

邵博、沈军、李莹甄等,2015,综合石油地质、历史地震等资料评估吉林孤店隐伏断裂的地震危险性,中国地震,31(4), 668~678。

综合石油地质、历史地震等资料评估 吉林孤店隐伏断裂的地震危险性

邵博¹⁾ 沈军¹⁾ 李莹甄¹⁾ 于晓辉^{1,2)}
戴训也¹⁾ 袁俊枫¹⁾ 尉洋³⁾

1) 防灾科技学院,河北省三河燕郊开发区学院街 065201

2) 中国地震局地质研究所,北京 100029

3) 中国地震局兰州地震研究所,兰州 730000

摘要 在对松原地区开展的活断裂探测工作中发现了一条晚更新世活动断裂,称之为孤店断裂。本文通过三维地震资料获得了孤店隐伏活动断裂的地下细部结构,在对其地质构造、第四纪活动性、历史地震记录及地震活动性等进行综合研究的基础上,采用石油物探三维地震资料获得的基岩破裂长度进行经验关系拟合,对其潜在地震最大震级进行了评估,评估结果认为其约为 $M_w 7$ 。此外,采用地震矩方法获得复发周期、年发生率等定量参数,利用中国大陆古地震复发概率模型估算出孤店断裂未来 50~200a 的大地震发生概率。

关键词: 城市活断层探测 隐伏活断层 发震概率 复发周期

[文章编号] 1001-4683(2015)04-0668-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

活断层的地震危险性评价是活动断层探测的目的之一。Tocher(1958)最早将震级与地震地表破裂长度相联系,Anderson等(1996)开始在震级-地表破裂关系中考虑发震断裂的滑动速率,此后很多研究者(Wells et al,1994;闻学泽,1995;龙锋等,2006,入仓孝次郎等,2000;Mohammadioun et al,2001;冉洪流等,2004)使用了多学科的手段以地表破裂约束震源,并提出了适合于特定范围的经验关系式。对于中国西部地表出露的活动断裂,常常可根据活动断裂(段)的规模判断其发震能力。但是,由于中国东部许多活动断裂(段)是隐伏的,虽然发生了 7 级左右,甚至更大的地震,地表却没有留下与其震级“相称”的地震断层。如 1976

[收稿日期] 2015-07-27; [修定日期] 2015-08-27

[项目类别] 中央高校基本科研业务费研究生科技创新基金项目(ZY20150303)、国家国际科技合作专项项目(2012DFR20440)、财政部重大专项“中国地震重点监视防御区活动断层地震危险性评价”、中国地震局教师基金(2012001)及中央高校基本科研业务费专项资金创新团队资助计划项目(20120102)共同资助

[作者简介] 邵博,男,1992年生,在读硕士研究生,主要从事活动构造解析及地震危险性评价方面研究。

E-mail: 632975575@qq.com

沈军,通讯作者,研究员。E-mail:shenjuneq@qq.com

年唐山 7.8 级地震和 1679 年三河-平谷 8 级地震,地表破裂只有 10km 左右;1937 年菏泽 7 级、1975 年海城 7.3 级、1830 年磁县 7.5 级、1966 年邢台 6.8 级及 7.2 级等地震除了地裂缝之外,地表也未出露明显的地震断层。但是,余震的分布和深部探测的结果显示深部存在与其震级相应的发震构造。

2012~2014 年笔者在进行松原市活断层探测与地震危险性评价项目时发现了一条隐伏活动断裂带,将其称为孤店断裂,并利用吉林油田提供的三维物探资料获得其空间展布。三维地震剖面显示孤店断裂为逆断层,并且是在早期正断层的基础上,构造运动反转而变为逆断层的;在三维物探资料的基础上布置了浅层地震探测和联合钻孔剖面探测,证实其属于晚更新世活动断裂。孤店断裂恰位于 1119 年前郭 6 $\frac{3}{4}$ 级地震等震线的中央,笔者研究认为该断裂很可能是此次地震的发震构造^①,也很可能是东北富含石油的松辽盆地内的一条重要的发震构造,因此准确合理地评价该断裂的地震危险性很有必要。

从空间位置上看,孤店断裂位于 NE 向的扶余-肇东断裂中段,是该断裂带中活动性最强的一条断裂,扶余-肇东断裂带的西南段于 2006 年 3 月 31 日和 2013 年 10~11 月发生了一系列 5 级地震,在其东北向的松原市有密集的小地震,而孤店断裂的连续性和活动性都比这 2 个地点强,显示它发震的能力可能比较大。

本文利用吉林油田提供的丰富的石油物探资料,得到孤店隐伏断裂的清晰结构,通过地下破裂参数拟合方法,定量评价了该断层的潜在发震能力,并选择时间相依的概率模型,对未来发震概率进行了评估。

1 孤店断裂地震危险性的定性评价

孤店断裂是松原市活断层探测与地震危险评价项目的目标断层之一(图 1)。对于孤店断裂,地震部门对其的研究很少,但石油部门开展过很多工作,得到了大量相关地震勘探资料。前人认为,盆地内构造成带出现,绝大多数构造是后生的,其构造定型时期大都是晚白垩世嫩江期末至早白垩世明水期末这段时期。由于孤店断裂总体走向与现代构造应力场主压应力方向垂直,断层面又向东倾,在 EW 向挤压应力作用下,早期正断层反转上冲,由于基岩正断层距很大,故仍保持其正断层性质,而断层上部则表现为逆断层(石国平等,1985;王莉等,1998;李天仁等,2010;付宪弟等,2010)。

在本研究中,我们收集了吉林油田提供的三维物探 T04(相当于 K_1n 嫩江组四段底面反射)、T1(相当于 K_1n 嫩江组一段底面反射)、T2(相当于 K_1n 嫩江组一段底面反射)反射层和 14 个二维物探剖面(图 2)。通过对三维地震反射剖面的解译认为,该断裂位于松原市西南,总体呈 SN 走向,向西凸出的弧形,在三维物探剖面上总长度约为 66km,这反映了孤店断裂在覆盖层以下的基岩面上的破裂尺度。

1.1 孤店断裂的结构特征和地球动力学背景

扶余-肇东断裂是松辽盆地内一条重要的发震断裂(付宪弟等,2010),从北到南分别由 NE 向大洼-薄荷台断裂、穿过松原市区的 EW 向扶余北断裂、孤店断裂以及 NE 向查干花断裂组成,其中查干花断裂于 2006 年 3 月 31 日和 2013 年 10~11 月发生了一系列 5 级地震,

^① 邵博等,2014,松原市断层活动性鉴定与地震危险性评价专题报告

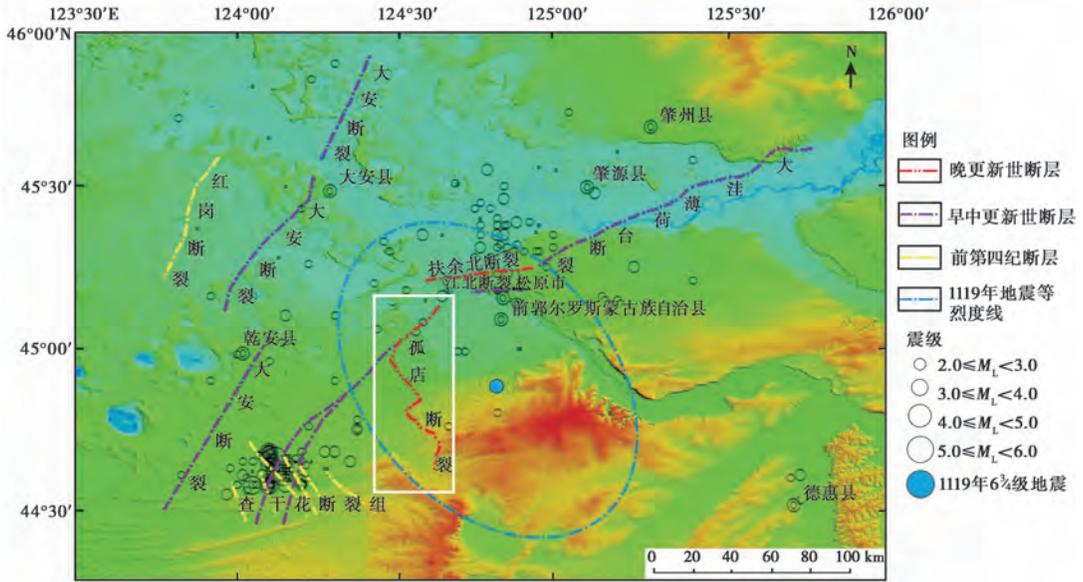


图1 区域主要断裂及地震分布

大安断裂、红岗断裂的活动性来自前人资料(王有功等,2014),其余断裂的活动性据松原市城市活断层探测结果^①;1119年前郭地震等震线位置据吴戈等(1988);白线框内为图2所示区域

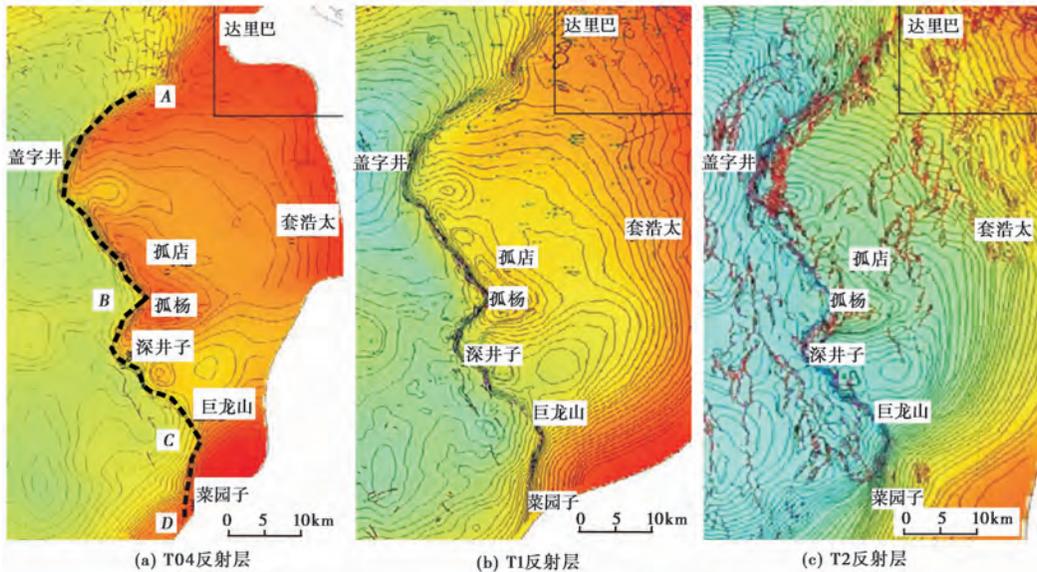


图2 孤店断裂三维地震反射平面图

(a)相当于K_{1n}嫩江组四段底面反射,(b)相当于K_{1n}嫩江组一段底面反射,(c)相当于K_{1q}青山口组底面反射;冷色为凹陷区,暖色为隆起区;等值线密集处为坡度陡变带

扶余北断裂2003年以来也频繁发生密集的小震活动。

孤店断裂带位于松辽盆地中央拗陷区扶余凸起西翼,该断裂自达里巴经盖子井东、孤

杨、深井子,直至巨龙山南展布。断裂总体呈向西突出的弧形,倾向 E,长 66km(付宪弟等,2010)。沿该断裂走向,断层结构出现变化,断裂北段在达里巴和盖子井东之间连续性较差。在断层中段盖子井至孤杨段连续性较好,表现为三维地震反射平面图中的清晰陡变带,在孤杨至巨龙山段表现为一个规模较小的弧形断裂。

综合对东北地区深浅部构造和地球动力学背景的认识^②发现,新近纪以来,东北地区一方面受西伯利亚南突弧向东挤压作用(杨纪林,2011),另一方面其东边由于日本海盆封闭,扩张的侧向挤压作用消失,因而主要受太平洋板块往北西西俯冲的推挡,以及俯冲板块破裂和消减所伴随、诱导和形成的深部作用,水平挤压作用较弱(赵文峰,1989;高立新,2001)。所以区域内构造应力场基本为 NEE-SWW 向以及近 EW 向两组应力的叠加,深部中强地震发生的动力来源于西北太平洋板块向珲春-牡丹江地区上地幔内 590km 深处俯冲,并消减于这一带。板块的俯冲受到地幔内岩体的阻挡,在岩块内产生俯冲断层且在东北发生深源地震(孙文斌等,2004)。松辽盆地是东北地区重要的地震活动区域,具备发生 6~7 级地震的条件;NE 向的扶余-肇东断裂是松辽盆地内的主要发震构造;区域动力学环境及震源机制解表明,NE 向断裂现今活动性质为逆冲。

1.2 孤店断裂及邻区的地震活动特征

根据吉林省区域地震台网的观测资料,自 1970~2014 年 7 月,本区共记录到 $M_L \geq 1.0$ 地震 248 次(图 1), $3.0 \leq M_L \leq 3.9$ 地震 3 次。研究区有 5 个小震震源深度的记录,深度为 9~14km。地震活动主要集中于扶余-肇东断裂查干花段和扶余北断裂段,孤店断裂现代地震活动水平较低。

1.3 孤店断裂与 1119 年 6 $\frac{3}{4}$ 级地震的关系

对于 1119 年 6 $\frac{3}{4}$ 级地震震中,前人主要有 2 种观点:一种认为在卡拉木附近,发震构造为第二松花江断裂;另一种认为在套浩太附近,发震构造为龙坑断裂。本次活断层探测对 1119 年 6 $\frac{3}{4}$ 级地震进行了专门研究,针对等震线(吴戈等,1988)范围内的所有可能的疑似活动构造进行了排查,通过针对龙坑断裂和第二松花江断裂的石油物探、浅层物探以及联排钻孔探测和解译,发现深部都没有断裂存在。

同时开展的浅层地震勘探及联合钻孔探测揭示了孤店断裂晚更新世以来的活动证据,且孤店断裂位于地震破坏区几何中心附近(图 1),是等震线范围内唯一具有接近 7 级地震发震能力的活动构造。李传友等(1999)分析构造应力场后认为,发震构造走向为 NW 向或 NE 向,这也与孤店断裂各分段的走向一致。故孤店断裂是 1119 年 6 $\frac{3}{4}$ 级地震最有可能的发震断裂。

2 孤店断裂地震危险性的定量评价

2.1 孤店断裂的活动性

孤店断裂的活动性鉴定表明^③,孤店断裂在深井子测线显示为一条倾向东、上陡下缓的逆断层。断裂切穿 T02 反射层,相当于上白垩统明水组顶面反射(图 2、3)。经过与钻探揭

② 李莹甄等,2014,松原市地震活动性与危险性分析专题报告

③ 中国地震局地球物理勘探中心,2014,松原市目标断层浅层地震勘探专题报告

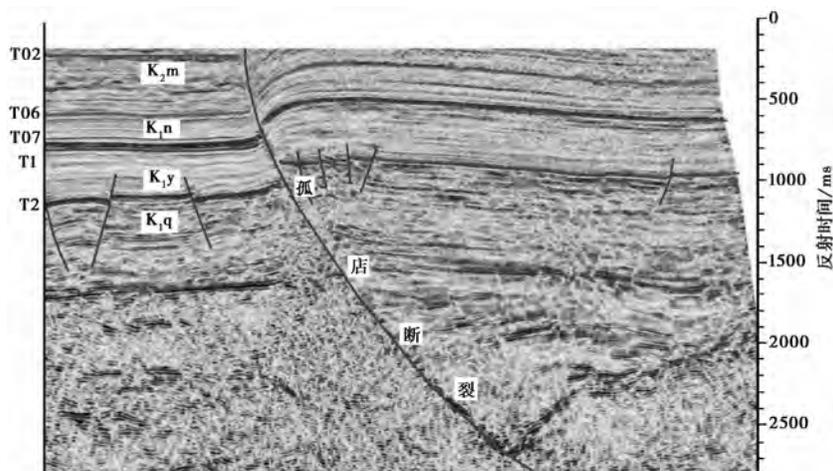


图3 孤店 L1200 测线解译剖面

断裂切穿 T02 反射层;K_{2,m}-上白垩统明水组;K_{1,n}-下白垩统嫩江组;K_{1,y}-下白垩统姚家组;K_{1,q}-下白垩统青山口组

示的地层进行对比^④认为,上断点埋深约 24m,该深度的地层年代为晚更新世。

2.2 隐伏活断层潜在震级估计方法的探讨

孤店断裂位于新构造运动微弱的东北地区,属于弱活动的非全新世断层。根据《中国地震活动断层探测技术系统技术规程》(中国地震局,2005)的要求,此类断层潜在地震的最大震级无法采用震级-地表破裂长度经验关系估计,而应参考以下 3 种方法综合评估:①震级-地表同震位错经验关系中同震位错最小或趋于最小值时对应的震级范围;②工作区及邻区相同构造环境地区中规模相同的同类断层的历史地震最大震级;③由目标区或工作区历史及现今地震的震级-频度关系外推。在以上 3 种方法中,第 1 种震级-地表同震位错经验关系很难得到(陈宇坤等,2010);第 3 种方法在东部地区城市活断层探测中应用较广,如采用闻学泽等(2007)利用现代台网与历史地震资料对于华北、华中-华东、华南与东南沿海等 3 大区域建立的各断层小区的长期震级-频度关系,进而对断层潜在最大震级和活动性参数 a/b 进行经验拟合。但由于东北地区固有的地震活动较弱、复发间隔较长的特性以及松原市地震目录完整性较差的背景,试验发现该方法很难获得可靠结果。

在东部地区的潜在震级估计中,陈达生(1984)、宋龙伯等(1987)、叶文华等(1996)、龙锋等(2006)、冉洪流(2009)等对不同区域范围、不同类型地震造成的地表破裂的下限震级进行了估计,利用这些方法得到的潜在震级应是较为可靠的结果,且在活断层探测和工程地震安全性评价中被广泛应用。

入倉次郎等(2000)系统总结了全球范围现代地震矩 M_0 与地震时地表断层同震位移 D 的经验关系(图 4)。根据这一关系,伴有地表断层位错的最小地震矩为 $M_0 = 3.162 \times 10^{24} \text{ dyn} \cdot \text{cm}$ 。

由 Hanks 等(1979)提出的关系式

$$\log M_0 = \frac{3}{2} M_w + 16.05 \quad (1)$$

④ 吉林建筑工程学院勘探中心,2013,松原活断层联合钻孔剖面探测专题报告

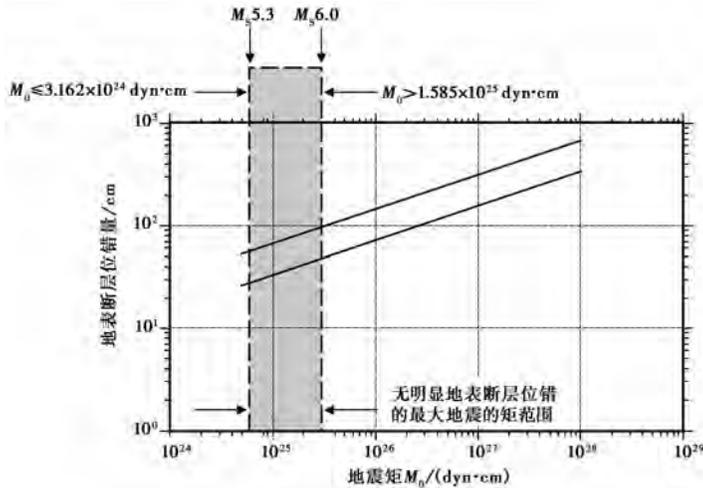


图4 入仓-三宅经验关系

以及地震矩与面波震级的经验关系式(冉洪流,2009)

$$\log M_0 = M_s + 19.2 \quad (2)$$

可知,在统计意义上,东北地区震级小于 $M_w 5.6$ 或 $M_s 5.3$ 地震不会伴有地表断层的同震错动。考虑到在地表流水侵蚀严重的地区,即使沿断层的地表迹线产生小于 25cm 的位错,也很不容易保存和积累下来,故可估计相应的震级为 $M_s 6.0$ 。显然,对于发生过 1119 年 $6\frac{3}{4}$ 级地震的松原地区,这种评价方法的结果是偏低的。

考虑到东部平原深隐伏区地震地表破裂因受上覆层厚度不同的影响,导致地表位错尺度变化的因素比较复杂,在同样无地表破裂的情况下,覆盖层较厚的东北地区可能发生过更大震级的地震。这一结果同时说明,基岩破裂尺度是对地下实际破裂尺度的一种逼近估计,其成因较复杂,除与震级相关外,还与其他震源参数、覆盖层厚度(Jonathan et al, 1994)、覆盖土层力学参数(刘守华等,2005; Anastasopoulos et al, 2007)、地下水位等有关。考虑到三维物探资料反映的基岩破裂尺度不受覆盖层的影响,故可将三维反射剖面上量取的破裂长度代入震源破裂长度-震级的经验关系式中,以估计其发震规模。

2.3 潜在最大震级估计

Wells 等(1994)基于大量样本数建立了全球不同类型地震断层的震源参数数据库,数据主要来源于公开发表的野外考察、地震学研究、地震学调查等方面的专著和论文,他们从数据库中挑选部分地震来确定震级和不同震源参数之间的经验关系。其中,地下震源破裂长度 AD 与矩震级 M_w 间的经验关系及其建模样本如图 5 所示。根据陈永前等(2014)对该经验关系统计置信度和参数相关关系的研究,使用震源破裂参数拟合法估计中国大陆地震震级的参数相关系数为 0.94~0.96,能够较好地拟合中国大陆潜在的地震能力,同时这种方法内也蕴含一定的地质意义。

孤店断裂盖子井东至孤杨段(图 2(a)中 AB 段)的地下破裂长度为 28.5km,利用 Wells 等(1994)经验拟合公式(图 5)估计,潜在地震的最大震级为 $M_w 6.55$;孤杨至巨龙山段(图 2(a)中 BC 段)的地下破裂长度为 19.5km,潜在地震的最大震级为 $M_w 6.3$;巨龙山以南段

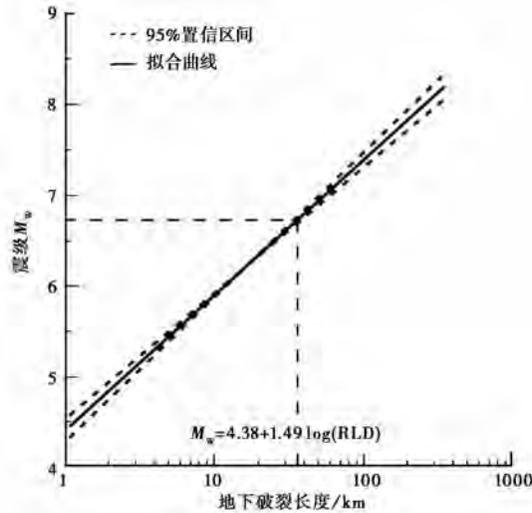


图5 根据震源破裂长度预测断层的最大发震能力
经验关系据 Wells 等(1994)

(图2(a)中CD段)长度为18km,潜在地震的最大震级为 M_w 6.25。考虑3段同时破裂的可能,利用Hanks等(1979)提出的地震矩与矩震级间的转换关系(式(1))分别计算3个地震的地震矩并求和,计算得到同时破裂的潜在最大矩震级为 M_w 6.72。分段破裂的依据主要是孤店断裂的几何形态为逆冲断裂的弧形破裂组合以及三维物探资料所反映的孤店断裂在巨龙山附近的不连续性。

需要说明的是,如果总长度66km的孤店断裂整体发生贯穿性破裂,则潜在地震的最大震级为 M_w 7.1。但根据活断层探测过程中专家组对于综合区域发震能力及断裂几何学的认识,同时考虑到未在孤店断裂上发现地表破裂,故分段破裂可能是概率更高的结果,因此在本文中我们主要以这种破裂组合进行研究。

2.4 复发间隔

断层地震危险性分析所需的危险性参数中最重要的是复发间隔 T 或年发生率 λ ,且有 $\lambda = \frac{1}{T}$ (闻学泽,1995)。

断层(段)的最大潜在地震的平均复发间隔可由该潜在地震的地震矩 M_0 与相对危险段地震矩累积率 \dot{M}_0 的比率估算(冉洪流,2006),即

$$T = \frac{M_0}{\dot{M}_0} \quad (3)$$

其中,由式(1)得到地震矩 $M_0 = 1.3 \times 10^{25} \text{ dyn} \cdot \text{cm}$;地震矩累积率 \dot{M}_0 可由下式得到

$$\dot{M}_0 = \mu AS \quad (4)$$

式中, μ 为剪切模量; A 为破裂面积; S 为滑动速率。

另据Wells等(1994)给出的矩震级 M_w -破裂面积的经验关系

$$\lg RA = -3.49 + 0.91M_w \quad (5)$$

式中, M_w 为矩震级; RA 为破裂面积(单位: km^2); 由式(5)得到孤店断裂最大震级 M_w 为 6.72 的地下破裂面积 $RA = 418.09\text{km}^2$ 。

邓起东等(2002)的研究结果为,海城断裂全新世以来断层的垂直滑动速率为 0.1mm/a , 金州断裂的为 $0.1\sim 1.0\text{mm/a}$, 故可推定东北地区晚更新世或全新世以来断层的垂直滑动速率为 $0.1\sim 1.0\text{mm/a}$ 量级。根据断层活动性鉴定的结果,考虑到孤店断层的活动时代、东北各区域地震活动水平的差异、由钻孔工作得到的 Q_3 马兰黄土底界对应层 9m 的变形程度以及钻孔中对应的粉砂、粉土样品光释光(OSL)年龄为 50ka (因采用细粒石英测年方法,实际年龄可能大于 5ka)等,我们计算中将孤店断层的滑动速率设定为 0.2mm/a 。

根据上述给出的孤店断层滑动速率和破裂面积,由式(3)得到孤店断层 $M_w 6.72$ 破坏性地震的复发间隔为 2591a , 年发生率为 3.85×10^{-4} 。

2.5 地震概率模型与发震概率

目前,常用的活动断裂地震危险性估计的概率模型有泊松模型、对数正态模型、时间相依的概率模型等(冉洪流, 2006; 张永庆等, 2007)。

由于可把 1119 年 $6\frac{3}{4}$ 级地震看做孤店断层的特征地震,又由于在孤店断裂上可以获得离逝时间参数(上一次地震事件至今),故可以应用时间可预报模型(通常为对数正态分布)进行概率性地震危险性计算。地震的发生是在一定的构造运动速率下,应变能随时间积累至极限状态的结果(张培震等, 1996)。根据冉洪流(2006)的研究,当离逝时间接近断裂特征地震的复发周期时,采取时间相依的概率模型的结果显著好于泊松模型,前者可能是一种更准确的结果。

Nishenko 等(1987)整理了环太平洋板缘地震带不同段落“特征地震”的复发时间资料,构建了适用于板缘强地震活动带的通用概率模型,简称 NB 模型。NB 模型对数正态分布的拟合效果较好,其概率密度分布函数为

$$f(T) = \frac{T_{ave}}{T\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}\left(\ln\frac{T}{T_{ave}} - \mu\right)^2\right] \quad (6)$$

其中 T 为实际复发间隔, T_{ave} 为平均复发间隔。对于中国大陆内部所有的活动断裂,由最大似然法估计出平均值 $\mu = -0.1206$, 标准差 $\sigma = 0.5054$ (张培震等, 1996)。

利用上述的活动大陆内部地震复发的通用概率密度分布,在已知地震平均复发间隔和最近一次地震至今离逝时间的条件下就可计算出不同活动断裂(段)的地震危险性概率。

本文根据闻学泽(1995)的“时间相依”的地震复发概率方法。假设已知某个震源或断裂段特征地震之间复发时间间隔 T 具有某种连续型的概率分布,其概率密度函数为 $f(T)$, 并设上一次地震发生以来,时间已消逝的长度为 T_e ; 事件 $A\{T \leq T_e\}$ 表示下一次地震在 $[0, T_e + \Delta T]$ 区间内发生,事件 $B\{T > T_e\}$ 表示下一次地震在 $[0, T_e]$ 区间没有发生。那么,事件 A、B 的概率分别为

$$P\{A\} = P\{T \leq T_e + \Delta T\} = \int_0^{T_e + \Delta T} f(T) dT \quad (7)$$

$$P\{B\} = P\{T > T_e\} = \int_{T_e}^{\infty} f(T) dT = 1 - \int_0^{T_e} f(T) dT \quad (8)$$

进而可以得到在事件 B 已经发生的条件下,事件 A 在未来时间区间 $[T_e, T_e + \Delta T]$ 内发生的条件概率

$$P\{A|B\} = \frac{P\{A|B\}}{P\{B\}} = \frac{\int_0^{T_e + \Delta T} f(T) dT - \int_0^{T_e} f(T) dT}{1 - \int_0^{T_e} f(T) dT} \quad (9)$$

利用式(7)、(8)、(9)进行计算,可得到孤店断裂 50~200a 的强地震复发概率(表 1)。

3 结论与讨论

3.1 结论

通过基岩破裂参数拟合等多种方

法的对比评估,综合考虑松原地区的背景地震活动水平、资料的可靠程度和研究深度以及所得结果的不确定性等,认为孤店晚更新世活断层的潜在地震最大震级的估值为 $M_w 6.72$ 。此外,采用地震矩方法获得复发周期、年发生率等定量参数,假定孤店断裂为 1119 年 $6\frac{3}{4}$ 级地震的发震构造,利用时间相依的概率模型估算出该断裂未来 50~200a 发震概率。

研究认为,孤店断裂是继闵伟等(2011)确认依兰伊通断裂全新世活动以来,东北地区确定的另一条具有 7 级左右地震活动能力的晚更新世活动断层。

3.2 讨论

本文中根据三维物探资料获得的最大震级与前人对于该区域潜在发震能力的评估相符,也符合松原地区 1119 年发生接近 7 级地震的历史背景,而以震级-地表破裂关系下限方法估计的结果则偏小。这是因为,地表破裂尺度是对震源实际破裂尺度的一种逼近估计,其成因较地下破裂复杂,除与震级相关外,还与其他震源参数、覆盖层厚度、覆盖土层力学参数、地下水位等有关,故对于平原区隐伏弱活动断层,基岩破裂尺度能够更好地反映断层发震能力。特别是在三维物探资料丰富的采油区,可以比较准确地获得基岩破裂尺度,这种估计方法较为适宜。

致谢: 本文基于松原市活断层探测项目,文中三维物探资料由吉林油田提供,光释光测年由山东省地震工程研究院释光实验室完成;成文过程中得到了汪一鹏研究员、杨主恩研究员的悉心指导,感谢其他为本文作出贡献的项目组成员,同时也感谢审稿人对本文提出宝贵修改意见。

参考文献

- 陈达生,1984,地震引起的地表破裂长度与震级之间的经验关系,华北地震科学,2(2),26~32。
 陈宇坤、刘芳、袁盾等,2010,天津地区隐伏断裂地震危险性定量评价,地震地质,32(1),138~149。
 邓起东、张培震、冉勇康等,2002,中国活动构造基本特征,中国科学:D辑,32(12),1020~1030。
 付宪弟、马世忠、孙雨等,2010,松辽盆地南部孤店断层活动性分析及其控藏作用,大庆石油学院学报,34(2),21~25,123~124。
 高立新,2001,中国东北地区地震活动的动力背景及其时空特征分析,地震,31(1),41~51。
 李天仁、付宪弟,2010,松辽盆地南部孤店逆断层活动性研究,内蒙古石油化工,36(3),133~134。

表 1 孤店断裂强震复发概率评价结果

最大潜在震级 M_w	离逝时间 (距 1119 年) /a	复发 间隔 /a	年发 生率	概率	
				预测时段 /a	评价 结果
6.72	895	2591	3.85×10^{-4}	50	5.3×10^{-2}
				100	6.3×10^{-2}
				200	9.2×10^{-2}

- 刘守华、董津城、徐光明等,2005,地下断裂对不同土质上覆土层的工程影响,岩土力学与工程学报,24(11),1868~1874。
- 龙锋、闻学泽、徐锡伟,2006,华北地区地震活断层的震级-破裂长度、破裂面积的经验关系,地震地质,28(4),511~535。
- 李传友、汪一鹏、张良怀等,1999,吉林省松原地区 1119 年 6 $\frac{3}{4}$ 级地震的发震构造条件,中国地震,15(3),41~50。
- 闵伟、焦德成、周本刚等,2011,依兰-伊通断裂全新世活动的新发现及其意义,地震地质,33(1),141~150。
- 冉洪流,2006,时间相依模型与泊松模型计算结果的对比分析——以道孚及炉霍潜源为例,震灾防御技术,1(3),245~250。
- 冉洪流,2009,潜在震源区震级上限不确定性研究,地震学报,31(4),396~402。
- 冉洪流、周本刚,2004,断层地表潜在突发位移的概率评价初探,地震地质,26(1),133~140。
- 石国平、咎立声,1985,孤店逆断层和孤店构造成因及其含油远景预测,石油勘探与开发,12(3),22~25。
- 宋龙伯、江铁鹰,1987,断层破裂长度与震级关系的讨论,地震研究,10(1),45~54。
- 孙文斌、和跃时,2004,中国东北地区地震活动特征及其与日本海板块俯冲的关系,地震地质,26(1),122~132。
- 王莉、杜旭东、陆克政等,1998,松辽盆地南部中央坳陷区正反转构造特征及演化机制,石油大学学报(自然科学版),22(6),24~28。
- 闻学泽,1995,活动断裂地震潜势的定量评估,北京:地震出版社。
- 闻学泽、徐锡伟、龙锋等,2007,中国大陆东部中-弱活动断层潜在地震最大震级评估的震级-频度关系模型,地震地质,29(2),236~253。
- 吴戈、房贺岩、李志田等,1988,1119 年前郭地震考察与研究,东北地震研究,4(1),67~76。
- 王有功、吕延防、付广等,2014,长岭复式断陷群构造特征及天然气富集规律,石油地球物理勘探,49(6),1204~1212。
- 杨纪林,2011,试论中国内陆板块运动演化及与地震的关系,内陆地震,25(2),109~119。
- 叶文华、徐锡伟、汪良谋,1996,中国西部强震的地表破裂规模与震级、复发时间间隔关系的研究,地震地质,18(1),37~44。
- 张培震、毛凤英,1996,活动断裂定量研究与中长期地震危险性概率评价,见:邓起东、汪一鹏、张培震等,活动断裂研究(5),12~31,北京:地震出版社。
- 张永庆、谢富仁、王峰,2007,乌鲁木齐地区活动断裂强震复发概率模型研究,地震地质,29(4),776~786。
- 赵文峰,1989,东北深源和浅源地震同步活动的地球动力机制,西北地震学报,11(1),41~47。
- 中国地震局,2005,中国地震活动断层探测技术系统技术规程,35~45,北京:地震出版社。
- 入倉孝次郎、三宅弘惠,2000,M8クラスの大地震の断層パラメーター—断層長さ,幅,変位,面積と地震モーメントの関係,京都大学防災研究所。
- Anderson J G, Wesnousky S G, Stirling M W, 1996, Earthquake size as a function of fault slip rate, Bull Seism Soc Am, 86(3), 683~690.
- Anastasopoulos I, Gazetas G, Bransby M, et al, 2007, Fault rupture propagation through sand, Finite-element analysis and validation through centrifuge experiments, J Geotech Geoenviron Eng, 133(8), 943~958.
- Hanks H, Kanamori H, 1979, A moment magnitude scale, Geophys Res, 84(B5), 2348~2350.
- Jonathan D B, Raymond B S, 1994, Earthquake fault rupture propagation through soil, J Geotech Geoenviron Eng, ASCE, 120(3), 543~561.
- Mohammadioum B, Serva L, 2001, Stress drop, slip type, earthquake magnitude, and seismic hazard, Bull Seism Soc Am, 91(4), 694~707.
- Nishenko S P, Buland R, 1987, A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting, Bull Seism Soc Am, 77(4), 1382~1399.
- Tocher D, 1958, Earthquake energy and ground breakage, Bull Seism Soc Am, 48(2), 147~153.
- Wells D L, Coppersmith K J, 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement(incomplete), Bull Seism Soc Am, 84(4), 974~1002.

Quantitative seismic risk evaluation on blind Gudian Fault in Jilin Province on petroleum geological and historical seismic data

Shao Bo¹⁾ Shen Jun¹⁾ Li Yingzhen¹⁾ Yu Xiaohui^{1,2)} Dai Xunye¹⁾
Yuan Junfeng¹⁾ Yu Yang³⁾

1) Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, Hebei, China

2) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

3) Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China

Abstract One of the most important purposes of active fault detection is to evaluate the seismic risk of active fault on detection result. A large number of facts show that the blind active faults in eastern China have the capability of earthquakes with $M_s \geq 7.0$. During the active faults detection work in Songyuan, we found an active fault, which was called the Gudian fault. In this article, detailed underground structure of the fault is obtained through 3D seismic data. The latest activities and sliding rate are obtained from the shallow seismic exploration and the terrace borehole work. On the basis of comprehensive study on the geological structure, the quaternary activity, historical earthquakes and earthquake activities of the fault, we evaluate the potential maximum earthquake magnitude on subsurface fracture parameters, and confirm that the fault has been active since late Pleistocene, with the ability of earthquakes with $M_s \geq 7.0$. In addition, the recurrence period or the annual rate is calculated by seismic moment ways. The historical earthquake recurrence probability model of Chinese mainland is adopted to calculate the occurrence probability of the Gudian fault in the coming 50~200 years.

Key words: Urban active fault detection Blind active fault Occurrence probability
Recurrence period