谢富仁，张世民，张永庆，任俊杰，张效亮，冉洪流，2013．中国大陆活动断裂大震复发间隔．震灾防御技术，**8**（1）：1—10.

中国大陆活动断裂大震复发间隔[1]

谢富仁[1)] 张世民[1)] 张永庆[1)] 任俊杰[1)] 张效亮[2)] 冉洪流[3)]

1）中国地震局地壳应力研究所（地壳动力学重点实验室），北京 100085

2）中国地震局地震灾害防御中心，北京 100029

3）中国地震局地质研究所，北京 100029

摘要 通过重新编制活动断层定量参数数据库，利用中国大陆活动断裂定量资料评估了中国大陆活动断裂（段）的大震复发间隔，给出了青藏、新疆、华北 3 个构造区的大震复发间隔分布特征。研究结果表明，青藏高原活动断裂 *M*7.5 级以上大震复发间隔远小于华北和新疆。青藏高原从几 100a 到 2000a，而华北和新疆则从 2000a 到 5000a。大震复发间隔与断层滑动速率成反比，边界断裂的大震复发间隔通常比块体内部断裂短，比例关系大体为 1∶1.5—2.0。大震复发间隔与断裂性质相关，走滑断层的复发间隔小于逆走滑断层，逆走滑断层小于逆断层，比例关系大体为 1∶1.5—2.5。现有的定量数据汇编成果和大震复发间隔估计以及统计结果，既可作为地震危险性分析的重要参数，又可作为构造类比研究的参考信息。

关键词：活动断裂 定量参数 大震 复发间隔 中国大陆

引言

地震往往造成严重的生命和财产损失。就中国而言，地震人员伤亡的主要原因是建筑物倒塌破坏使人员被覆压或困于其中得不到及时抢救而造成的。因此，中国第五代地震危险性区划图的编制提出了“抗倒塌”这样一个基本目标（高孟潭等，2006），也就是说，要使建筑物在罕遇地震（重复周期 475a）下不倒塌。这就意味着，在编制规划中针对高震级档地震进行设防是实现这一目标的重要步骤，因此，大震复发行为和复发间隔的估计就成为区划图编制中的一个关键内容。

在前几代中国地震区划图编制中，大震年发生率的获取是根据截断的 G-R 关系获得的。这种方法基于泊松分布假设，根据中小地震的震级-频度关系的统计结果（G-R 模型）进行外插，得到大震年发生率。由于该方法仅需统计区内的中小地震目录，计算简便，在实际工作中被广泛采用。不过，这一方法也存在着明显的不足，当我们将高震级档的数据（如古地震）加入到 G-R 统计曲线图中时，明显可见曲线在高震级档处向上翘起，明显不同于中小震级的

1 基金项目 中国第五代地震区划图编制项目和国家科技支撑计划课题（2012BAK19B03）资助
[收稿日期] 2013-02-18
[作者简介] 谢富仁，男，生于 1956 年。研究员，博士生导师。主要从事构造地质学和地震区划研究。
E-mail： xxiefr@263．net

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

统计曲线（Schwartz 等，1984）。从而可知，大地震和中小地震的统计关系是有较大差异的。

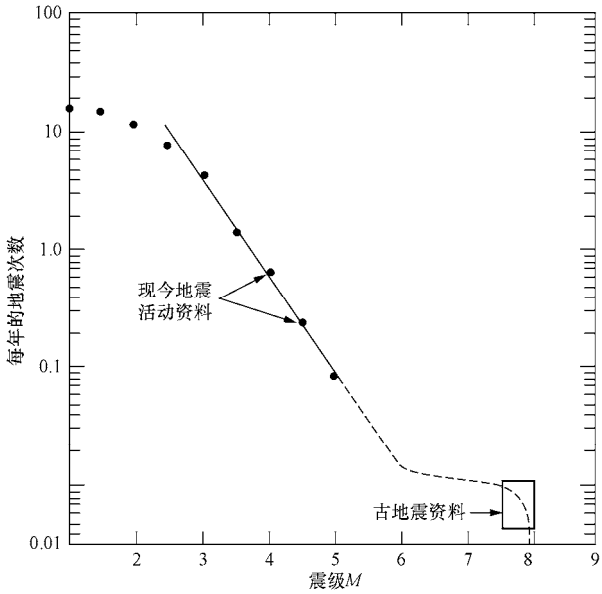

图 1 加入了古地震资料的震级-频度关系（Schwartz 等，1984）

Fig. 1 Magnitude-frequency relation after Paleo-earthquake data is added (after Schwartz et al., 1984)

在单一震源或发震断裂段的 G-R 关系图上，中小地震部分仍然服从于 G-R 关系（指数分布）：高震级档地震发生频度明显地偏离中小地震部分的 G-R 关系曲线。因此，按照 G-R 关系的截断指数方法估计年发生率低于地质资料获取的结果，从而会低估大地震的危险性和高估中小地震的危险性

从图 1 还可以看到，在上述 G-R 关系图中古地震的震级范围分布在一个较窄的震级区间内，也就是说，大地震总是以相近震级的大地震错断断层，这一特征可用特征地震模型描述。大地震通常会造成地表破裂，从而在地质记录中保留下来，比如地形错位、古地震以及历史记录等，这些地质记录可用来评估活动断裂大地震的复发间隔。

近些年来，我国的地质工作者在许多活动断裂上开展了系统性的地质学定量研究，从而为利用地质学方法研究高震级档潜源大震复发特征提供了重要的基础资料（任俊杰等，2008；邓起东等，2008；张永庆等，2007；谢富仁等，2008）。同时还有很多学者在这方面也进行了尝试，例如利用断层滑动速率、古地震序列资料估算大震重复间隔。美国从编制 1996 年地震区划图开始，就引入了特征地震模型和地震矩率释放模型，并将活断层地质定量资料应用于大震年发生率的评定，而在 2002 年和 2008 年的地震区划图中又将这种评价方法不断改进，引入了多段破裂与丛集特征等概念（Frankel 等，1995；2002；Petersen 等，2008），目前正在进行 UCERF3.0（The Uniform California Earthquake Rupture Forecast）的研究工作；意大利也于 2005 年发布了活动断裂定量数据库（Basili 等，2008），并且每年都在更新。此外，日本和新西兰也将其活动断裂定量研究成果向公众开放。各国地质学家都在致力于精确刻画活动断层的几何学、运动学特征，以利于对孕震体进行多学科精细研究，提高抗震和设防的能力。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

自 2007 年起，我国在第五代地震区划图计划的框架下，开展了高震级档年发生率的评估工作，在综合了前人各类研究成果的基础上，重新编制了中国活动断层定量参数数据库，依据这些数据评估了活动断裂的大地震平均复发间隔，并以此勾画了中国大陆大震复发间隔的空间分布特征。

1　方法

采用地质学方法评估大震复发间隔，其隐含假定是发生在断裂（段）上的大地震复发遵从“特征地震”模式，根据其统计特征，可分为严格周期和准周期类型，后者更常用。本研究假定断裂（段）上的大震发生符合特征地震模型。在特征地震模型中，最为关键的是对特征地震震级和复发间隔这两个参数的估计。不过在所有工作进行之前，需要对活动断裂（段）的定量研究资料做出评估，这是后面谈到的对不同方法获取结果进行综合评估时所需权重的来源。

1.1　活动断裂定量研究资料可靠性评级

由于断层的定量数据均存在一定的不确定性，首先需要根据活动断裂定量资料的具体情况对其进行可靠性评价，并以此为基础综合评定估计值，具体可根据研究区实际情况确定（图 2）。

本研究计算结果可信度分为以下三类。

信度 A：具有较为可信的滑动速率、断层长度及古地震序列和年代，三者计算结果具有可比性。在该种信度下综合评判的结果取平均值。

信度 B：具有较为可信的滑动速率和断层长度数据，利用这两种方法得到的结果具有可比性，但古地震结果与之差别较大（超出几倍者）。在这种信度下综合评判的结果取加权平均。

信度 C：仅具有可靠的长度，缺少滑动速率或数值不可靠。或者利用滑动速率法得到的结果与利用地震矩率法得到的差异具有数倍的差别；或通过类比的方法得到的结果。上述方法只取类比对象，保留百位的精度。

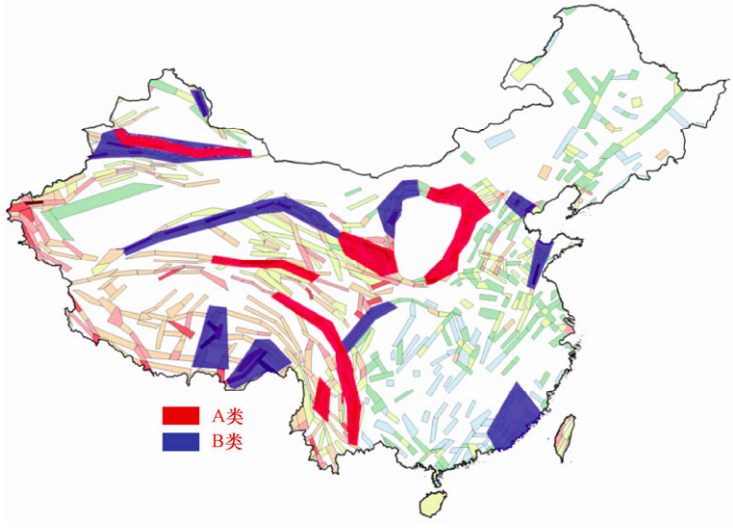

图 2　中国大陆活动断裂定量资料的可靠性评级图示

Fig. 2　Reliability classes for quantitative data of active faults in mainland China

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.2 特征地震震级的估计

特征地震震级可以从两个方面来估计：①对于已经发生过破坏性地震的断裂（段），通常根据历史地震及仪器记录地震确定的震级进行评价；对于尚未记载到破坏性地震的断裂（段），其震级一般通过对该断裂（段）地震构造特点与地震带内或相邻地区进行详细比较研究后确定。②根据断裂长度 L 和破裂面积 A 利用震级 M_S—L 或 M_S—A 的经验关系估计（Wells 等，1994）。

1.3 大震平均复发间隔的评定

根据断裂定量研究资料的情况，对活动断裂（段）的大震复发间隔进行评定，最后根据数据的可靠分级指标，对不同方法获得的估计结果进行加权综合，以此获得大震平均复发间隔。

（1）历史大震或古地震估计法

断裂（段）上发生过 2 次以上的历史大震或已揭示距今完整的 2 次以上的古地震记录，可以利用其间隔作为特征地震的复发间隔。

（2）断层滑动法

根据地震原地复发的时间可预报模型（Shimazaki 等，1980），一个断裂（段）上的特征地震之间的平均时间间隔 T，可由该断裂（段）上最晚 1 次地震的同震位错量 u 与断层的平均地震滑动速率 v 两者的比值估计，即：

$\overline{T}=\dfrac{u}{v}$，其中，$u$ 为同震平均位移量；v 为平均地震滑动速率，$v=V-C$，而 V 是由地质学方法得到的较长时期中断裂的平均滑动速率，C 是断裂上无震长期蠕滑平均速率。

该方案适用于时间可预报模式，即已知全新世断裂（段）的长期平均滑动速率及最新地震事件的同震平均位移量，可以用该方法。

（3）地震矩释放率法

在已知全新世断裂带的分段及各段的滑动速率时，可以用该方法。

平均复发间隔 $\overline{T}=\dfrac{\overline{M}_0}{\dot{M}_0}$，其中，$\overline{M}_0$ 为地震矩，可由特征地震的矩震级 $\overline{M}$ 确定；$\dot{M}_0$ 为地震矩释放率，由断裂（段）平均滑动速率等确定。

2 中国大陆活动断裂的大震复发间隔

根据中国大陆的构造格局和大地震的分布范围，将研究区分为 3 个子区：青藏区、华北区和新疆区。针对上述这 3 个区域，搜集了 130 条断裂（243 个断裂（段））的定量信息，表 1 汇集了这 3 个区的主要特征，其中，对华北区又分为 3 个子区分开叙述。

中国大陆主要活动断裂的特征表现为：青藏高原以走滑和逆走滑为主；华北为走滑和正走滑为主；新疆为逆冲和逆走滑为主。断层活动速率表现为西高东低的整体趋势（荆燕等，2004），与中国大陆地壳变形梯度分区情况相吻合，本文后面讨论的大震复发间隔也具有相近的趋势。下面分别论述这 3 个区的大震复发间隔统计特征。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　中国大陆活动断裂大震（M_S≥7.5）地震复发特征分区

Table1 Characteristic zones of recurrent intervals of large earthquake (M_S≥7.5) along active faults in mainland China

地区	断裂类型	断层活动速率(mm/a)	复发间隔（Ka）	大地震地表破裂带	断裂分段	特征地震表现	代表性断裂
青藏高原地区	走滑逆走滑	1—15	0.2—2	清楚	清楚	较显著	鲜水河断裂带、海原断裂带、小江断裂带、则木河断裂带
新疆地区	逆冲逆走滑	2—5	1—3	盲逆断层	不清楚	不清楚	天山南麓断裂带、天山北麓断裂带
鄂尔多斯周缘地堑系	正断正走滑	1—3	1—3	较清楚	较清楚	较显著	大青山山前断裂带、延怀盆地边界断裂、五台山北麓断裂
华北平原	正断正走滑	0.1—0.5	2—5	不太清楚隐伏	较差	不清楚	夏垫断裂、唐山断裂、新河断裂
郯庐断裂带	逆走滑	2—3	2—3	较清楚	较差	不清楚	

2.1　青藏区

由于青藏高原区以走滑断裂为主，沿走滑断裂发生的水平位移分布较为稳定，而垂直位移则变化较大。因此，在研究中只利用水平最大位错量和水平滑动速率来计算。如果有历史地震地表破裂的最大位错量的调查结果，则采用该值；如果没有历史地震调查结果，则采用 Wells 等（1994）的破裂长度与最大位错量的统计关系得到。

对青藏高原区内研究程度较高的 37 条断裂的 77 个断裂（段）利用滑动速率法、历史地震或古地震法及地震矩率法 3 种方法进行了计算。根据资料翔实和结果可靠程度，共获得可信度为 A 的断裂（段）18 个，可信度为 B 的断裂（段）56 个和可信度为 C 的断裂（段）3 个。

从计算结果来看，8 级以上的强震主要发生在青藏高原边缘块体边界断裂或块体内大型边界断裂上，复发间隔在 2000—3000a；7—8 级地震主要发生在青藏高原内部块体边界断裂、块体内部断裂上，复发间隔为 1000—2000a；部分走滑断裂因具有较大的走滑滑动速率，如鲜水河断裂带，因而具有＜500 年的复发间隔（图 3）。

青藏高原主边界断裂包括：阿尔金断裂带、海原断裂带、龙门山断裂带、安宁河-则木河-小江断裂带及喜马拉雅断裂带等，这类构造带除喜马拉雅构造带以逆冲运动为主外，其它均以走滑运动为主兼逆冲作用，并发生过 8 级以上的大震，比如 1920 年 8.5 级海原地震、2008 年汶川 8 级地震。另外，沿着断裂带可见古地震破裂带分布，且延伸多达 200—300km。特征地震震级为 7.5—8 级，大震复发间隔为 1000—2000a 左右；特征地震震级为 8 级以上时，其复发间隔在 3000a 以上；发生 7.5 级以下地震特征地震为 500a 左右，局部段落可能会更小。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

青藏高原内部块体边界断裂主要有：东昆仑断裂带、甘孜-玉树断裂带、鲜水河断裂带等，其主要表现为走滑运动，主要发生过 7—8 级地震。其中，7—7.5 级特征地震复发间隔为 500—1000a；而部分滑动速率较大者则小于 500a。发生 7.5—8 级特征地震的复发间隔一般为 2000a；但部分滑动速率较大者为 1000a 左右。

青藏高原块体内部断裂普遍发生过 7—7.5 级地震，部分超过 7.5 级地震，一般不超过 8 级地震。该类断裂带的滑动速率较小，大多以正断或正走滑作用为主。估计其复发间隔约为 1000—2000a。

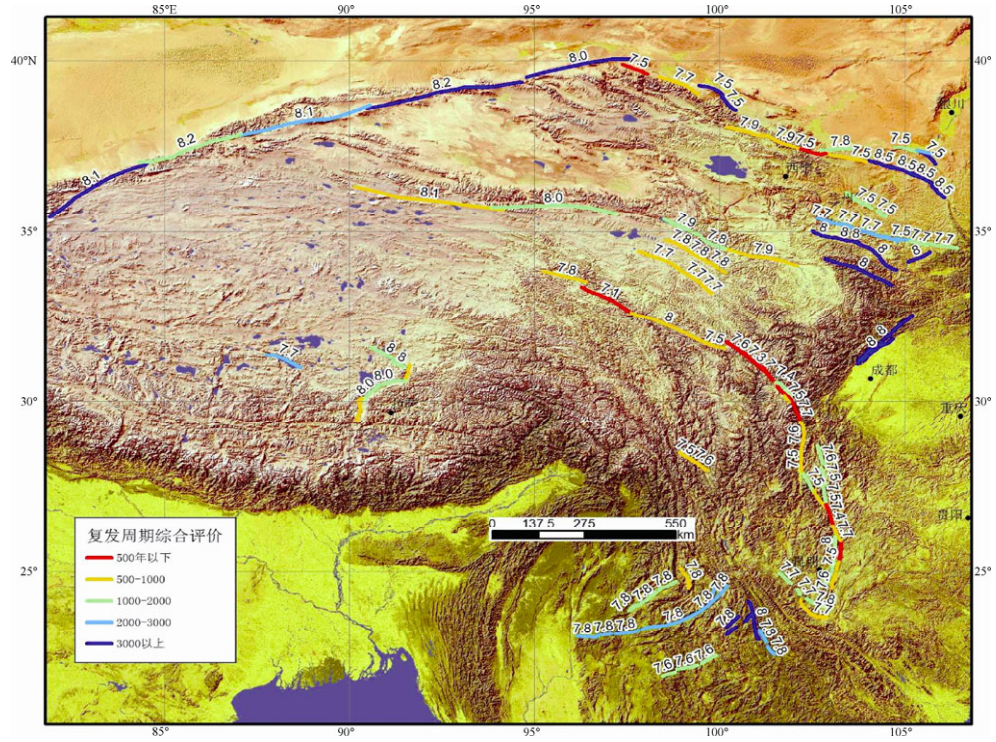

图 3 青藏区活动断裂大震复发间隔分布

Fig. 3. Recurrent intervals distribution of large earthquake along active faults in Qinghai-Tibetan region

2.2 华北区

对华北构造区内研究程度较高的 58 条断裂的 118 个断裂（段）利用滑动速率法、历史地震或古地震法及地震矩率法 3 种方法进行了计算。根据资料翔实和结果可靠程度，共获得可信度为 A 的断裂（段）29 个，可信度为 B 的断裂（段）75 个和可信度为 C 的断裂（段）44 个。

从计算结果来看，由于华北地区滑动速率较低，与青藏高原地区相比复发间隔总体较长，8 级以上的强震主要发生在郯庐断裂带和华山山前断裂，复发间隔在 4000a 以上；7.5—8 级地震主要发生在鄂尔多斯周缘断裂，复发间隔为 3000a 左右；7—7.5 级地震复发间隔为 2000—3000a 左右（图 4）。

鄂尔多斯周缘断裂主要包括：大青山山前断裂、色尔腾山山前断裂、霍山山前断裂、华山山前断裂、秦岭北缘断裂等。这类断裂均以正断为主兼走滑运动，垂直滑动速率在 1mm/a

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

左右。特征地震震级为 8 级以上，其复发间隔在 4000a 以上；特征地震震级为 7.5—8 级，其复发间隔为 3200±1300a 左右；特征地震震级为 7.5 级以下，其复发间隔为 2300±1200a 左右。

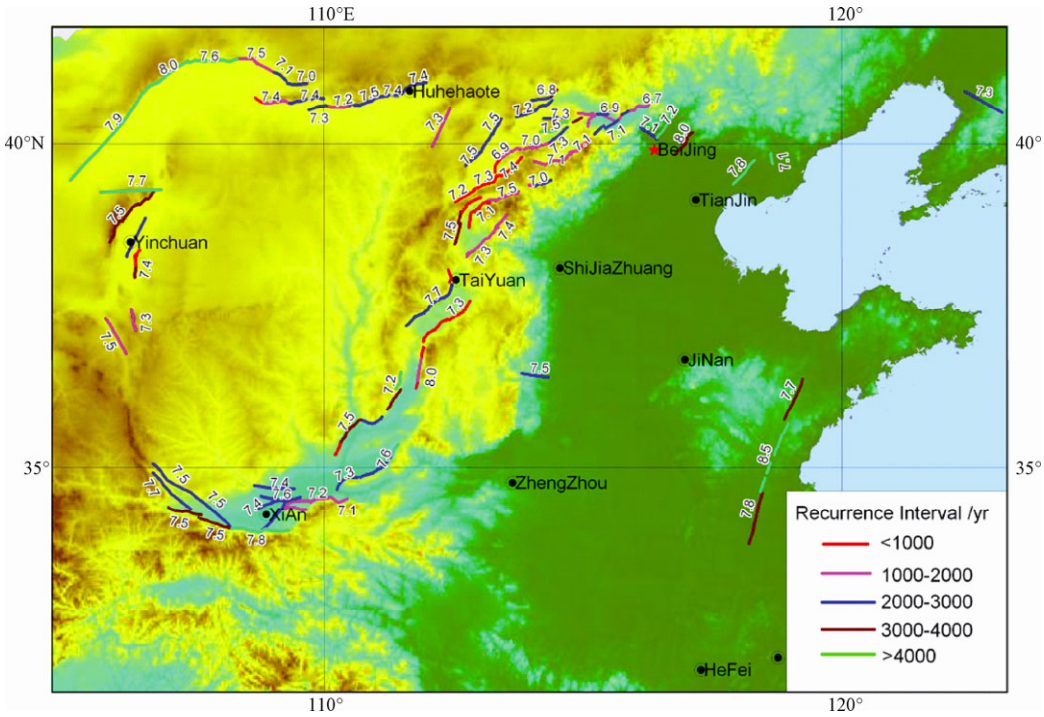

图 4　华北区活动断裂大震复发间隔分布

Fig. 4　Recurrent intervals distribution of large earthquake along active faults in Northern China region

华北平原地震带断裂主要包括：夏垫断裂、唐山断裂、南口-孙河断裂、黄庄-高丽营断裂、磁县-大名断裂、滦县-乐亭断裂等。其主要表现为正走滑性质，滑动速率较低，在 0.5mm/a 以下。7—7.5 级特征地震的复发间隔为 3500±2000a；7.5—8 级特征地震的复发间隔一般为 4000a 左右。

郯庐地震带断裂的滑动速率较小，一般在 0.38mm/a 左右，以走滑作用为主，历史上发生过 8.5 级大地震。其中，7—7.5 级特征地震的复发间隔为 2900±600a；8.5 级特征地震的复发间隔约 4800a 左右。

2.3　新疆区

对新疆区内研究程度较高的 20 条断裂的 35 个断裂（段）利用滑动速率法、历史地震或古地震法及地震矩率法 3 种方法进行了计算。根据资料翔实和结果可靠程度，共获得可信度为 A 的断裂（段）4 个，可信度为 B 的断裂（段）26 个和可信度为 C 的断裂（段）5 个。

从计算结果来看，8 级以上的强震主要发生在块体内边界断裂上，复发间隔在 1500—3000a；7—8 级地震也主要发生在块体内部边界断裂上，复发间隔为 1500—5000a（图 5）。

新疆区以逆冲型断裂为主，已知该类型的断裂约占总数的 3/4，走滑断裂约占 1/4，且断裂的复发间隔分区特征明显，主要表现为：①阿尔泰地震带，走滑断裂的复发间隔为 600—2500a 或 1750±1060a，逆断与逆走滑型的断裂复发间隔为 1500—2500a 或 1750±350a；②

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

天山地震带，走滑断裂的复发间隔为 500—3000a 或 1500±1100a，逆断及逆断复合走滑型的断裂复发间隔为 1500—8000a 或 3500±1800a。

该区的断裂大震复发间隔大体上自北向南逐渐递减，这和该区地壳变形速率/断层滑动速率的梯度变化规律一致。

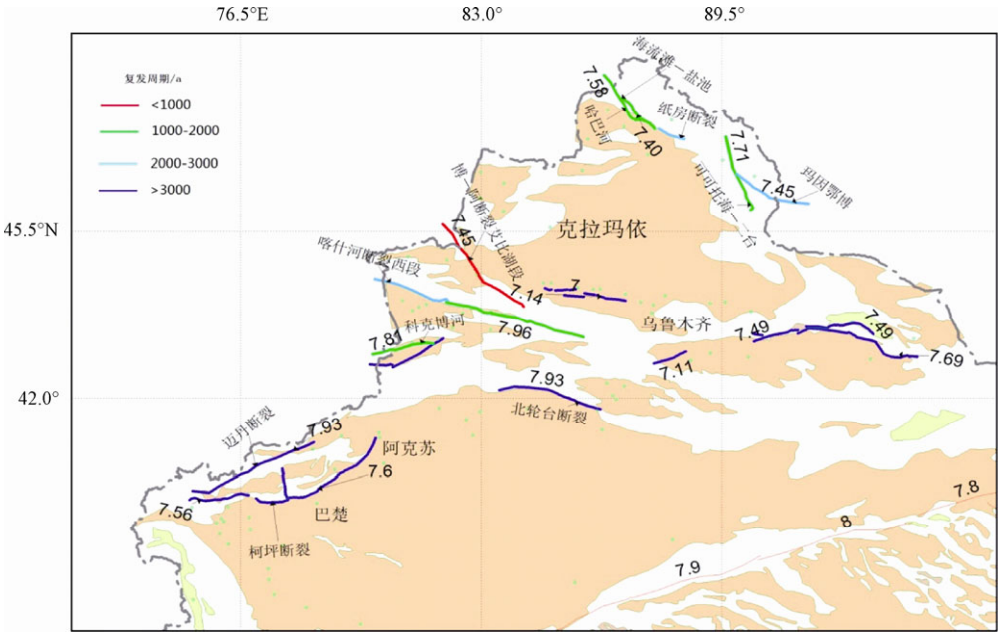

图 5 新疆区活动断裂大震复发间隔分布

Fig. 5 Recurrent intervals distribution of large earthquake along active faults in Xinjiang region

3 讨论和结论

本文汇编了中国大陆 130 条活动断裂（共计 243 个活动断裂（段））的定量资料数据库，根据活动断裂的研究程度做了可靠性评估，并利用 4 种方法评估了这些断裂（段）的大震复发间隔，分区统计了大震复发间隔的空间分布特征。上述研究对于大地震的危险性分析、实现抗倒塌的目标具有现实意义。

构造环境对大地震的复发行为以及发生率具有重要影响，主要体现在区内断裂的活动类型和活动强度上，分别体现了应变能聚集释放的方式和速度。研究结果表明，青藏高原活动断裂 M7.5 级以上大震复发间隔远小于华北和新疆。例如，青藏高原大震复发间隔从数 100a 到 2000a，而华北和新疆则从 2000a 到 5000a。其次，大震复发间隔与断层滑动速率成反比，边界断裂的大震复发间隔通常比块体内部断裂短，比例关系大体为 1∶1.5—2.0。还有，大震复发间隔与断裂性质相关，走滑断层的复发间隔小于逆走滑断层，逆走滑断层小于逆断层，比例关系大体为 1:1.5—2.5。

华北区所有已知特征震级为 M_S≥7.0 的活动断裂，其年发生率之和为 0.043，也就是说，7 级以上地震约 23a 发生 1 次。根据华北区历史地震目录，自 1830 年以来，该区共发生了 5 次 7 级以上地震，粗略估计为 36a 左右 1 次，这与活动断裂定量参数所得结果有一定差异。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

当然，这一结果仅是根据几十个已有研究的活动断裂（段）定量参数估计出来的结果，更多的活动断层并未参与统计。

显然，限于研究水平和我国的财政支出能力，还有更多的活动断裂还不能有效获取其定量地质资料。因此，通过现有定量数据的汇编成果和大震复发间隔估计以及统计结果，本文给出了我国大地震发生的空间分布特征，上述研究既可作为地震危险性分析的重要参数，又可作为构造类比研究的参考信息以及大震危险性估计的重要依据。

参考文献

邓起东，闻学泽，2008．活动构造研究——历史、进展与建议．地震地质，**30**（1）：1—30.

高孟潭，卢寿德，2006．关于下一代地震区划图编制原则与关键技术的初步探讨．震灾防御技术，**1**（1）：1—6.

荆燕，任金卫，2004. 利用活断层资料模拟中国大陆及其邻区晚第四纪地壳变形场．地震地质，**26**（1）：71—90.

任俊杰，张世民，冉洪流，2008．活断层定量资料在大震年发生率评定中的应用．震灾防御技术，**3**（3）：282—291.

谢富仁，张永庆，张效亮，2008．汶川 M_S8.0 级地震发震构造大震复发间隔估算．震灾防御技术，**3**（4）：337—344.

张永庆，谢富仁，2007．活动断裂地震危险性的研究现状和展望．震灾防御技术，**2**（1）：64—74.

Basili R., Valensise G., Vannoli P., Burrato P., Fracassi U., Mariano S., Tiberti M.M., Boschi E., 2008. The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology, Tectonophysics, doi: 10.1016/j.tecto.2007.04.014.

Frankel A., Mueller C., Barnhard T. et al., 1995. National Seismic Hazard Maps: Documentation June 1996. U.S. Geological Survey Open-File Report 96-532, Denver: U.S. Geological Survey, 1—110.

Frankel A., Petersen M., Mueller C. et al., 2002. Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps. Open-file Report 02-420, Washington DC: U.S. Geological Survey, 2—31.

Petersen M.D., Frankel A.D., Harmsen S.C. et al., 2008. Documentation for the 2008 Update of the United States.

Schwartz D.P. and Coppersmith K.J., 1984. Fault behavior and characteristic earthquakes examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. Journal of Geophysical Research, **89**: 5681—5698.

Shimazaki K. and Nakata T., 1980. Time-predictable recurrence of large earthquake. Geophys. Res. Lett., （7）：279—282.

Wells D.L. and Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Seismological Society of America Bulletin, **84** (4): 974—1002.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Large Earthquake Recurrent Intervals along Active Faults in Mainland China

Xie Furen[1)], Zhang Shimin[1)], Zhang Yongqing[1)], Ren Junjie[1)], Zhang Xiaoliang[2)] and Ran Hongliu[3)]

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China
2) China Earthquake Disaster Prevention Center, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China
3) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Bijing 100029, China

Abstract By recompiling quantitative parameters database, we reassessed the large earthquake recurrent intervals along active faults in mainland China. We also obtained the large earthquake intervals distribution characteristics of active faults in Qinghai-Tibetan, Xinjiang and Northern China. The results show that the recurrent intervals of M_S7.5 earthquake along active faults in Qinghai-Tibetan that is about several hundreds to 2000 years are much smaller than that of 2000 to 5000 years in Northern China and Xinjiang. The earthquake recurrent intervals are inversely proportional to the slip rate of faults. Generally, the large earthquake recurrent intervals of boundary faults are smaller than that of the faults within blocks, with a proportion about 1:1.5 to 2.0. The large earthquake recurrent intervals are also related to the type of faults, for example, strike slip faults have smaller recurrent intervals than that of reverse-strike slip faults, and reverse-strike slip faults have smaller recurrent intervals than that of reverse faults, with a proportion about 1:1.5 to 2.5. The recompiled quantitative parameter database may provide useful references not only for seismic hazard analysis, but also for the tectonic background study.

Key words: Active faults; Quantitative parameters; Large earthquake; Recurrent intervals; Mainland China

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net