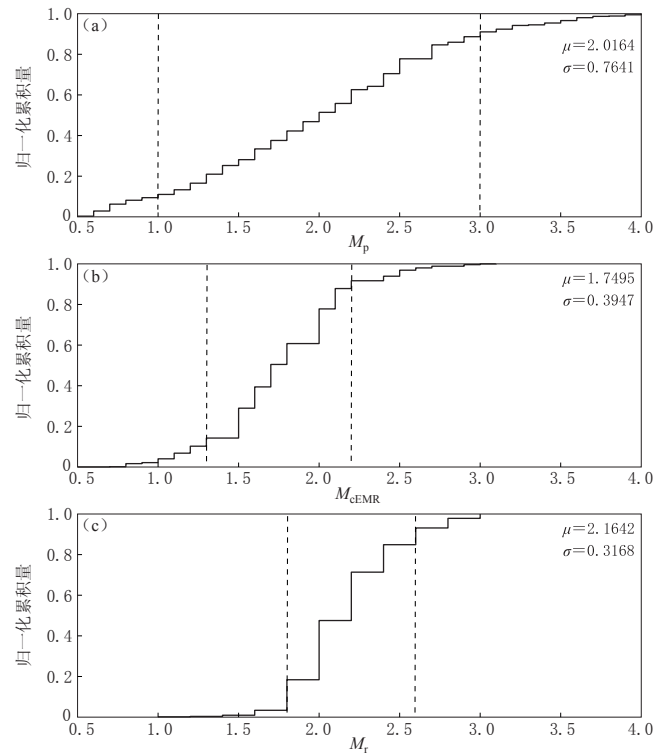


图 2 利用不同方法计算得到的南北地震带地区各空间网格点的最小完整性震级的累积分布
(a) 利用 PMC 方法计算得到的最小完整性震级 M_p 的累积分布; (b) 利用 EMR 方法计算得到的最小完整性震级 M_{cEMR} ($\delta M_c \leq 0.3$ 情况下) 的累积分布; (c) 利用震级-最大距离法计算得到的最小完整性震级 M_r 的累积分布. 子图中的两条黑色虚线标出了累积的空间网格点占总数 10% 和 90% 的位置

Fig. 2 Cumulative distribution of minimum magnitude of completeness in all the pixels of the North-South Seismic Belt calculated by different method

(a) Cumulative distribution of M_p calculated by PMC method; (b) Cumulative distribution of M_{cEMR} (in the case of $\delta M_c \leq 0.3$) calculated by EMR method; (c) Cumulative distribution of M_r calculated by magnitude-maximum distance method. The two black dashed lines in each subplots indicate the accumulated pixels accounting for 10% and 90% of the total, respectively

$\mu \approx M_L 2.2$, 标准偏差 $\sigma = 0.3168$. 上述统计结果中, M_p 在南北地震带地区展示了更强的空间差异性, 而从均值 μ 的角度上总体呈 $M_{\text{cEMR}} < M_p < M_r$.

基于 PMC 方法给出的南北地震带北部地区明显较高的地震监测能力结果, 进一步考察相应的不同震级档对应的地震检测概率 P_E 的空间分布. 同样选用 2008 年 10 月 1 日—2015 年 9 月 17 日的地震记录, 震源深度设定为 10.0 km, 分别计算 $M_L 0.5$, $M_L 1.0$ 和 $M_L 1.5$ 震级水平所对应 P_E 的空间分布, 结果如图 3 所示. 其中, 图 3a 中 $M_L 0.5$ 地震可被检测到的概率 $P_E|_{M=M_L 0.5} \geq 0.99$ (后文简称为 $P_{0.5}$, 其它表述方法类似) 的范围覆盖了甘肃东南部、四川北部地区以及滇西南部分地区, 显示了这些地区具有较高的监测能力. 而图 3b 和图 3c 中随着检测震级的增大, 这些范围逐步扩大, 与图 1a 给出的 M_p 分布结果较为一致.

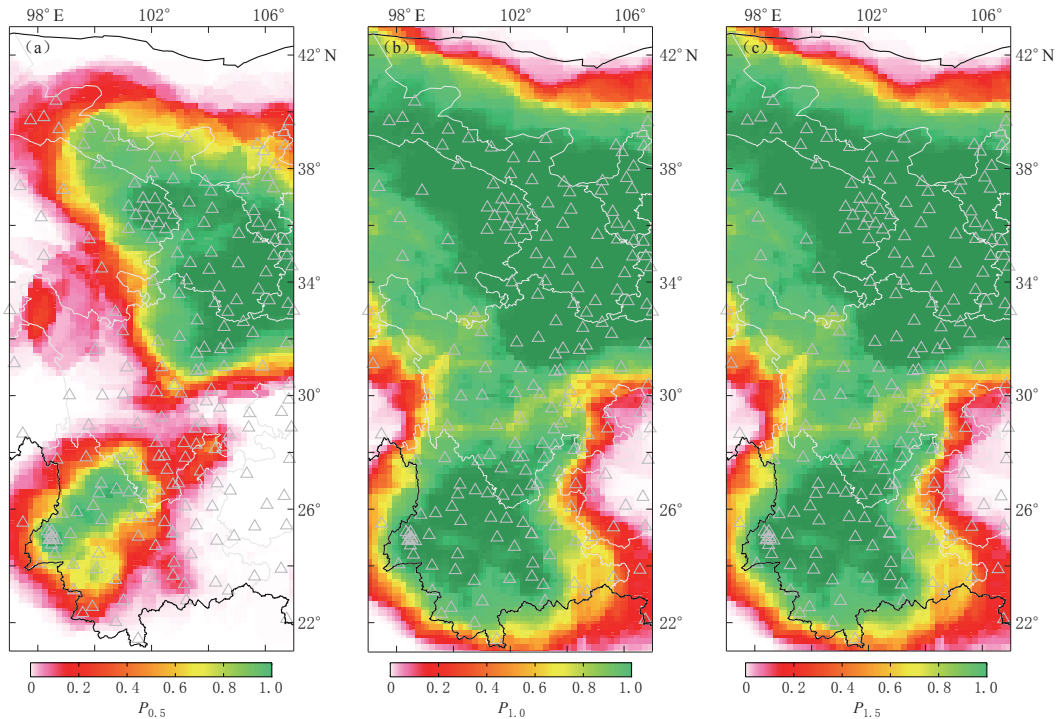


图 3 利用 PMC 方法给出的南北地震带地区不同震级档对应的检测概率 P_E 的空间分布
(a) $M=M_L 0.5$ 地震的 P_E 空间分布 (记为 $P_{0.5}$); (b) $M=M_L 1.0$ 地震的 P_E 空间分布 (记为 $P_{1.0}$);
(c) $M=M_L 1.5$ 地震的 P_E 空间分布 (记为 $P_{1.5}$)

Fig. 3 Distribution of the detection probability P_E in the North-South Seismic Belt region under different detected magnitude level by PMC method
(a) $P_{0.5}$ with detected magnitude level $M_L 0.5$; (b) $P_{1.0}$ with detected magnitude level $M_L 1.0$; (c) $P_{1.5}$ with detected magnitude level $M_L 1.5$

4 不同方法监测能力评估结果比较

为进一步研究 PMC 方法、EMR 方法以及震级-最大距离方法评估结果的差异性, 本文利用皮尔逊(Pearson)相关系数(Adler, Parmryd, 2010)对上述 3 种方法获得的南北地震带地区最小完整性震级评估结果(图 1)进行相似度分析. 皮尔逊相关系数是度量两个变量间相关程度的一种方法, 相关系数的绝对值越大(接近于 1 或 -1), 相似度越高. 二维空间

$\{m, n\}$ 上两个变量 A_{mn} 与 B_{mn} 的皮尔逊相关系数为

$$R = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left[\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2\right]\left[\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2\right]}}$$

(9)

式中的变量 A_{mn} 和 B_{mn} 可分别为 M_p , M_{cEMR} 和 M_r , \bar{A} 和 \bar{B} 分别为相应变量的均值. 利用上

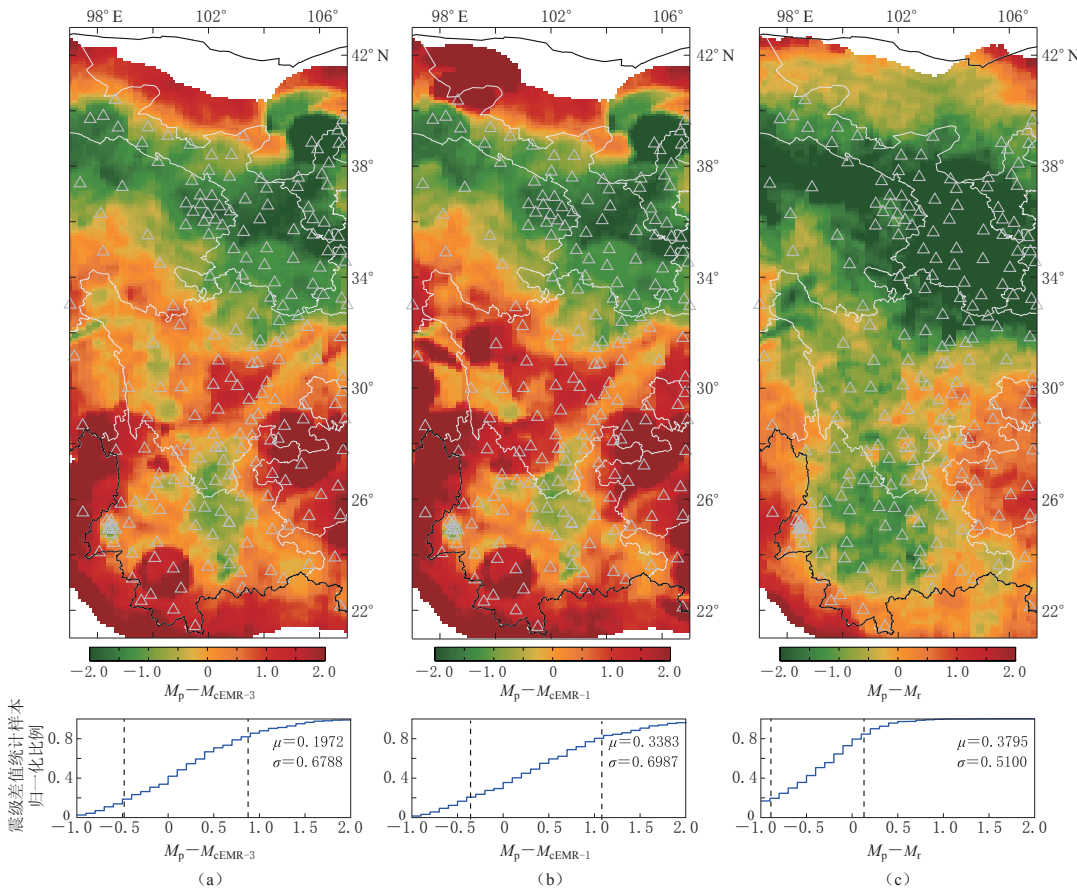


图 4 不同方法对南北地震带地区最小完整性震级计算结果的比较(上)及相应累积分布(下)

图中两条黑色虚线分别标出了累积正态分布拟合参数 $\mu-\sigma$ 和 $\mu+\sigma$ 的位置. (a) 最小完整性震级 M_p 与利用至少 3 个地震台站记录观测资料获得的 $M_{\text{cEMR-3}}$ 的差值 $M_p-M_{\text{cEMR-3}}$ 的空间分布及其累积分布;
(b) 最小完整性震级 M_p 与包括单台记录的全部观测资料获得的 $M_{\text{cEMR-1}}$ 的差值 $M_p-M_{\text{cEMR-1}}$ 的空间分布及其累积分布; (c) 最小完整性震级 M_p 与利用至少 3 个地震台站记录观测资料获得的 M_r 的差值 M_p-M_r 的空间分布及其累积分布

Fig. 4 Comparison of the minimum magnitude of completeness results calculated by different method in the North-South Seismic Belt (upper panels) and corresponding cumulative distribution (lower panels) The two vertical dashed lines indicate the position of fitting parameters $\mu-\sigma$ and $\mu+\sigma$ of the cumulative normal distribution, respectively. (a) Spatial distribution and the cumulative distribution of $M_p-M_{\text{cEMR-3}}$, and the $M_{\text{cEMR-3}}$ is calculated by using the selected data recorded by at least three seismic stations; (b) Spatial distribution and the cumulative distribution of $M_p-M_{\text{cEMR-1}}$, and the $M_{\text{cEMR-1}}$ calculated by all the recorded data including the single station recorded; (c) Spatial distribution and the cumulative distribution of M_p-M_r , and the M_r calculated by the selected data of at least three seismic stations recorded

式对 M_p , M_{cEMR} 和 M_r 两两计算其皮尔逊相关系数, 可得 $R(M_p - M_{\text{cEMR}}) = 0.4524$, $R(M_r - M_{\text{cEMR}}) = 0.5012$, $R(M_p - M_r) = 0.5669$, 表明这 3 种方法计算结果的相似度较低.

为比较 3 种方法计算结果在空间上的差异性, 本文以 M_p 为参照, 分别与 M_{cEMR} 和 M_r 进行了比较. 为进一步探讨地震的台站记录数量对最小完整性震级计算结果的影响, 对于 EMR 方法, 这里分别计算了利用至少 3 个地震台站记录观测资料获得的 $M_{\text{cEMR-3}}$ (下标中的数字用于区别不同地震台站记录数量), 以及利用包括单台记录的全部观测资料获得的 $M_{\text{cEMR-1}}$ 的结果, 并分别与 M_p 进行比较. 图 4a 给出了 $M_p - M_{\text{cEMR-3}}$ 的空间分布结果, 可见南北地震带 32°N 以北的大部分地区, 多数空间网格点的 M_p 明显小于 $M_{\text{cEMR-3}}$, 而 32°N 以南除川滇交界及云南东部以外地区, 多数网格点的 $M_p > M_{\text{cEMR-3}}$. 图 4a 所示的空间网格点的 $M_p - M_{\text{cEMR-3}}$ 累积分布统计显示, 35.81% 的网格点上 $M_p < M_{\text{cEMR-3}}$, 约 58.07% 的网格点上 $M_p > M_{\text{cEMR-3}}$. 由图 4b 给出的 M_p 与 $M_{\text{cEMR-1}}$ 的比较结果看, 与图 4a 的结果在定性上趋势一致, 使用不同地震台站记录数量并不影响这种比较的结果. 图 4c 给出的 $M_p - M_r$ 的空间分布结果显示, 南北地震带地区除贵州和内蒙古部分地区外, M_p 均总体上小于 M_r , 其中南北地震带北段地区的 $M_p - M_r$ 接近 $M_L 2.0$; 由空间网格点的 $M_p - M_r$ 累积分布 (图 4c) 可见, 73.18% 的网格点上 $M_p < M_r$, 约 20.64% 的网格点上 $M_p > M_r$.

5 不同方法监测能力评估结果差异的原因分析

通过上述对 3 种评估地震监测能力方法的比较可见, 南北地震带地区不同方法获得的最小完整性震级 M_c 的结果差异显著. 本文将从台站地震检测能力的影响和定位所用台站个数的影响两方面予以讨论.

5.1 台站地震检测能力的影响

由图 1、图 3 和图 4 可知, PMC 方法计算获得的 M_p 在空间分布上与 EMR 方法、震级-最大距离方法的结果存在较为显著的差异, 尤其是在南北地震带北段地区, 而且这种差异与台站的分布并无对应关系. 参考王亚文等 (2017) 一文的分析方法, 本文试图从南北地震带地区各地震台站的地震检测能力的差异角度予以讨论.

按照王亚文等 (2017) 给出的台站“检测能力评分”(score of detection capability) 方法, 利用区域地震台网地方震震级 M_L 测定的振幅 A_μ 的等值线分布来设计地震检测能力评分表. 对于任一个台站, 基于 PMC 方法获得单台检测概率 $P_D(M, L)$ 后, 根据振幅 $A_\mu = 0.05 \mu\text{m}$ 所对应的等振幅曲线向下包围面积 $S_{A_\mu(0.05)}$, 以及 $\{M, L\}$ 空间上各网格点距离最近的、振幅最小的等振幅曲线 $A_\mu(k)$ 向下包围的面积 $S_{A_\mu(k)}$, 即可获得相应网格点所对应的评分权重值 $w_p(k)$ 为

$$w_p(k) = \frac{S_{A_\mu(k)}}{S_{A_\mu(0.05)}}, \quad (10)$$

然后将 $P_D(M, L)$ 与评分权重值 $w_p(k)$ 点乘、积分, 即可得到该台站的地震检测能力评分值 D_{score} 为

$$D_{\text{score}} = \sum_{i=0}^{M_{\max}} \sum_{j=0}^{L_{\max}} P_D(M_i, L_j) \cdot w_p(M_i, L_j). \quad (11)$$

D_{score} 是一个无量纲的评分值, 可直观地表述该台站的相对地震检测能力, 但其数值的绝对大小无实际意义.

图 5a 和图 5b 分别给出了南北地震带地区 54 个国家地震台和 235 个区域地震台检测能力评分 D_{score} 的统计分布及其空间分布, 可见国家台 D_{score} 的均值为 3076.8, 与区域台 D_{score} 的均值 2947.2 较为接近, 两类台站的统计分布特征也无明显区别. 值得注意的是, 由图 5b 所示的 D_{score} 空间分布结果可见: 南北地震带 32°N 以北地区和滇西地区的地震台站 D_{score} 值较高, 甘肃等地区个别台站的 D_{score} 值甚至高达 5000 以上, 表明该地区的台站运维水平以及对地震记录的分析完整程度均较高; 贵州和重庆地区的 D_{score} 值普遍较低, 个别台站甚至低于 1000. 上述地震台站的 D_{score} 均值评分结果, 与 PMC 方法给出的 M_p 的空间分布特征较为一致, 这说明南北地震带地区台站地震检测能力的差异, 可能是造成 PMC 方法与 EMR 方法和震级-最大距离方法结果差异较大的主要原因.

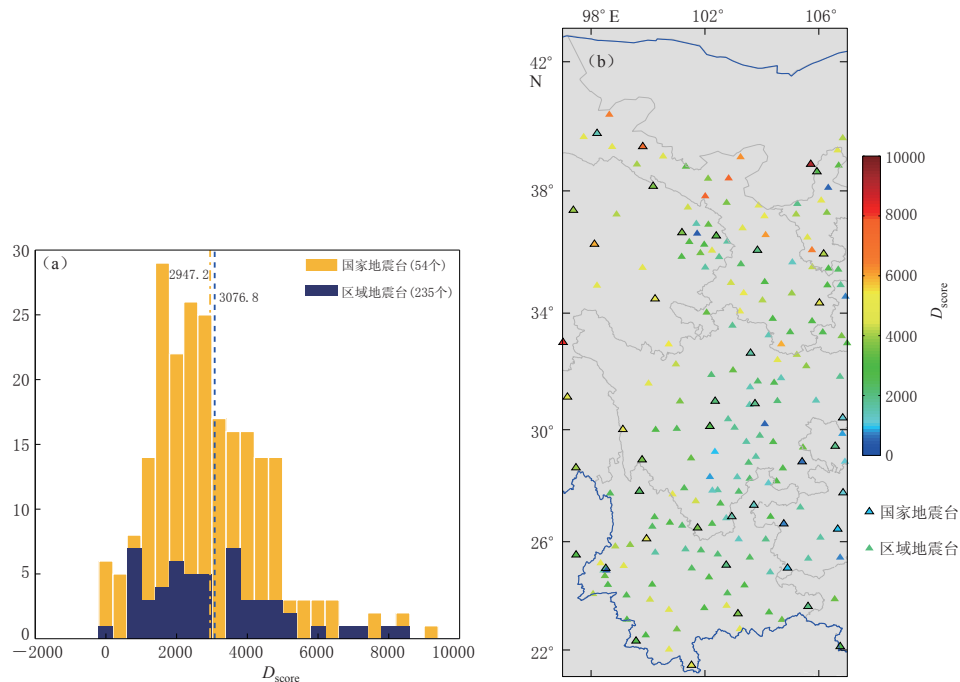


图 5 南北地震带地区 289 个地震台站的“检测能力评分” D_{score} 的统计分布(a)及其空间分布(b)

Fig. 5 Histogram of the detection capability score result (D_{score}) of 289 seismic stations in North-South Seismic Belt (a) and its spatial distribution (b)

5.2 定位所用台站数目的影响

为便于比较 3 种地震监测能力评估方法的结果, 本研究规定统一使用至少 3 个地震台站记录的地震事件用于计算, 在一定程度上保证了所用地震资料的可靠性, 更符合“地震监测能力”的定义. 然而, 在 EMR 方法的一般应用中, 以往并未考虑所用地震资料的条件约束, 即一些单台记录的、定位精度较差的地震也被用于计算 M_{cEMR} .

为考察 EMR 方法是否会受到所用地震资料质量的影响, 本文除考虑至少 3 个台站记录地震的条件用于计算 $M_{\text{cEMR-3}}$ (结果如图 1b 所示) 外, 还分别计算了至少 1 个台站以及至少 4 个台站 (用 $M_{\text{cEMR-4}}$ 表示) 的情况, 计算中选取与图 1 相同的 $\delta M_{\text{cEMR}} \leq 0.3$ 作为筛选最终结果的条件. 南北地震带地区在 2008 年 10 月 1 日—2015 年 9 月 17 日期间, 至少被 1 个台站记录到的地震事件共计 36 万 5347 个, 至少被 4 个台站记录到的地震事件共计 22 万

3 297 个, 相应的计算结果 $M_{\text{cEMR-1}}$ 和 $M_{\text{cEMR-4}}$ 分别如图 6a 和图 6b 所示. 由图 6a 可见, 考虑前人一般使用的包括单台记录地震的地震目录, $M_{\text{cEMR-1}}$ 在川滇交界西部、川藏交界地区、内蒙古西部地区相比图 6b 和图 1b 均存在明显的低值区域, 表明单台记录的定位精度较低资料的引入, 可能会导致部分区域地震监测能力的高估. 相应地, 图 4b 中 M_p 与考虑单台记录地震获得的 $M_{\text{cEMR-1}}$ 的结果差值 $M_p - M_{\text{cEMR-1}}$ 与图 4a 的比较, 也可清楚地反映出记录地震的台站数的影响. 此外, 相比于图 1b 给出的 $M_{\text{cEMR-3}}$ 结果, 图 6b 给出的至少 4 个台站记录地震的资料计算获得的 $M_{\text{cEMR-4}}$ 结果变化并不大.

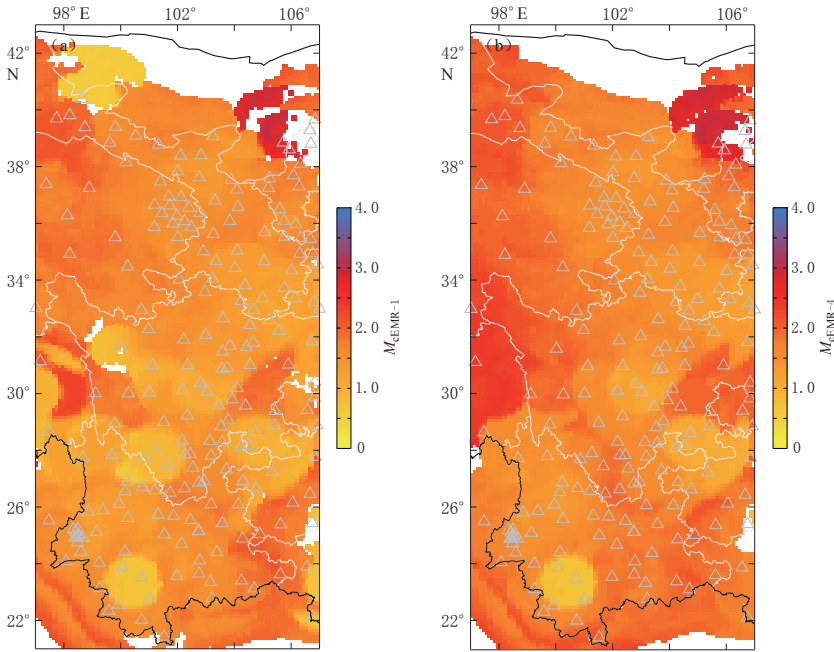


图 6 不同观测记录条件下的 EMR 方法评估最小完整性震级 M_{cEMR} 的空间分布
(a) 由至少 1 个台站记录的地震目录计算得到的 $M_{\text{cEMR-1}}$; (b) 由至少 4 个台站记录的地震目录计算得到的 $M_{\text{cEMR-4}}$

Fig. 6 Distribution of M_{cEMR} under the different observation data selection conditions
(a) $M_{\text{cEMR-1}}$ calculated by the events with at least one station recorded;
(b) $M_{\text{cEMR-4}}$ calculated by the events with at least four stations recorded

6 讨论与结论

针对目前地震台网监测能力评估中不同技术方法获得结果的可能差异问题, 本研究考虑了目前国际上比较前沿的 PMC 方法和 EMR 方法, 以及中国地震台网中常规使用的震级-最大距离方法进行了比较研究, 并对造成结果差异的可能原因进行了分析. 研究中, 以 CSEP 计划中国检验中心测试区域南北地震带为研究区, 使用了中国地震台网中心提供的 2008 年 10 月 1 日—2015 年 9 月 17 日时段的地震观测报告和地震目录等资料; 此外, 还针对以往不同方法比较研究中的地震观测资料选取条件不一致等问题, 进行了统一设置. 主要结论如下:

1) 在采用统一的观测数据甄选条件下, 3 种不同评估方法的结果差异明显, 其中:

PMC 方法计算得到的最小完整性震级 M_p 在南北地震带北部地区 (32°N 以北) 可达 $M_L 1.0$ 左右, 显著低于 EMR 方法获得的 M_{cEMR} 和震级-最大距离方法获得的 M_r ; 在贵州、重庆等地, M_p 明显高于 M_{cEMR} 和 M_r ; 南北地震带地区 M_r 的空间分布明显取决于地震台站密度, 可能与实际台站运行情况差异较大. 统计结果显示, 南北地震带地区不同方法得到的最小完整性震级均值为 $M_{\text{cEMR}} < M_p < M_r$.

2) 对 3 种不同方法评估监测能力的结果差异分析表明, 各个地震台站检测地震能力的差异, 是造成 M_p 结果显著不同于 M_{cEMR} 和 M_r 结果的原因, 而这种台站运维水平和对记录地震的分析完整程度, 需要在地震监测能力评分中予以考虑.

3) 地震监测能力评估所使用的观测资料的质量可能会对评估结果产生显著影响. 在不同的台站记录数量的条件下, EMR 方法计算结果可能存在较大变化, 尤其是在使用以往常用的包括单台地震记录的地震目录的情况下, 可能会低估 M_{cEMR} 的结果.

在以往的地震监测能力评估中, 对所使用的观测资料质量的统一性关注不够. 本文尝试选用至少 3 个台站记录地震的情况下针对不同方法进行比较研究, 这一尝试对开展类似的比较研究可能具有借鉴意义. 事实上, 不同评估方法对观测资料质量约束的不一致性, 也反映了对“地震监测能力”的定义是否应同时体现地震定位精度和记录地震的完整程度, 值得进一步讨论.

本文在考虑了所用观测资料质量的统一性前提下, 不同监测能力评估方法的结果仍差异显著, 个别地区的最小完整性震级差值甚至可达 $M_L 2.0$. 由于最小完整性震级 M_c 的微小变化, 例如 $\Delta M_c = 0.1$ 时, 引起遴选完整记录的地震次数变化就可达 25% (在古登堡-里克特关系中 $b=1$ 的情况), 这会对在类似 CSEP 计划检测区域开展地震预测模型对比等研究造成巨大影响. 由此, 选用更为科学合理并且接近地震台网监测能力真实情况的评估方法, 具有较大的现实意义. 一些方法本身存在的问题和方法适用性也应值得注意, 例如 EMR 方法在传统应用中不考虑所使用的地震资料质量, 对地震次数较多、监测能力的时空非均匀性较弱等情况, 更有利于获得稳定的结果; 目前中国地震台网常用的震级-最大距离方法虽未考虑地震台站监测地震能力的实际差异, 但可在地震台网建设前将其作为监测能力设计目标参考.

从本文的对比分析结果可见, 地震台站的运维水平、记录地震的分析完整程度对 M_c 的结果影响显著. 由于 PMC 方法考虑了上述情况, 包括利用地震台网实际产出资料进行评估, 以及不假设地震的分布关系、具备对弱震和少震地区进行评估的能力等, 因此在地震台网监测能力评估研究中, 如可获得研究时段内地震台站建设运行完整信息, PMC 方法更值得推荐.

本研究使用了德国海姆霍兹地球科学中心 Danijel Schorlemmer 教授提供的 PMC 方法计算程序, 张立文高级工程师和杨辉副研究员提供了部分数据, 本项工作得到 CESP 中国检验中心筹备组专家的指导, 研究所用观测报告、目录由中国地震台网中心提供, 作者在此一并表示感谢.

参 考 文 献

邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 闵伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: D 辑, 32(12): 1020-

1030, 1057.

- Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, Yang X P, Min W, Chu Q Z. 2002. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. *Science in China: Series D*, **32**(12): 1020–1030, 1057 (in Chinese).
- 韩立波, 蒋长胜, 李艳娥, 郭祥云. 2012. 用于地震可预测性 CSEP 计划的南北地震带地区地震最小完整性震级 M_c 研究[J]. *地震*, **32**(1): 17–27.
- Han L B, Jiang C S, Li Y E, Guo X Y. 2012. Minimum magnitude of completeness in the North-South Seismic Belt for collaborative study of earthquake predictability[J]. *Earthquake*, **32**(1): 17–27 (in Chinese).
- 黄亦磊, 周仕勇, 庄建仓. 2016. 基于地震目录估计完备震级方法的数值实验[J]. *地球物理学报*, **59**(4): 1350–1358.
- Huang Y L, Zhou S Y, Zhuang J C. 2016. Numerical tests on catalog-based methods to estimate magnitude of completeness[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **59**(4): 1350–1358 (in Chinese).
- 王亚文, 蒋长胜, 刘芳, 毕金孟. 2017. 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*, **60**(7). doi:10.6038/cjg20170701.
- Wang Y W, Jiang C S, Liu F, Bi J M. 2017. Assessment of earthquake monitoring capability and score of seismic station detection capability in China Seismic Network (2008–2015)[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **60**(7). doi:10.6038/cjg20170701 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽. 2000. 时间-震级可预报模式在南北地震带分段危险性评估中的应用[J]. *地震*, **20**(1): 71–79.
- Yi G X, Wen X Z. 2000. Application of the time- and magnitude predictable model to seismic hazard assessment in segmentation of the North-South Seismic Belt[J]. *Earthquake*, **20**(1): 71–79 (in Chinese).
- 中国地震局监测预报司. 2007. 地震学与地震观测[M]. 北京: 地震出版社: 230–231.
- Department of Monitoring and Prediction, China Earthquake Administration. 2007. *Seismology and Earthquake Observation*[M]. Beijing: Seismological Press: 230–231 (in Chinese).
- Adler J, Parmryd I. 2010. Quantifying colocalization by correlation: The Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient[J]. *Cytometry A*, **77**(8): 733–742.
- Aki K. 1965. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits[J]. *Bull Earthq Res Inst*, **43**(2): 237–239.
- Amorèse D. 2007. Applying a change-point detection method on frequency-magnitude distributions[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **97**(5): 1742–1749.
- Cao A M, Gao S S. 2002. Temporal variation of seismic b -values beneath northeastern Japan island arc[J]. *Geophys Res Lett*, **29**(9): 48-1–48-3.
- Chernick M R. 1999. *Bootstrap Methods: A Practitioner's Guide*[M]. New York: Wiley-Interscience Publication: 264.
- Efron B. 1979. Bootstrap methods: Another look at the Jackknife[J]. *Ann Stat*, **7**(1): 1–26.
- 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 Int*, **186**(1/2): 81–96.
- Gomberg J. 1991. Seismicity and detection/location threshold in the southern great basin seismic network[J]. *J Geophys Res*, **96**(B10): 16401–16414.
- Gutenberg R, Richter C F. 1944. Frequency of earthquakes in California[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **34**(4): 185–188.
- Jordan T H. 2006. Earthquake predictability, brick by brick[J]. *Seismol Res Lett*, **77**(1): 3–6.
- Kværna T, Ringdal F. 1999. Seismic threshold monitoring for continuous assessment of global detection capability[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **89**(4): 946–959.
- Li S L, Mooney W D, Fan J C. 2006. Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data[J]. *Tectonophysics*, **420**(1/2): 239–252.
- Mignan A, Jiang C, Zecher J D, Wiemer S, Wu Z, Huang Z. 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, Ishibe T, Tsuruoka H, Schorlemmer D, Ishigaki Y, Hirata N. 2010a. Analysis of the completeness magnitude and seismic network coverage of Japan[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **100**(6): 3261–3268.

- Nanjo K Z, Schorlemmer D, Woessner J, Wiemer S, Giardini D. 2010b. Earthquake detection capability of the Swiss Seismic Network[J]. *Geophys J Int*, **181**(3): 1713–1724.
- Ringdal F. 1975. On the estimation of seismic detection thresholds[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **65**(6): 1631–1642.
- Schorlemmer D, Neri G, Wiemer S, Mostaccio A. 2003. Stability and significance tests for *b*-value anomalies: Example from the Tyrrhenian Sea[J]. *Geophys Res Letts*, **30**(16): 1835. doi:10.1029/2003GL017335.
- 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.
- 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.
- Woessner J, Wiemer S. 2005. Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **95**(2): 684–698.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, Ma J, Gan W J, Min W, Mao F Y, Wang Q. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China[J]. *Science in China: Series D*, **46**(S2): 13–24.
- Zhang S F, Wu Z L, Jiang C S. 2016. The central China North-South Seismic Belt: Seismicity, ergodicity, and five-year PI forecast in testing[J]. *Pure Appl Geophys*, **173**(1): 245–254.