

谢卓娟、吕悦军、彭艳菊等, 2012, 东北地震区小震资料完整性分析及其对地震活动性参数的影响研究, 中国地震, 28 (3), 256 ~ 265。

东北地震区小震资料完整性分析 及其对地震活动性参数的影响研究

谢卓娟 吕悦军 彭艳菊 张力方

中国地震局地壳应力研究所, 北京市海淀区安宁庄路 1 号 100085

摘要 以东北地震区为例, 基于 G-R 关系的震级-频度分布原理, 研究了东北地震区最小完整性震级 M_c 的时间分布特征和各时段的空间分布特征, 统计了研究区内的地震活动性参数, 探讨了小震资料完整性分析对地震活动性参数和地震危险性计算结果的影响。研究表明, 对区域小震资料进行完整性分析, 可以在低水平地震活动地区获得较准确的地震活动性参数, 更好地反映了该区未来的地震活动趋势。本文的研究方法和结论可供地震资料完整性分析和地震活动性分析时参考。

关键词: 小震资料 最小完整性震级 M_c 地震活动性参数 东北地震区

[文章编号] 1001-4683 (2012) 03-0256-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

20 世纪 70 年代起, 我国开始建设具有小震监测功能的台网, 随着台网的逐步完善和监测技术的提高, 累积了大量的现代小震资料, 为小震资料在与地震相关领域中的应用奠定了基础。在地震区划和地震安全性评价研究中, 统计区内地震活动性参数的确定是一项重要的工作, 对于一些历史地震资料短缺或地震活动水平低的地震区、带, 在计算地震活动性参数时, 常常将现代小震资料和历史地震资料联合使用, 以弥补地震资料样本量的不足 (黄玮琼等, 1989; 鄢家全等, 1996; 国家地震局, 1996; 潘华等, 2006), 因此, 小震资料作为地震活动性分析中的基础和关键资料 (Cornell, 1968), 其完整性分析非常重要。

对于小震资料的完整性分析, 研究者 (刘东旺等, 2004; 吴兆营等, 2005; 杨春柳等, 2010) 或直接采用焦远碧等 (1990) 根据我国地震台网监测能力确定的全国最小完整性震级分布图, 或仅根据研究区地震地质构造和地震分布特点进行分区, 确定各区的 M_c 值 (苏有锦等, 2003; 冯建刚等, 2010; 屠泓为等, 2010)。但前者忽略了最小完整性震级 M_c 随时间和区域的变化, 后者忽略了地震台网的非均衡建设, 导致地震活动性参数统计的不确定性, 从

[收稿日期] 2011-07-12

[项目类别] 中国地震局地壳应力研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项“地震区带的现代中小地震活动的空间分布特征” (ZDJ2010-20) 资助

[作者简介] 谢卓娟, 女, 1984 年生, 助理研究员, 主要从事地震活动性、地震危险性分析等方面的工作和研究。

E-mail: xiezhuojuan@sohu.com

而导致地震危险性分析结果的不确定性。本文以东北地震区为研究范围, 基于 G-R 关系的震级-频度分布原理, 综合考虑东北地震区内地震台网布设、改造和升级等因素, 确定了区域内 M_c 的时间分布特征, 并采用格网扫描方法, 定量地分析区域内各时段 M_c 值的空间分布特征。同时, 本文采用完整性分析后的地震资料, 统计了东北地震区的 b 值和 V_4 值, 为概率危险性分析提供计算参数, 探讨了小震资料完整性分析对地震活动性参数和地震危险性计算结果的影响。本文的研究方法和结论以期对地震资料完整性分析和地震活动性分析提供参考, 并对地震区划、工程场地地震安全性评价、地震活动性中长期预测产生积极意义。

1 台网分布与资料状况

东北地震区包括中国东北 3 省、河北北部和内蒙古西北部部分地区, 其区域范围为 $39.90^{\circ} \sim 54.60^{\circ}N, 107.17^{\circ} \sim 136.85^{\circ}E$, 如图 1。

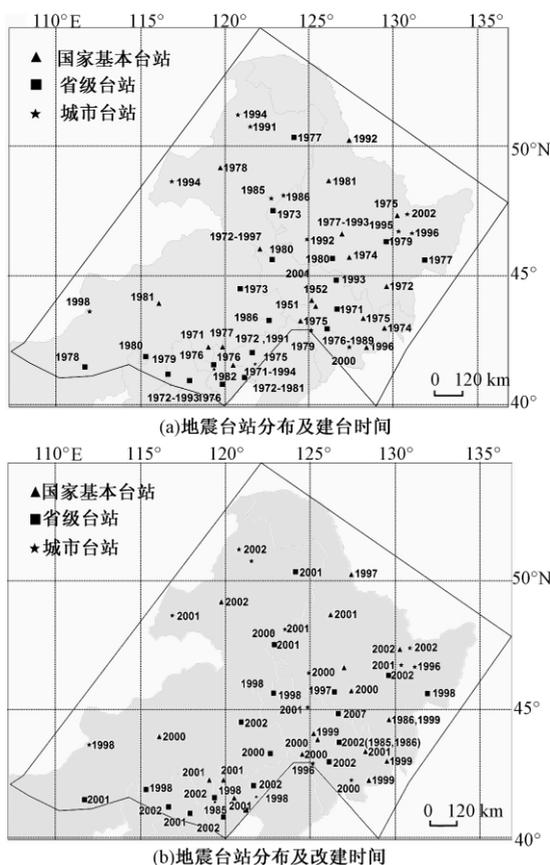


图 1 东北地震区地震台站的分布图

1.1 台网分布及建设概况

20 世纪初, 东北地震区先后建立了大连 (1904 年)、长春 (1908 年) 等地震台站。70 年代起, 辽宁、吉林、黑龙江和内蒙古等省区的地震台网相继建立并逐步完善, 但是地震台站分布也不均匀, 台网监测能力不平衡。通过查阅辽宁、吉林、黑龙江、内蒙古和河北等省区的地

震监测志和相关资料(辽宁省地震局,2004;黑龙江省地震局,2004;吉林地震局,2005;内蒙古自治区地震局,2005;河北省地震局,2005),收集了研究区内国家基本台、省级台和市级台的台站位置,以及台站建台、升级改造(采用数字化观测系统)等资料,绘制了东北地震区地震台站的分布图(图1)。图1(a)中标注了台站的建台时间,图1(b)中标注了台站的升级、改造的时间。

1.2 资料来源和预处理

东北地震区内地震活动水平较低,地震史料缺乏(吴戈等,1992)。自1920年以来, $M_s \geq 5$ 以上强震基本完整(黄玮琼等,1994),至2011年1月共记录到 $M_s \geq 5$ 浅源地震30次,其中, $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震4次, $M_s 5.0 \sim 5.9$ 地震26次(国家地震局震害防御司,1995;中国地震局震害防御司,1999)。

小震资料来自中国地震台网中心的地震数据库。研究范围内共收集1970年以来 $1.0 \leq M_L \leq 5.0$ 地震11982次(简称目录I)。删除余震是地震活动性研究和地震分析的基础,因此,我们根据余震的空间窗半径 R 的公式(陈凌等,1998)和Console等(1979)给出的时间窗表,确定余震的空间和时间范围,对目录I进行余震删除处理,最终给出了9874次地震(简称目录II)。具体见表1和图2。

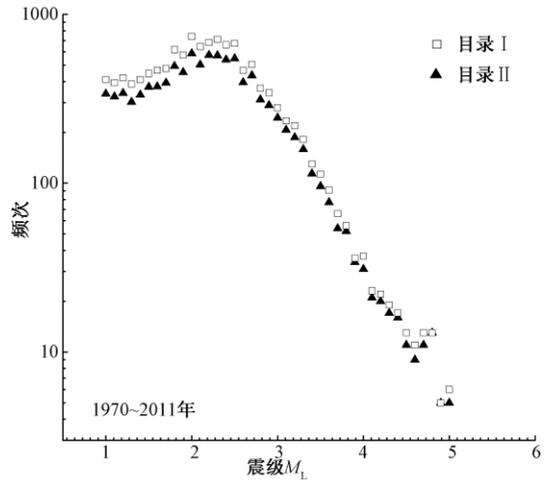


图2 研究区 $1.0 \leq M_L \leq 5.0$ 地震震级-频度关系图

表1 目录I、II地震震级分布表

目录	震级				总计
	<2.0	2.0~2.9	3.0~3.9	4.0~4.9	
I	4607次	5789次	1407次	179次	11982
II	3732次	4759次	1224次	159次	9874

2 小震资料完整性分析

2.1 分析方法

基于古登堡-里克特(G-R)关系的震级-频度分布原理(Richter, 1958; Gutenberg et al, 1956; Wiemer et al, 2000),进行小震资料完整性分析

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

式中, M 是地震震级, N 是研究区内震级大于等于 M 的地震次数, a 和 b 为统计常数。地震目录完整性分析步骤为:

(1)首先对目录II按0.1震级档间隔作震级-频度分布图。

(2) 按照公式(1)取不同的震级下限 M_i ($i = 1.0 \sim 3.0$), 用最小二乘法逐一进行拟合, 得到不同的拟合相关系数 R

$$R = \frac{m \sum M_i \lg N_i - \sum M_i \sum \lg N_i}{\sqrt{[m \sum M_i^2 - (\sum M_i)^2] [m \sum \lg N_i^2 - (\sum \lg N_i)^2]}} \quad (2)$$

最小二乘法中地震次数的统计分为微分频度和累计频度 2 种。因东北地震区地震数目较少, 故本文采用累计频度。

(3) 当 $M_i < M_c$ 时, 拟合相关系数 R 值很低, 拟合线性关系差; 随着 M_i 的增大, R 亦随之增大, 当 $M_i = M_c$ 时, R 达到最大值, 此时 M_i 即为 M_c ; 但当 $M_i > M_c$ 时, R 值会下降, 这是由于随着 M_c 取值的增大, 震级-频度关系分布线性好的较小震级段的资料逐步被舍弃, 使得拟合结果的可靠性降低。

拟合过程见图 3。图 3(d) 为区域内起算震级 M_i ($i = 1.0 \sim 3.0$) 按照最小二乘法逐一拟合得到 R 值随震级 M_i 值的分布图。当 $M_i = 2.5$ 时, R 值最大, 此时, 用 1970~2011 年地震数据统计得到的 M_c 值为 2.5。

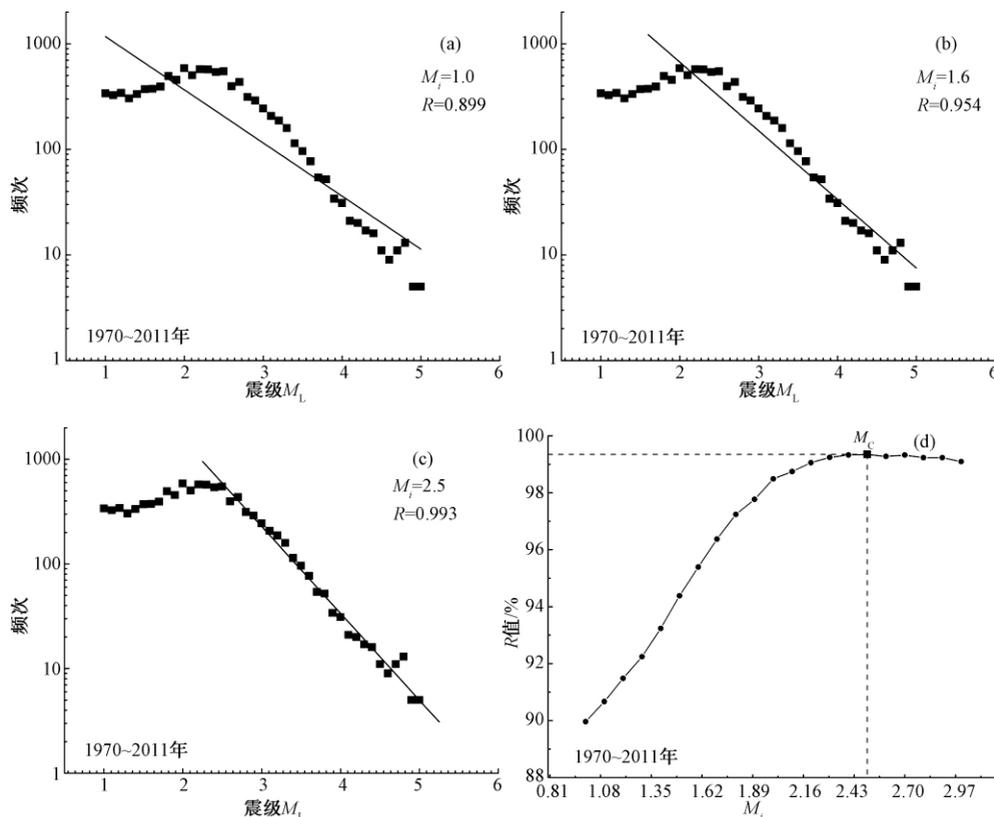


图 3 1970~2011 年东北地震区震级-频度分布以及拟合的 G-R 关系和 R 值随震级 M_i 值的分布图

(a) 起算震级 $M_i = 1.0$ 时震级-频度分布以及拟合的 G-R 关系图; (b) $M_i = 1.6$ 时震级-频度分布以及拟合的 G-R 关系图; (c) $M_i = 2.5$ 时震级-频度分布以及拟合的 G-R 关系图; (d) R 值随震级 M_i 值的分布图

2.2 研究区 M_c 的时间分布特征

按照上述步骤,对东北地震区 1970 年以来中小地震资料的最小完整性震级进行时间扫描,设定窗长为 400 个地震,步长为 50 个地震进行滑动扫描计算,得到研究区 M_c 随时间变化曲线图,如图 4 所示。

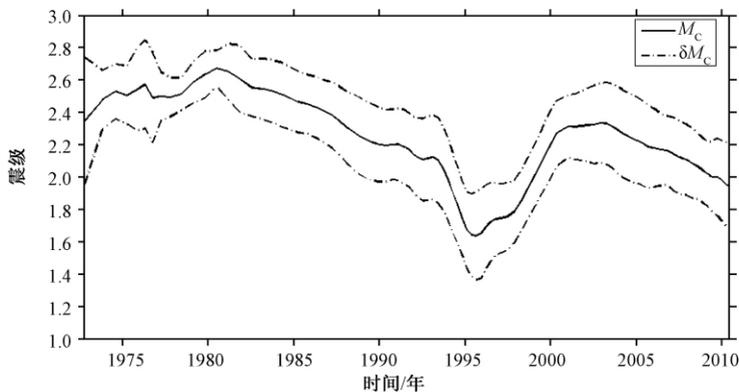


图 4 M_c 随时间变化的 M_c-T 图

由图 4 可看出,地震台网随时间不断增加以及地震分析方法的改进、监测能力的不断提高,区域最小完整性震级 M_c 总体呈现减小的趋势。1981 年达到最高值 2.7 左右,上下波动约 ± 0.1 ;结合全国和东北地震区的台网建设、升级情况(图 1),从 20 世纪 70~90 年代,台站均处于模拟记录观测阶段,东北地震区从 1996~2000 年进行地震台网的升级改造,除了极个别台站外,其余台站均进行了数字化改造,完全采用数字记录,在模拟记录向数字记录过度阶段(1996~2000 年), M_c 的变化出现了明显的异常;而 2000~2011 年期间 M_c 又在逐年降低,介于 1.8~2.1 之间。 M_c 的波动是由于不同年份的地震活动特性不同造成的。

鉴于上述情形,将东北地震区划分为 1970~1999 年和 2000~2011 年两个研究时段。

2.3 研究区 M_c 的空间分布特征

M_c 随时间在不断降低,但是,由于不同地区的台网监测能力存在很大的差异,台站的分布不均匀,区域最小完整性震级 M_c 在空间上仍然存在差异。部分学者根据研究区地震地质构造和地震分布特点,分区确定各区的 M_c 值。这种分区的依据具有不可靠性,未能充分的考虑区域地震台网布设、改造和升级等因素。本文在确定区域 M_c 值的时间分布特征前提下,提出了采用空间格网扫描方法分时段定量地分析 1970~1999 年和 2000~2011 年两时段 M_c 值的空间分布特征。

在一个给定的区域内,以一定的空间间隔(Δ)进行网格化(本文中 Δ 取值为 0.5°),挑选出以每个网格中心为圆心、半径为 r 的圆形统计单元内的地震资料(r 值取 500~800km,以保证有足够的样本),对每一个单元分别计算出 M_c 值。最后,对研究区域扫描计算所有网格点的 M_c 值,再用插值法对离散点进行插值,绘制等值线,形成各时段内 M_c 值的等值线分布图(图 5、6)。

由图 5 可看出,1970~1999 年时段内的 M_c 值除承德、锦西以南部分为 1.9 以外,其余部分均在 2.0 级以上,这可能和承德、锦西地区测震台站建台时间早、台站布设密集等因素有

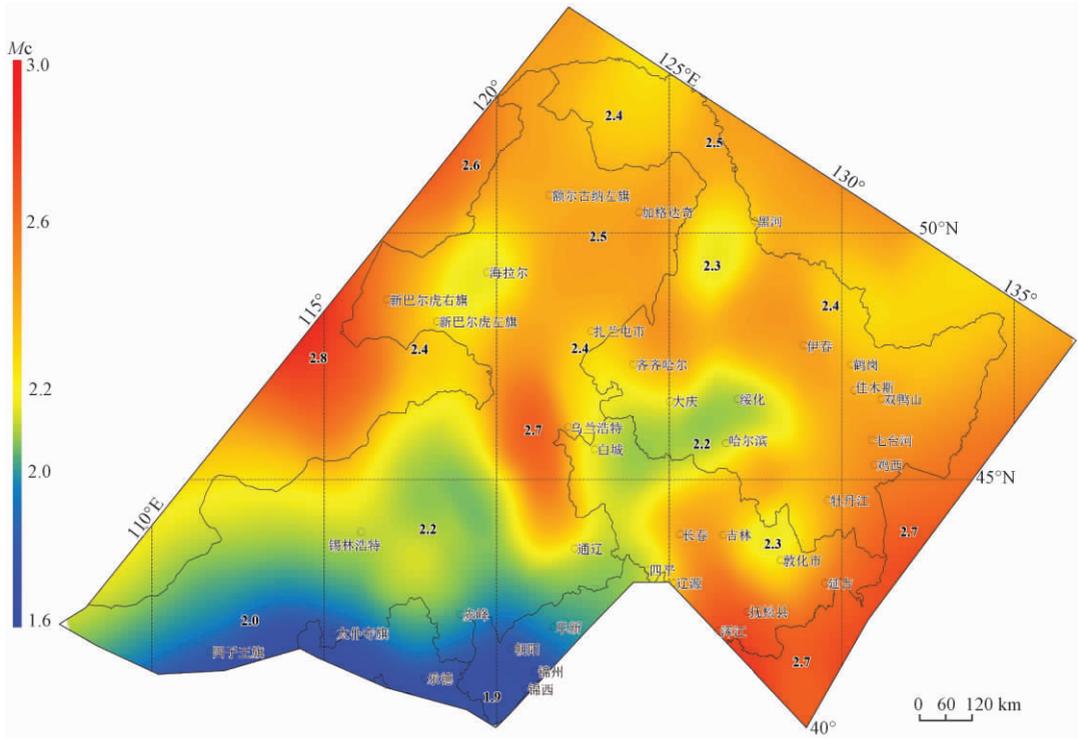


图 5 区域范围内 1970 ~ 1999 年 M_c 值空间分布图

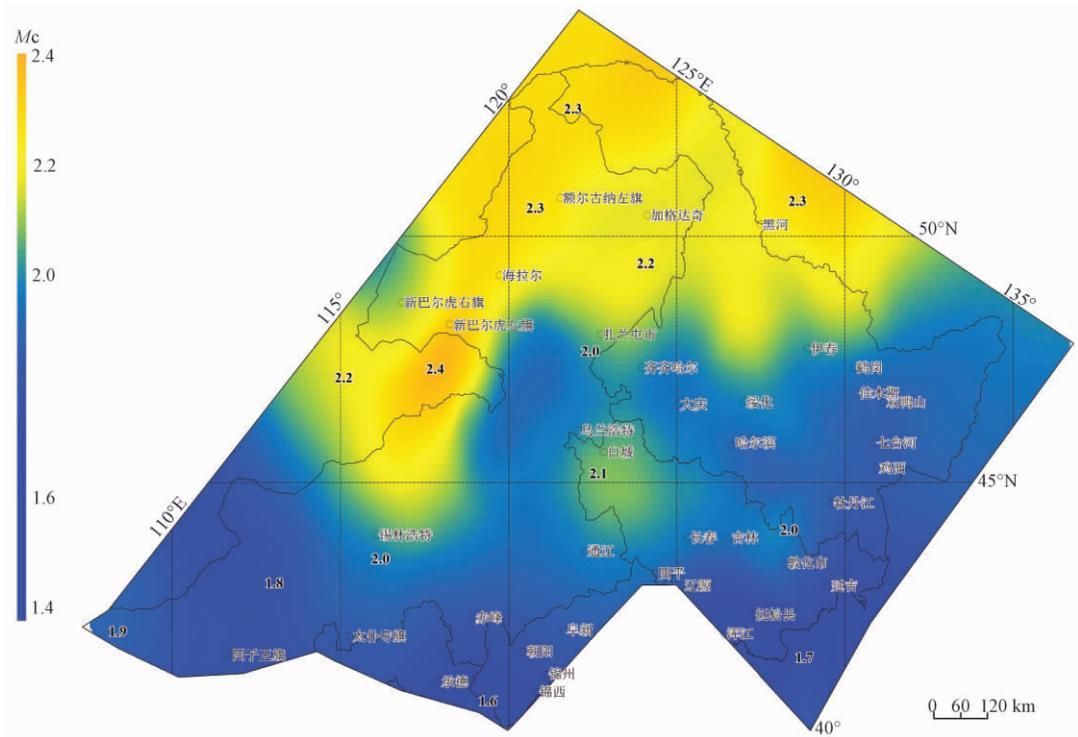


图 6 区域范围内 2000 ~ 2011 年 M_c 值空间分布图

关(图 1);在新巴尔虎右旗、抚松县以南等地区的 M_c 值大于 2.7, 这些地区测震台建设晚, 如新巴尔虎右旗 1994 年才初建了新巴尔虎右旗地震台, 抚松县 1996 年才建了长白山天池火山站, 2000 年才建了抚松地震台。且这些台站方圆 120km、甚至 220km 以内(如新巴尔虎右旗地震台)都再无其它台站, 台站布设稀疏。在图 6 中可看出, 2000~2011 年时段内 M_c 值大部分地区小于 2.1, 局部地区的 M_c 值有大幅度的降低, 如抚松县地区和大兴安岭东部地区。

东北地震区最小完整性震级 M_c 的空间分布与根据地震台站分布推算出的监测能力大致一致, 但是局部地区亦有差异。如图 5 中乌兰浩特台西边不远处 M_c 为 2.7, 而在锡林浩特台东边较远处 M_c 为 2.2, 这是因为乌兰浩特台西边地区小震级段地震数少, 而较高震级段的地震数较多, 导致 M_c 值局部偏高; 而锡林浩特台东边缺乏中强震, M_c 值局部偏低。

2.4 完整性分析处理后小震资料概况

根据区域内最小完整震级 M_c 的时间、空间分布特征, 我们建立了 1970 年 1 月~2011 年 1 月 $1.6 \leq M_L \leq 5.0$ 的 6687 次地震目录(简称目录 III), 表 2 列出了各时段对应各震级档的地震次数。

表 2 目录 III 地震震级分布表

时间	震级 M_L				
	< 2.0	2.0	3.0	4.0	5.0
1970~1999 年	230 次	2512 次	889 次	109 次	3563 次
2000~2011 年	995 次	1567 次	335 次	50 次	3124 次
总计(目录 III)	1225 次	4079 次	1224 次	159 次	6687 次

3 地震活动性参数的确定和比较

对地震危险性分析结果起主要作用的地震活动性参数主要包括 b 值和 V_4 值(潘华等, 2006)。本节综合了东北地震区的现代小震资料和历史地震资料计算 b 值和 V_4 值。在计算 b 值时采用的震级分档为 0.5, 并采取抛弃 N 值较小的点来克服“掉头”现象(黄玮琼等, 1989)。

把东北地震区 1920 年以后 $M_s \geq 5.0$ 的历史强震和 1970 年以后小震目录(I、II、III)作为统计样本, 首先用东北地震区震级转换关系式 $M_s = 0.9343M_L + 0.0244$ (谢卓娟, 2009), 将目录(I、II、III)中的 M_L 转换为 M_s , 确定各级地震震级档的次数和年平均发生率, 再利用最小二乘法进行数据拟合, 分别统计出使用不同小地震目录联合历史强震计算得到的 b 值。 V_4 为 4 级以上地震的年平均发生率, 它代表着一个区域内的地震活动水平。 V_4 是结合 b 值与历史地震的实际发生率, 根据公式 $V_4 = V_M \times 10^{b(M-4)}$ (V_M 表示 M 级地震的年平均发生率)共同反推, 取各震级外推值中的最大值。计算结果见表 3 (R 为相关系数; SD 为回归标准差, 反映了统计回归的精度; Δb 表示 b 值的误差), 拟合结果如图 7 所示。

结合表 3 和图 7 可看出:

(1) $R_I = R_{II} = 0.9970$, R 值虽然一样, 但 $SD_{II} < SD_I$, 使用目录 II 拟合结果较好, 线性相关性较好, 说明余震的删除是地震活动性参数分析的基础。

表 3 地震活动性参数统计结果表

目录	参数					历史地震反推		
	a	b	Δb	R	SD	V_4	V_5	V_6
I	2.9579	0.7202	± 0.0210	0.9970	0.1009	1.7117	1.7117	1.1854
II	2.8436	0.7004	± 0.0207	0.9970	0.0991	1.6354	1.6354	1.0821
III	2.9830	0.7305	± 0.0121	0.9992	0.0492	1.7527	1.7527	1.2430

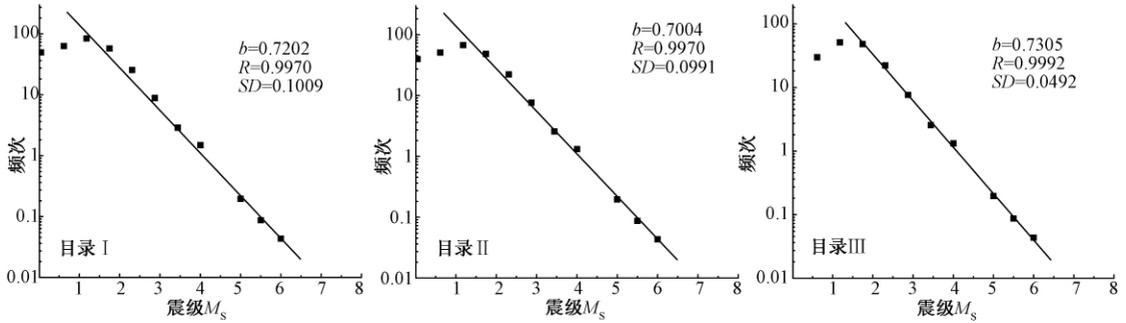


图 7 东北地震区不同小震目录震级-频度关系图

(2) $R_I = R_{II} < R_{III}$, $SD_{III} = 0.0492$ 明显小于 SD_I 和 SD_{II} ; 使用目录 III 拟合线性相关性最高, 说明分别使用 3 个小震目录来参与统计 b 值, 目录 III 统计拟合结果最佳, 得到的 b 值较合理, 能较好地体现该区的历史地震活动水平和反映该区未来的地震活动趋势。相比之下, 使用目录 I、II 计算得到的 b 值相对偏低, 高估了该地区的地震危险性程度。

(3) 比较目录 II、III 的计算结果可看出, b 值相差了 0.03, V_4 相差了 0.117。在指定概率水平下, b 值和 V_4 的差异会对基岩峰值加速度产生较大影响 (黄玮琼等, 1989; 鄢家全等, 1996; 黄河, 2010)。

为了探讨小震资料完整性分析对地震危险性计算结果的影响, 我们在东北地震区内选取了两个控制点, 即控制点 A (45.006°N, 124.581°E)、控制点 B (43.744°N, 125.041°E)。用上述得到的地震活动性参数, 以相同的概率危险性分析方法, 计算了使用不同的地震活动性参数在不同超越概率水平下的基岩水平峰值加速度, 计算结果见表 4。

表 4 地震危险性分析结果表

目录	控制点坐标		基岩峰值加速度 (单位: gal)					
	东经 (°)	北纬 (°)	50a, 63%	50a, 10%	50a, 2%	100a, 63%	100a, 10%	100a, 3%
I	124.581	45.006	18.4	159.5	360.0	37.3	240.2	402.7
II			18.4	163.5	366.6	38.1	245.4	409.1
III			18.4	157.5	356.7	36.9	237.5	399.2
I	125.041	43.744	13.9	62.1	144.2	22.3	93.2	162.4
II			13.8	61.7	143.8	22.2	92.8	162.2
III			14.0	62.3	144.3	22.4	93.4	162.5

从表 4 中可看出, 使用目录 I ~ III 计算得到的不同超越概率水平下的基岩水平峰值加速度值不同: 使用目录 I、II 计算得到的值相对偏高, 高估了该地区的地震危险性程度, 同前述分析结果一致; 其次, 资料的完整性分析对高超越概率水平的影响比对较低超越概率水平的影响大; 控制点 A 中, 使用目录 I ~ III 计算得到的基岩峰值加速度分别为 159.5、163.5、

157.5gal, 将其转换为平均场地土峰值加速度分别为 187.0、191.2、184.9gal。我们发现, 使用目录 II 计算得到的平均场地土峰值加速度为 191.2gal 位于 0.15g 区, 而其余位于 0.10g 区, 使用未进行完整性分析的目录会造成危险性计算的不可靠性, 不能真实地反映该区实际的危险程度。

综上所述, 使用完整性分析的小震目录统计时, 拟合的相关系数提高了, 方差降低了, 得到了较为可靠的地震活动性参数 b 值和年平均发生率 V_4 值, 真实地反映未来的地震活动趋势和危险性程度。

4 结语

通过本项研究得到以下几点结论和认识:

(1) 东北地震区内最小完整性震级 M_c 总体呈现减小趋势, 可划分为 1970~1999 年和 2000~2011 年两个研究时段。前一时段内的 M_c 值除承德、锦西以南部分为 1.9 以外, 其余部分均大于 2.0; 后一时段内的 M_c 值介于 1.6~2.1 之间, 局部地区的 M_c 值有大幅度的降低, 如抚松县地区和大兴安岭东部地区。

(2) 小震资料作为地震活动性分析中的基础和关键资料, 其完整性分析尤显重要, 不容忽视。进行小震资料完整性分析时, 仅分时段或根据地震构造分区确定区域最小完整性震级 M_c 的方法具有不可靠性。应采用本文的方法, 综合考虑区域台网改造、升级等因素, 定量地分析各时段内 M_c 的空间分布值, 可以提供更科学、合理和可靠的地震目录。

(3) 资料完整性分析对地震活动性参数 b 值、 V_4 值以及地震危险性分析的结果均有影响, 完整性分析后的地震资料统计得到的地震活动性参数和地震危险性分析结果最为接近真实值, 能更好反映研究区未来的地震活动趋势。

参考文献

- 陈凌、刘杰、陈颀等, 1998, 地震活动性分析中余震的删除, 地球物理学报, 41(增刊), 244~252。
- 冯建刚、姚家骏、代炜, 2010, 青藏高原北部地区小震目录完整性分析, 高原地震, 22(2), 10~14。
- 国家地震局震害防御司, 1995, 中国历史强震目录(公元前 23 世纪~公元 1911 年), 北京: 地震出版社。
- 国家地震局, 1996, 中国地震烈度区划概论, 北京: 地震出版社。
- 黄玮琼、时振梁、曹学锋, 1989, b 值统计中的影响因素及危险性分析中 b 值的选取, 地震学报, 11(4), 351~361。
- 黄玮琼、李文香、曹学锋等, 1994, 中国大陆地震资料完整性研究之二——分区地震资料基本完整的起始年分布图象, 地震学报, 16(4), 423~432。
- 黄河, 2010, 地震活动性参数对地震动的影响, 防灾减灾学报, 26(1), 26~30。
- 河北省地震局, 2005, 河北省地震监测志, 北京: 地震出版社。
- 黑龙江省地震局, 2004, 黑龙江省地震监测志, 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社。
- 吉林省地震局, 2005, 吉林省地震监测志, 北京: 地震出版社。
- 焦远碧、吴开统、杨满栋, 1990, 我国地震台网监测能力及台网观测条件质量评定, 中国地震, 1990, 6(4), 1~7。
- 辽宁省地震局, 2004, 辽宁省地震监测志, 北京: 地震出版社。
- 刘东旺、沈小七、李敏莉等, 2004, 华北地震区地震活动特征及其危险性研究, 地震地磁观测与研究, 25(3), 8~13。
- 内蒙古自治区地震局, 2005, 内蒙古自治区地震监测志, 呼和浩特: 内蒙古人民出版社。
- 潘华、李金臣, 2006, 地震统计区地震活动性参数 b 值及 V_4 不确定性研究, 震灾防御技术, 1(3), 218~224。
- 苏有锦、李永莉、李忠华等, 2003, 川滇地区区域地震目录完整性最小震级分析, 地震研究, 26(增刊), 10~16。
- 屠泓为、李智敏、李文巧等, 2010, 青海省及邻近区域历史地震目录完整性分析探讨, 高原地震, 22(3), 7~15。

- 吴戈、房贺岩、李志田,1992,东北地震史料辑览,北京:地震出版社。
- 吴兆营、薄景山、刘志平等,2005,东北地震区 b 值和地震年平均发生率的统计分析,东北地震研究,21(3),27~32。
- 谢卓娟,2009,1990 年以来中国大陆及邻区地震资料的统计分析,硕士论文,27~44,北京:中国地震局地壳应力研究所。
- 鄢家全、韩炜、高孟潭,1996,地震活动性参数的不确定性及其对区划结果的影响,中国地震,12(增刊),71~77。
- 杨春柳、陈新民、崔灿等,2010,南京地区 b 值和地震年平均发生率的研究,江苏建筑,2,61~64。
- 中国地震局震害防御司,1999,中国近代地震目录(公元 1912 年~1990 年 $M_s \geq 4.7$),北京:中国科学技术出版社。
- Console R, Gasparini C, Simoni B D et al,1979, Preambolo al Catalogo Sismico Nazionale I criteri di informazione del CSN. Pnnali Geofis, 32,37~77.
- Cornell C A,1968, Engineering seismic risk analysis, BSSA, 58(5), 1583~1606.
- Gutenberg B, Richter C F,1956, Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration, Bull Seism Soc Am, 46,105~143.
- Richter C F, 1958,Elementary seismology, Freeman, San Francisco.
- Wiemer S, Wyss M,2000, Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan, Bull Seism Soc Am,90,859~869.

Analysis on integrity of small earthquake data and its influence on seismicity parameters in the northeast seismic zone

Xie Zhuojuan Lv Yuejun Peng Yanju Zhang Lifang

Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract The paper takes the northeast seismic zone as an example and analyzes the completeness of the small earthquake catalogues in terms of the Gutenberg-Richter magnitude-frequency relation. The magnitude lower limit is determined in different periods and in different areas by using the quantitative analysis methods. In addition, b value and average annual incidence of earthquake in northeast seismic region are obtained with the use of mathematical statistics method. The effects of the integrated data on the seismicity parameters and seismic hazard analysis are also discussed. It is shown that the completeness analysis provides a possible means for obtaining more accurate seismicity parameter and shows better performance in representing actual regional seismicity level for areas of low seismicity. The researching methods of this article and its conclusion can be used as analysis on integrity of earthquake data and seismic activity research reference.

Key words: Small earthquake Minimum magnitude of completeness Seismicity parameters Northeast seismic zone