

李俏, 王万宁, 张丽, 等. 郯庐带地震活动分析及未来地震危险性评估[J]. 华南地震, 2018, 38(2): 57-65. [LI Qiao, WANG Wanning, ZHANG Li, et al. Seismic Activity Risk Analysis and Seismic Hazard Assessment for Tanlu Fault Zone [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2): 57-65]

## 郯庐带地震活动分析及未来地震危险性评估

李 俏<sup>1</sup>, 王万宁<sup>1</sup>, 张 丽<sup>1</sup>, 曲 乐<sup>1</sup>, 孟宪森<sup>2</sup>

(1. 辽宁省地震局, 沈阳 110034; 2. 黑龙江省地震局, 哈尔滨 150090)

**摘要:** 从郯庐带整体地震活动特征出发, 利用古登堡-里克特的震级与频度关系和地震时空扫描等方法对其危险性进行了分析, 认为郯庐带在未来 100 年内仍有 7 级以上大地震发生的可能, 其地点位于几个显著的北西向断裂与郯庐带交汇部位(如苏鲁皖交界, 渤海湾地区等)。鉴于短期地震预测较难实现的现实条件下, 提出了当前减轻地震灾害的对策建议: 加强苏鲁皖交界区域的地球介质参数变化扫描研究; 存在地震危险性的地区推进具有减震、隔震功能的地震安全社区建设工作。

**关键词:** 郯庐带; 地震活动性; 地震危险性

中图分类号: P315.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2018)02-0057-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.009

## Seismic Activity Risk Analysis and Seismic Hazard Assessment for Tanlu Fault Zone

LI Qiao<sup>1</sup>, WANG Wanning<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, QU Le<sup>1</sup>, MENG Xiansen<sup>2</sup>

(1. Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, China;

2. Heilongjiang Earthquake Agency, Harbin 150090, China)

**Abstract:** From the seismic activity characteristic of the Tanlu Fault Zone, the paper analyzed its seismic hazard by using the relationship between Gutenberg-Richter magnitude and frequency, and the seismic temporal-spatial scanning method. It was concluded that earthquake with  $M \geq 7$  might happen on Tanlu Fault Zone in the next 100 years, which should be located at the intersection of several distinguished NW faults and Tanlu Fault Zone (such as the intersection of Jiangsu-Shandong-Anhui area, Bohai Bay area, and so on). This paper proposed suggestions and countermeasures of seismic disaster reduction under the realistic condition of the difficulties in the short-term earthquake prediction; the earth medium parameters scan study should be strengthened in Jiangsu-Shandong-Anhui area; the community construction work of the seismic safety, which has the function of earthquake isolation and reduction, should be promoted in the seismic risk region.

**Keywords:** Tanlu fault zone; Seismic activity; Disaster reduction

收稿日期: 2017-05-25

作者简介: 李俏(1983-), 女, 本科, 工程师, 主要从事防灾减灾科普宣传期刊编辑工作。

E-mail: juejue521@163.com.

## 0 引言

郯庐断裂带是中国东部规模最大的一条断裂带,它南始于安徽庐江,经山东郯城、辽宁沈阳、吉林长春、黑龙江通河等地一直延至俄罗斯的比金-尼克拉耶夫斯克境内,在中国境内延伸 2 400 多 km,它切穿了不同大地构造单元,规模宏伟,结构复杂。郯庐断裂带形成于中元古代<sup>[1-4]</sup>,经历了多期构造,不仅是一条长期以剪切运动为主的深断裂带,而且是一条近期仍继承着新构造运动方式,以左旋、逆推为主的活断裂带<sup>[5-6]</sup>,同时也是一条

具有明显分段、活动程度不等的地震活动带<sup>[7]</sup>。为了解该断裂带的地震危险性,本文在划分段落、研究地震时空分布、分析地震重复率、应变累计释放和复发周期等工作基础上对郯庐带未来的地震活动性作了评价。

## 1 郯庐断裂带分段概况

自古至今,郯庐断裂带及其附近两侧,地震活动从未间断过,是处于活动状态的断裂,是一条地震活动带(图 1)。

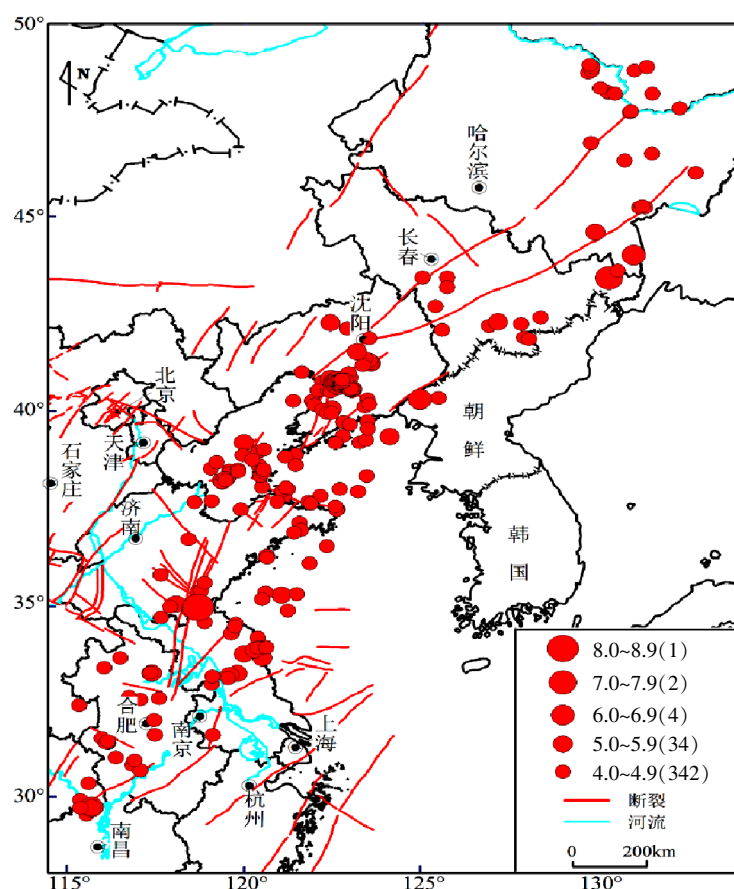


图 1 郯庐带震中分布图( $M \geq 4.0$ )

Fig.1 Epicenter distribution map of Tanlu fault zone( $M \geq 4.0$ )

从地震活动分布来看,分为 3 段:

北段(肇兴—沈阳):发育于吉黑断拗,由两条走向  $30^\circ \sim 40^\circ$  的主断裂组成,宽 5~20 km,为一中、新生代地堑型断裂带,带内充填 4 000~5 000 m 厚的火山岩、火山碎屑岩夹煤系地层。基底刚度较软,结构较简单,有史料记载只发生过 5.8 级地震<sup>[8]</sup>,但据古地震探测资料证实有 7 级地震发生。

南段(宿迁—广济):发育在扬子断块与华北淮南断褶的交界处,结构比较简单,构造应力量

级不高。宿迁以北断裂控制沂河、沭河流向,地表地质与遥感影像线性特征明显,而南段第四系覆盖严重,新构造变形显著减弱。该段地震活动强度不大,其地震活动水平较北段略高一些。

中段(沈阳—宿迁):呈北北东向穿切由太古代结晶基底组成的华北断块区,主要由 4 条大致平行的主断裂组成,这 4 条主断裂在鲁中沂、沭河谷地构成了 20~40 km 的“两堑夹一垒”的构造,称为沂沭深断裂带。沂沭断裂带在全新世活

动频繁,经历了挤压逆冲(全新世早-中期)、正断活动(距今 600~350 a)和挤压逆冲活动(近百年以来)。目前,断裂带继续活动<sup>[9-10]</sup>,这一段是结构复杂、新活动强、且基底介质刚度较高的地区。6级以上强震主要集中在郯庐断裂带中段。该段目前为强烈挤压并兼有右旋扭动<sup>[10-11]</sup>。由于其遭受的正应力大,剪切应力也大,易于积累大地震的能量,而难于以中、小地震的形式来释放,故该段地震强度大、频度低,该段最大地震为 1668 年莒县-郯城 8.5 级地震。

## 2 郯庐带地震活动的时序特征

由公元前 70 年以来郯庐带地震时序分布图(图 2)可见 1500 年以前郯庐带只有零星地震,1500 年之后全带可划分为两个地震活动期:1537—1680 年为一个活动期,历时 143 年;1880 年至今为一活动期,本期至今已历时 137 年。从郯庐带两期地震活动看,第一期共发生 3 次 7 级以上地震,最高震级为 8.5 级;本期已发生 3 次 7

级以上地震,最高震级为 7.5 级,虽然本期地震应变能低于第一期,但 7 级以上大震的总频次已经相当。对比两期时间序列,今后郯庐带地震活动处于本活动期的后期阶段。

郯庐带地震活动在各分段时序上具有一定的差异性(图 2)。宿迁—昌邑段在长期平静背景上发生 1668 年郯城 8.5 级地震,之后至 1831 年的 160 多年内相继发生几次中等地震。这几次中等地震有 3 个特点:(1)发生于郯庐带其它段落相对平静的时段,也就是华北区第三、四活动期之间的平静时段;(2)发生于郯城大震的Ⅷ度区内,总体上呈减弱状态;(3)发生于与沂沭断裂带共扼的北西向断裂附近。所以它们与 1668 年郯城 8.5 级地震震源区的调整性活动有关。目前该段处于平静状态,上一次大震是公元前 70 年诸城、昌乐间 7 级地震,距 1668 年郯城 8.5 级地震 1738 年。从郯庐带宿迁—沈阳段地震活动分析,应该说这一段累积能量释放曲线和郯庐全带基本类似(图 3),因此从目前资料分析,该段基本释放了整个郯庐地震带的能量。

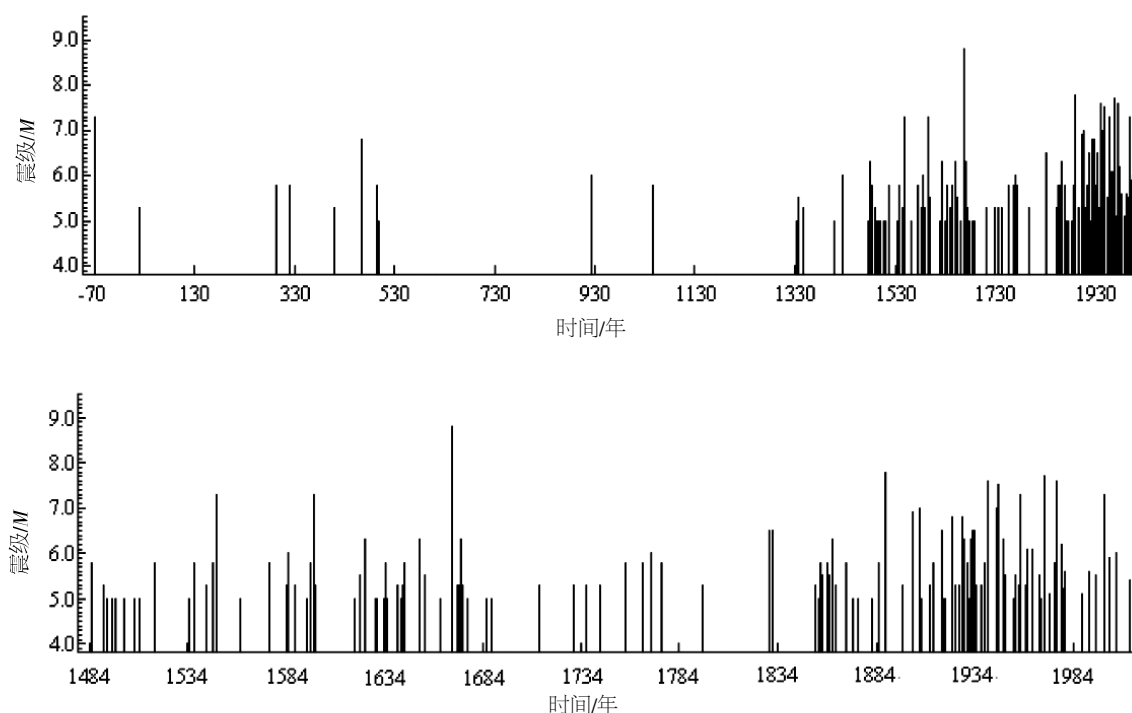


图 2 郯庐带地震时序分布( $M \geq 4.0$ )

Fig.2 The earthquake sequence distribution of Tanlu fault zone ( $M \geq 4.0$ )

1970 年以后中国地震台网监测能力逐渐加强, $M \geq 2.0$  级地震基本不缺。地震活动累计应变能释放曲线(图 4)表明 20 世纪 70 年代以后郯庐带地震活动主要集中在潍坊—沈阳段,郯庐全带释放总

能量为  $3.15 \times 10^8 \text{J}^{1/2}$ ,而潍坊—沈阳段释放能量为  $2.4 \times 10^8 \text{J}^{1/2}$ ,占全带能量的 76.2%,因此这个活动期内,潍坊—沈阳段活动最强。宿迁—潍坊段释放能量为  $1.8 \times 10^7 \text{J}^{1/2}$ ,占全带能量的 5.7%,广济—宿

迁段释放能量为  $3.8 \times 10^{12} \text{J}$ ，占全带能量的 12.1%。  
沈阳—萝北段释放能量为  $1.9 \times 10^{12} \text{J}$ ，占全带能量的 6%。因此历史上发生 8.5 级大地震的宿迁—潍坊段近期地震活动偏弱，大地震的减震效应依然存在。

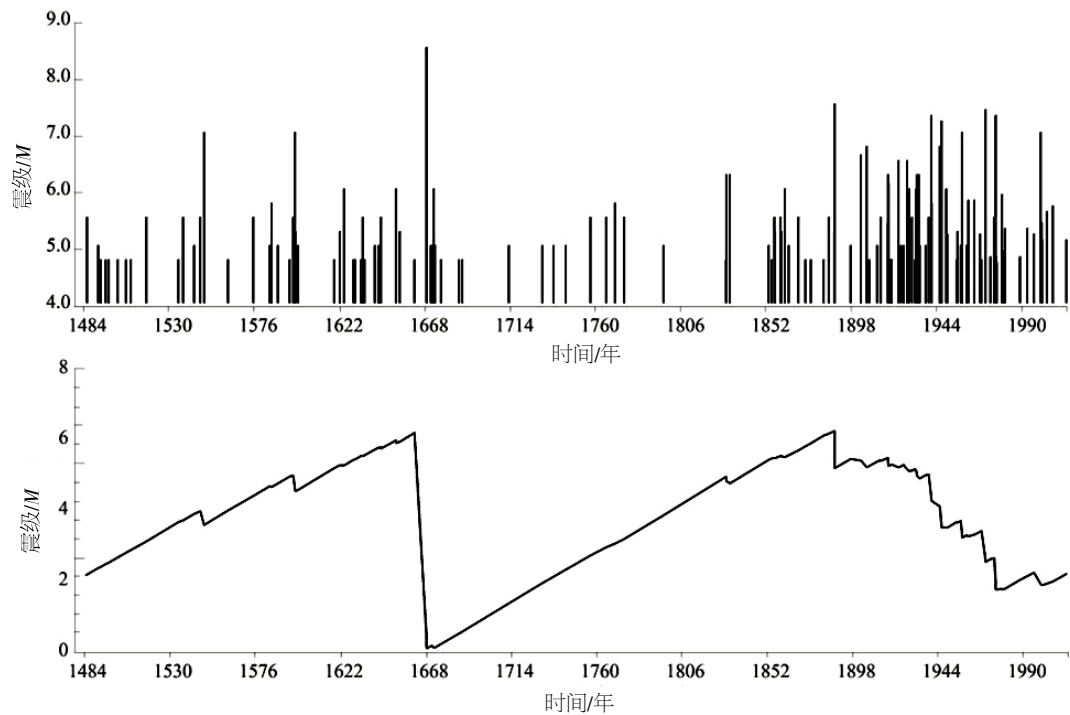


图 3 郯庐带 G-R 关系应变累积释放曲线

Fig.3 The G-R strain accumulation release curves of Tanlu fault zone

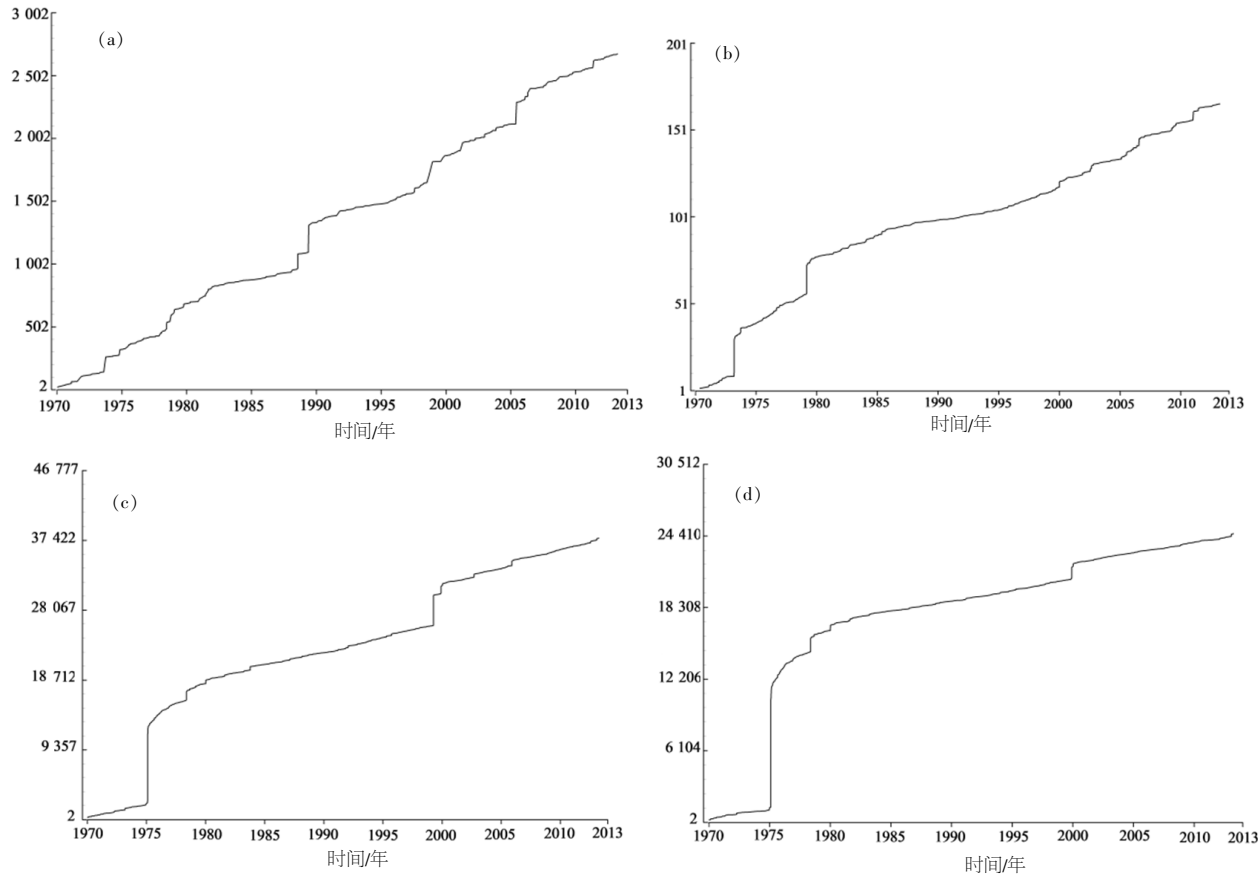


图 4 郯庐带各段累计能量释放曲线(a, b, c, d)

Fig.4 The cumulative energy release curves of Tanlu fault zone

### 3 郯庐带地震活动的深度特征

郯庐带的震源深度分布在时间及空间上具有明显的差异性。1970—1978 年间地震震源深度比其他时段深度大, 平均为 13.915 km, 2 次 7 级以上大地震, 发生在此时间段内; 1979—2013 年平均为 9.8874 km(图 5)。

图 5 可见, 地震震源深度从南段湖北广济开始由浅向深逐渐增加, 到达中段时, 深度达到 50 km, 随后又逐渐变浅, 到达黑龙江边时和广济一带深度相当, 全带平均深度为 10 km。郯庐带中段地震震源深度之所以比两边深, 是因为其中段有 4 条大致平行的主断裂在鲁中沂、沐河谷地构成了“两堑夹一垒”的构造而形成的沂沐深断裂带。

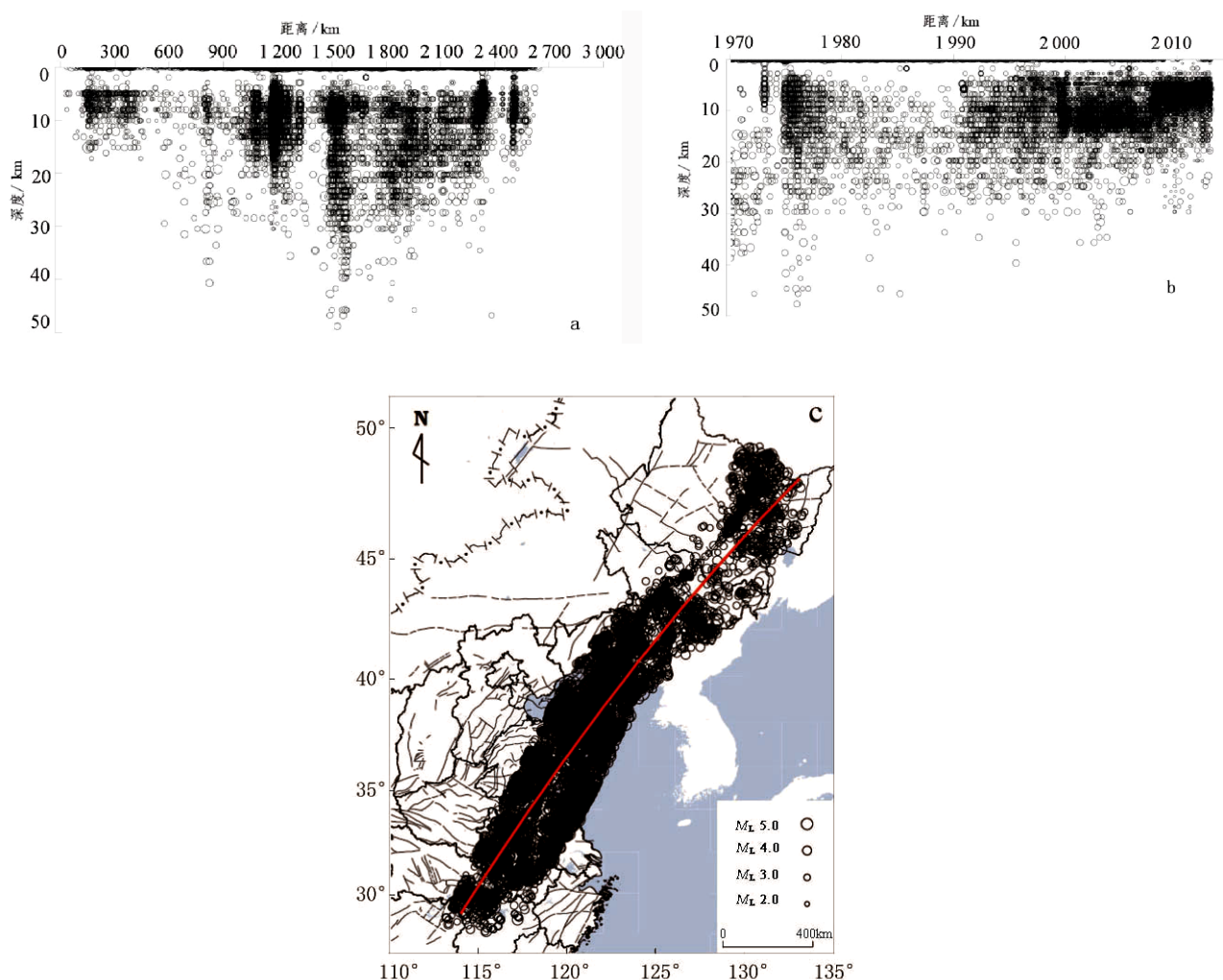


图 5 郯庐带地震震源深度分布图 (a 深度-时间分布; b 深度-空间分布)

Fig.5 The earthquake focal depth distributions of Tanlu fault zone

### 4 郯庐带未来地震活动趋势估计

#### 4.1 地震重复率分析

据震级-频度关系式(即 G-R 式)

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

式(1)中:  $N$  为大于等于  $M$  的累计地震频度;  $M$  为地震震级;  $a$  为地震活动度;  $b$  为大小地震比例关系。

可以计算地震的重复率。用 1484 年以来郯庐

地震带记载相对完整的  $M \geq 4.0$  级地震的资料统计(图 6), 用最小二乘法拟合可得:

$$\log N = 4.6457 - 0.5588M \quad (2)$$

从而得到郯庐带各级别地震的年发生率, 进而估计未来一定时间内地震缺失情况(表 1)。由此可见, 郯庐带未来 100 年内仍有发生 7~8 级以上地震的可能性。

#### 4.2 累积应变能释放

从公元前 70 年至 2012 年郯庐带 7 级以上地

震能量共释放了  $9.997 \times 10^8 \text{J}^{1/2}$  能量, 而 1668 年郯城 8.5 级大地震释放了  $5.9 \times 10^8 \text{J}^{1/2}$ , 占总能量的 59% (图 7)。全带平均年能量释放速率  $4.8 \times 10^5 \text{J}^{1/2}$ , 如果以此计算未来 100 年可以积累  $4.8 \times 10^7 \text{J}^{1/2}$  应变能,

相当于一次 7 级地震的能量。但是由于历史地震记载的缺失, 计算结果将会偏低, 例如近期工作结果认为黑龙江通河在 1700 年前可能发生一次 7 级以上地震<sup>[13]</sup>。

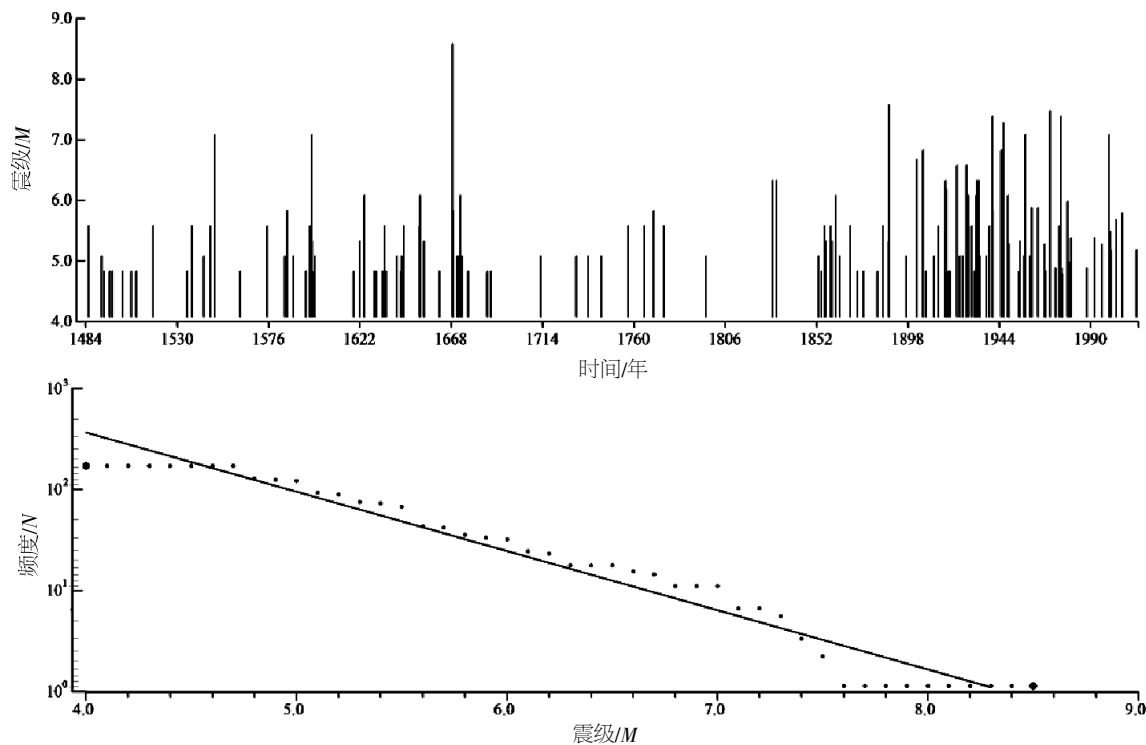


图 6 郯庐带震级-频度关系曲线  
Fig.6 The magnitude-frequency curves of Tanlu fault zone

表 1 郯庐带未来 100 年缺震估计表 (1484—2112 年)  
Table 1 The estimation table of missing earthquake for the next 100 years

震级/M	年均发生率/(%)	应发生次数/次(1484—2112 年)	已发生次数/次(1484—2012 年)	缺失次数/次(2012—2112 年)
5.0	0.134 7	84.6	45	39.6
5.5	0.070 7	44.4	32	12.4
6.0	0.037 9	23.8	19	4.8
6.5	0.019 5	12.3	9	3.3
7.0	0.010 2	6.4	5	1.4
7.5	0.005 4	3.4	3	0.4
8.0	0.002 8	1.8	1	0.8

4.3 郯庐带地震复发周期

假定对某一地震带或地震区、对一定时间(例如  $m$  年)的地震, 建立古登堡的震级-频度关系:

$$\text{Log}N=a-bM \tag{3}$$

式(3)中:  $N$  为大于或等于  $M$  的累计地震频度;  $M$  为地震震级;  $a$  为地震活动度;  $b$  为大小地震比例关系。式(3)也可以写为:

$$N=10^{a-bM} \tag{4}$$

如果计算时采用震级自大至小的累计频度的

方法, 则  $N$  为  $m$  年内该地震带(或区)内震级大于或等于  $M$  的地震总数。则每一年的地震平均数为:

$$N_0=N/m=(1/m)*10^{a-bM} \tag{5}$$

$t$  年便有  $N_t$  个地震。

$$Nt=N_0 \quad t=Nt/m=(t/m)*10^{a-bM} \tag{6}$$

令  $N_t=1$ , 则可求得发生一次地震所需要的时间  $t$ (以下记作  $TM$ ), 为复发周期。

$$TM=m*10^{bM-a} \tag{7}$$

式(6)为复发周期公式。而复发周期既是震级的函数, 又是  $a$  和  $b$  的函数。

取公元前 70 至 2012 年  $M \geq 5$  级地震资料统计活动的 G-R 关系式进行计算:

$$TM=208.2 \times 10^{0.6966M-5.587} \quad (8)$$

则 8.5 级地震复发周期 4493 年, 7 级地震 405 年。王华林等根据古地震事件分析认为在郯城 8.5 级全新世有 4 次强震<sup>[4]</sup>。绝对复发周期(相邻两次强震

时间间隔)在 3 200~4 000 年之间。而根据 1668 年郯城 8.5 级地震断层中各次级剪切断层的年平均滑动速率 2.1 mm/a 计算, 如果达到 1668 年郯城 8.5 级地震的最大水平位移(10 m)时, 大震复发周期则为 4 762 年。本文计算结果为 4 493 年, 几种方法均说明 8 级以上大地震复发周期在 3 000 年以上。

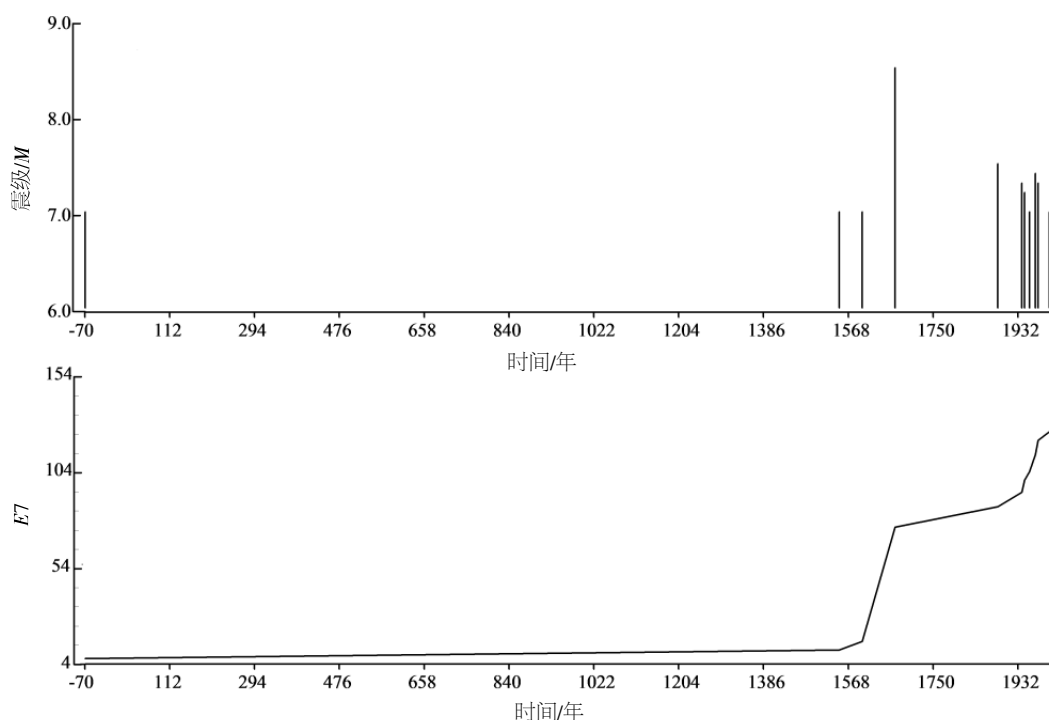


图 7 郯庐带 7 级以上地震能量累积释放曲线

Fig.7 The cumulative energy release curves of earthquakes with  $M \geq 7$  in Tanlu fault zone

## 5 郯庐断裂带 7 级地震活动的构造特征

据统计, 自公元前 70 年至今, 郯庐断裂带 200 km 范围内一共发生  $M$  7.0~7.9 级地震 6 次,  $M$  8.5 级地震 1 次, 切主要发生在沈阳—宿迁段(图 8):

公元前 70 年郯城 7.0 级地震; 1548 年渤海湾 7.0 级地震; 1597 年渤海湾 7.0 级地震; 1668 年山东郯城 8.5 级地震; 1888 年渤海湾 7.5 级地震; 1969 年渤海湾 7.4 级地震; 1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震。

沈阳—宿迁段地震分布图可以发现大地震都发生在北西向断裂和北东向郯庐断裂的交汇处(图 9), 因此未来 7 级以上大地震仍可能发生在构造条件类似的地区。

由于中国各地人文记载起始年限不同, 如黄河和长江中下游地区人文记载较早, 因此公元前

的 7 级以上大地震都有记载。而东北地区由于人文史料较少, 可能会有一些大地震缺失。例如闵伟等<sup>[13]</sup>通过对部分段落的高分辨率卫星影像解译和野外调查, 在黑龙江通河和吉林舒兰附近发现断错河流 I 级阶地等全新世地貌面、高 1~2m 的地表陡坎。在通河县祥顺乡南楼村发现 1 条由 2~3 个断层面组成的宽约 20~40cm 的断层带, 断层断错的最新地层为距今  $(1730 \pm 40)$ a, 推测依兰—伊通断裂部分段落为晚更新世—全新世活动断裂, 并且在历史上很可能发生过 7 级以上的强震。因此应对依兰—伊通断裂做进一步深入细致的工作, 为东北地区未来地震危险性评价提供更丰富的科学依据。

## 6 结论

(1) 郯庐带的基本特征: 100 年内有发生 7 级以上地震活动的可能。



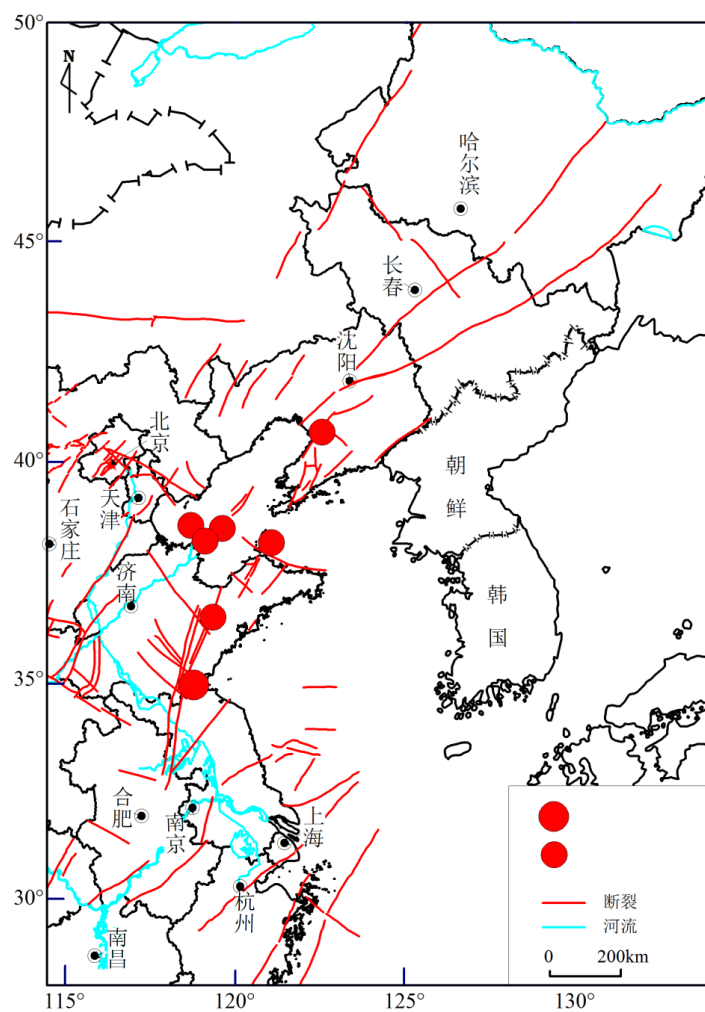
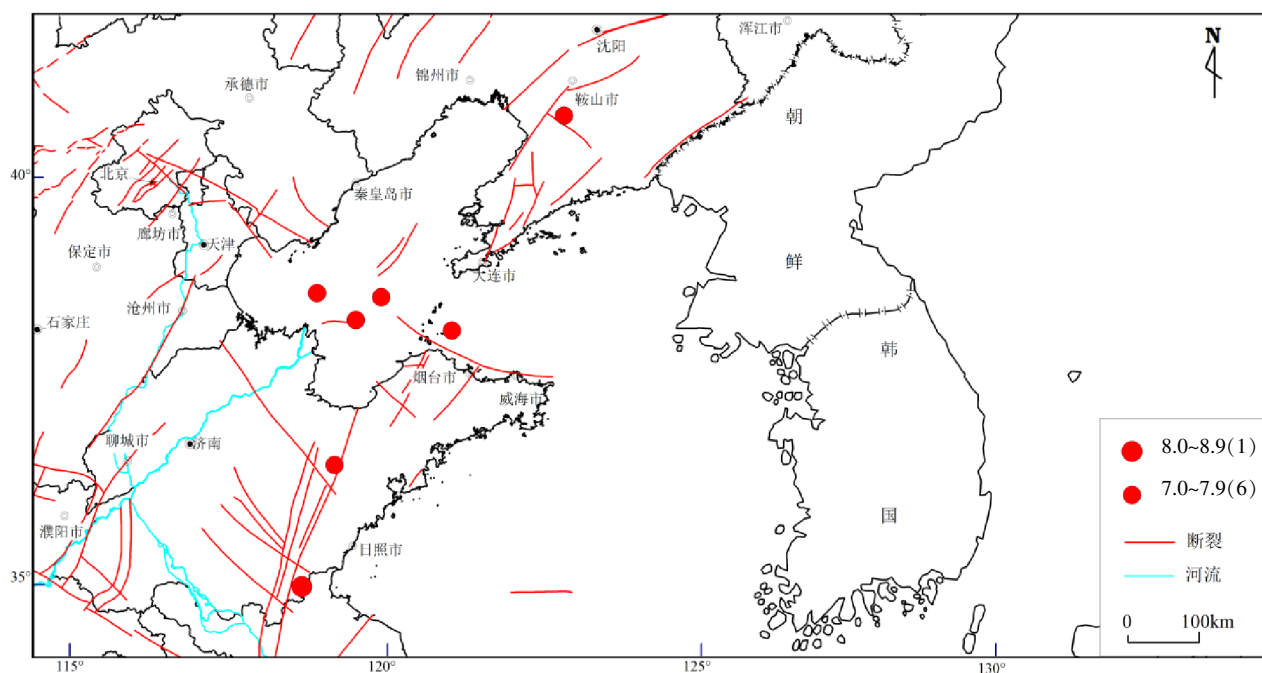
图8 郯庐带地震分布( $M \geq 7.0$ )Fig.8 The earthquake distribution map of Tanlu fault zone ( $M \geq 7.0$ )

图9 郯庐带中段7级地震分布

Fig.9 The distribution map of  $M 7.0$  earthquakes in the middle segment of Tanlu fault zone



(2) 分段活动差别:在北西向断裂与郯庐带交汇的部位(如苏鲁皖交界,渤海湾地区等),地球物理场和地球介质参数变化较大的地区(如潍坊—郯城段,郯城—庐江段,鲁苏交界)值得特别关注。

(3) 未来危险性评价:加强苏鲁皖交界区域的地球介质参数变化扫描研究;在存在地震危险性的地区推进具有减震、隔震功能的地震安全社区建设工作,在地震发生时,该社区可以实现应急避难场所和应急救援指挥中心等功能,且总的投资增加不多。

### 参考文献:

- [1] 徐嘉炜. 郯城—庐江平移断裂系统[M]//中国地质科学院地质力学研究所编. 构造地质论丛(3). 北京:地质出版社, 1984.
- [2] 王小凤,李中坚,陈柏林,等. 郯庐断裂带[M]. 北京:地质出版社,2001.
- [3] 许志琴. 郯庐裂谷系概述 [M]//构造地质论丛 (3). 北京:地质出版社,1985.
- [4] 国家地震局地质研究所. 郯庐断裂 [M]. 北京:地震出版社,1987.
- [5] 万天丰,朱鸿. 郯庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期[J]. 高校地质学报,1996,2(1):14-27.
- [6] 朱光,王道轩,刘国生,等. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景[J]. 地质科学,2001,36(3):269-278.
- [7] 张鹏,王良书,钟锴,等. 郯庐断裂带的分段性研究[J]. 地质论评,2007,53(5):586-592.
- [8] 刘茂强,杨丙中,邓俊国,等. 伊通—舒兰地堑地质构造特征及其演化[M]. 北京:地质出版社,1993:42-84.
- [9] 苏尚国,周若,顾德林. 山东沂水郯庐断裂带中段中生代火山岩特征及演化[J]. 地质论评,1999,45(增刊):565-571.
- [10] 徐溶,陈时军,王峰. 沂沭断裂带及其附近地区构造应力场研究概要[J]. 地震工程学报,2014,36(1):158-169.
- [11] 刘晓霞,江在森,武艳强. 利用 GPS 资料研究郯庐带现今运动及变形状态[J]. 地震,2012,32(4):1-10.
- [12] 胡惟,朱光,严乐佳,等. 郯庐断裂带中段地震活动性与深部地壳电性结构关系的探讨[J]. 地质论评, 2014,60(1): 80-90.
- [13] 闵伟,焦德成,周本刚,等. 依兰—伊通断裂全新世活动的新发现及其意义 [J]. 地震地质,2011, 33 (1):141-150.
- [14] 王华林. 1668 年郯城 8.5 级地震断裂的全新世滑动速率、古地震和强地震复发周期[J]. 西北地震学报,1995, 17(4): 1-12.