

# 祁连山-河西走廊西段强震复发概率模型 及强震潜势评估<sup>1</sup>

庞 炜 谢 超 李瑞莎 张 佩 路 珍

(中国地震局第二监测中心, 西安 710054)

**摘要** 祁连山-河西走廊西段构造区发育多条重要活动断裂, 多年来已积累较丰富的古地震研究的成果。本文在前人研究基础上, 结合历史地震数据等, 从定量化强震复发间隔  $T$  与平均复发间隔  $T_a$  入手, 将其比值 ( $T/T_a$ ) 进行数学处理, 借鉴 NB 模型的思路, 建立祁连山-河西走廊西段构造区模型, 进而对强震潜势进行评估。结果表明: 祁连山-河西走廊西段构造区内未来可能的强震发生地点是榆木山北缘断裂芦泉河-九个泉段和榆木山东缘断裂梨园河口-黑河口段。

**关键词:** 祁连山-河西走廊西段 强震 概率分布  $T/T_a$  值

## Probability Model for Strong Earthquake Recurrence and Estimates of Seismic Potential in Western Qilian Mt.-Hexi Corridor

Pang Wei, Xie Chao, Li Ruisha, Zhang Pei and Lu Zhen

(The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710054, China)

**Abstract** Multiple important active faults are developed in western Qilian Mt.-Hexi Corridor, and quantitative research, especially systematic summary on paleo-earthquakes are carried out in these years. This paper starts with paleoearthquakes and historic and recent earthquakes recurrence intervals for main active fault zones in western Qilian Mt.-Hexi Corridor since Late Pleistocene. By drawing lessons from modeling method of NB model, we have calculated the strong earthquake recurrence interval ( $T$ ), average strong earthquake recurrence interval ( $T_a$ ) and value of normalized function ( $T/T_a$ ) for all specific fault segments, and established the strong earthquake recurrence probability model which shows that the distribution of normalized strong earthquake recurrence interval follows a normal distribution with mean ( $\mu$ ) equal to 1 and standard deviation ( $\sigma$ ) of 0.224 3. The result reveals that the potential fault segments for the occurrence of future strong earthquake should be Luquanhe-Jiugequan segment of northern margin fault of Yumushan and Liyuanhe estuary-Heihe estuary part of eastern margin fault of Yumushan.

**Key words:** Western Qilian Mt.-Hexi Corridor; Strong earthquake; Probability distribution;  $T/T_a$  value

## 引言

国内外学者利用地震活动性法、地震构造法、构造物理法、地震构造活动势态追踪法、天文地震法、征兆地质法、数学地质法等提出了多种地震复发模式, 如实时模式、丛集模式、特征地震复发模式等 (Shimazaki 等, 1980; Schwartz 等, 1984; Nishenko 等, 1987; Savage 等, 1987; Kagan, 1991; 闻学泽, 1991;

<sup>1</sup> 基金项目 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41802229); 中国地震局星火科技项目 (XH20080Y)

[收稿日期] 2020-08-19

[作者简介] 庞炜, 男, 生于 1989 年。工程师。主要从事地震地质和工程地震等方面的研究。E-mail: pangwei89@126.com

[通信作者] 谢超, 男, 生于 1983 年。副研究员。主要从事地震地质等方面的研究。E-mail: chao.xie0017@163.com

张秋文等, 1999)。部分学者对上述理论模型进行了深入研究, 从统计学角度定量分析并提出了多种数学预测模型 (Nishenko 等, 1987; 闻学泽, 1995; Ellsworth 等, 1999)。

1987 年, Nishenko 等建立了环太平洋地震带原地复发强震或大地震“通用”复发间隔的经验分布——NB 模型 (Nishenko 等, 1987; 陈立春等, 2002; 陈立春, 2003)。该模型以整个环太平洋地震带为研究对象, 计算各段落特征地震的复发间隔  $T$  和平均重复间隔  $T_a$ , 将其比值 ( $T/T_a$ ) 作为统计样本, 拟合求得环太平洋地震带特征地震复发间隔分布的经验概率密度函数 (陈立春等, 2002)。

不同于太平洋地震带所处的板缘构造环境, 对于大陆内部来说, 一般地震复发周期均较长, 单条断裂上的历史地震和古地震等数据有限, 远达不到概率分析模型需要的样本量, 原始的 NB 模型无法应用。基于此, 前人广泛开展了关于大陆内部强震复发模型的探讨和研究工作 (张培震等, 1996; 张秋文等, 1999; 闻学泽, 1999), 但始终无法得到适用于整个大陆内部的概率模型。然而, 同一区域构造背景条件下, 不同断裂 (段落) 的地震复发规律可能一致的 (邓起东等, 2004), 对于特定的构造背景, 可借鉴 NB 模型, 利用区域断裂的古地震、历史地震等数据, 建立该条件下的强震复发概率模型, 并进行地震危险性评估, 同时结合其他方法进行综合预测, 具有一定的科学性和实际意义 (陈立春等, 2002)。

伴随着活动断裂研究从理论到技术的不断发展, 量化研究越来越深入 (Wesnousky, 1986; 邓起东, 1991; 闻学泽, 1991, 1995; 张培震等, 1996)。通过活动断裂定量研究, 目前可获得断裂的空间几何展布特征、分段情况、同震位错与累积位移量、古地震序列、大震离逝时间、断裂滑动速率和缩短量等参数 (邓起东等, 2004)。采用实时预测模型进行地震危险性分析时, 利用了活动断裂定量研究技术 (Wallace, 1970; Anderson, 1979; Molnar, 1979; Wesnousky, 1986; Carlson, 1991; 闻学泽, 1995; 张培震等, 1996)。

祁连山-河西走廊构造带活动构造密集发育 (Tapponnier 等, 1990; 国家地震局地质研究所等, 1993; Gaudemer 等, 1995; Xu 等, 2010), 特别是在祁连山-河西走廊西段这一特定构造背景下, 发育多条全新世活动强烈的活动断裂, 具有较高的研究基础 (陈柏林等, 2005; 郑文俊, 2009; 金卿等, 2011; 刘兴旺等, 2014; 张波等, 2016; 李安等, 2016; 杨海波等, 2017; 黄雄南等, 2018; 庞炜等, 2018, 2019), 其资料基本满足统计所需的样本量。基于以上论述, 利用目前现有的古地震、历史地震数据等, 建立祁连山-河西走廊西段强震复发概率模型, 并对可能的强震地点进行预测。

## 1 区域构造背景

河西走廊在大地构造上又被称为走廊过渡带, 作为北祁连造山带和北山造山带之间的典型压陷性盆地, 具有重要的构造意义。北山造山带位于甘肃北部、内蒙古西南一带, 多被认为是天山造山带东延的次级构造单元 (Xiao 等, 2010), 区域古生代地层发育较完整, 断裂十分发育。北祁连造山带位于走廊之南, 夹持在阿尔金断裂和海原断裂之间, 是北祁连洋中寒武纪-奥陶纪俯冲缝合带, 由下古生界地层强烈挤压形成的褶皱组成, 同时代的中基性侵入岩、喷出岩比较发育。此外, 早古生代地层区域变质程度高, 范围广, 受区域 NNE-SSW 方向的应力作用, 褶皱带内的断裂以 NWW 走向为主, 二者构成了该区域复杂的褶皱-断裂构造系统。走廊过渡带具有双基底特征, 下部基底为前寒武系中深变质岩系, 上部基底为古生代活动大陆边缘火山-沉积岩系, 其发展受北祁连褶皱带构造变形的巨大影响, 经历了早古生代活动大陆边缘、晚古生代-早中生代前陆盆地、中-晚中生代伸展断陷及新生代挤压变形与前陆盆地共 4 个演化阶段 (宋春晖, 2006)。尤其是中-新生代以来, 盆地内的局部沉降中心在第四系以来的地层沉积厚度超过千米。中央凹陷带是中-新生代沉降最强烈的地段, 但由于受其他方向构造的干扰和叠加, 沉降中心在第四纪时有所转移, 使中生代沉积厚度极不均匀, 但仍重叠在早先形成的凹陷上, 进一步可划分出若干小型盆地, 主要包括安西盆地、酒西盆地、酒东盆地、张掖-民乐盆地、潮水盆地和花海-金塔盆地 (郑文俊, 2009)。盆地南北两侧发育多条大型断裂, 控制了盆地的发展, 也作为祁连山-河西走廊构造带的重要组成, 限定了区域构造变形, 且直接控制该区破坏性地震的孕育发生。

## 2 祁连山-河西走廊西段主要断裂

### 2.1 主要断裂

祁连山-河西走廊西段主要的大型活动断裂包括合黎山断裂 (郑文俊, 2009; Zheng 等, 2013)、金塔南山断裂 (何文贵等, 2012; 张波等, 2016)、旱峡-大黄沟断裂 (国家地震局地质研究所等, 1993)、玉门-

北大河断裂（陈柏林等，2005；李安等，2016）、榆木山北缘断裂（金卿，2011）、榆木山东缘断裂（国家地震局地质研究所等，1993；庞炜，2015；庞炜等，2019）、佛洞庙-红崖子断裂（黄雄南等，2018）、龙首山南缘断裂等（国家地震局地质研究所等，1993）如图 1 所示，断裂以逆冲性质为主，兼具走滑特征。以上断裂产状及分段情况如表 1 所示。

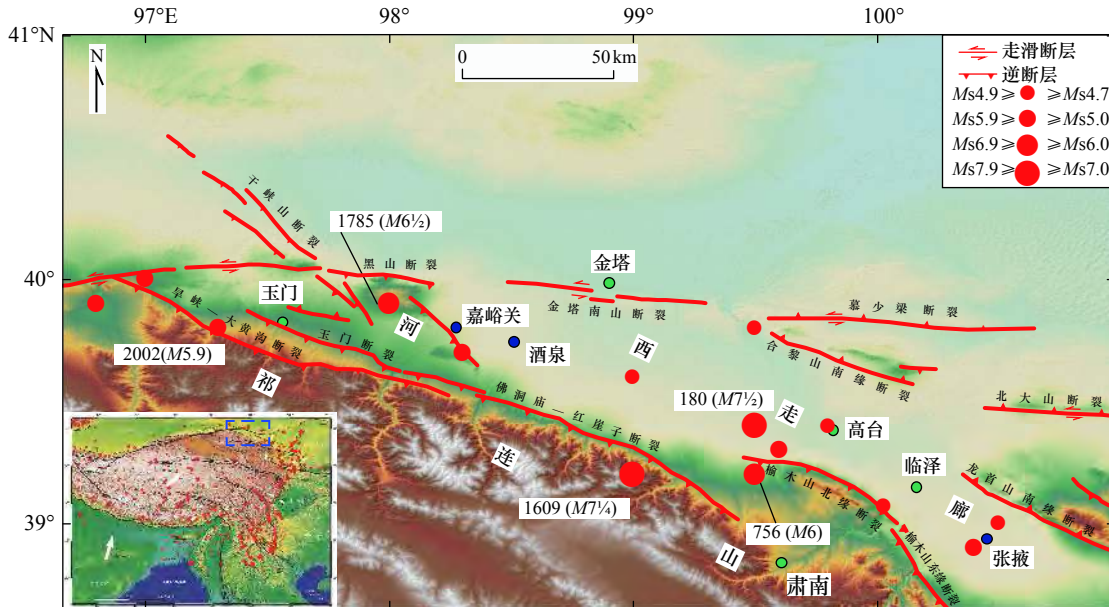


图 1 祁连山-河西走廊西段活动断裂分布图

Fig. 1 Map showing distribution of active faults in western Qilian Mt.-Hexi Corridor

## 2.2 主要历史地震

前文列出的活动断裂控制着青藏高原东北缘构造变形，构成了该区弧形构造体系，文献记载强震活动频繁，如 180 年表氏（高台西） $7\frac{1}{2}$  级地震（郑文俊，2009；曹娜等，2010），756 年张掖-酒泉 6 级地震（郑文俊，2009；雷中生等，2012）、1609 年酒泉红崖堡  $7\frac{1}{4}$  级地震（刘兴旺等，2011；黄雄南等，2018）、1785 年玉门惠回堡  $6\frac{1}{4}$  级地震（何文贵等，2010）、2002 年玉门 5.9 级地震等中强地震（何文贵等，2004），均导致了不同程度的人员伤亡与财产损失，说明该区域地震活动一直很强烈。对于这些历史地震的震中、发震构造等相关论述如表 2 所示。

## 3 强震复发概率模型

祁连山-河西走廊西段构造区主要活动断裂以逆冲性质为主，且活动性较强烈。多年的研究表明，这几条逆冲断裂已积累了最新且较完整的古地震数据，该区域历史地震资料丰富，满足建模的基本条件。从目前的情况来看，除个别数据外，各断裂强震复发病理、模式等特征具有较好的一致性。本文选择祁连山-河西走廊西段具有代表性的活动断裂（图 1），包括玉门-北大河断裂（李安等，2016）、金塔南山断裂（何文贵等，2012；庞炜等，2018）、合黎山断裂（郑文俊，2009）、榆木山北缘断裂（陈柏林等，2007；金卿等，2011；金卿，2011）、榆木山东缘断裂（冉勇康等，1988；李玉龙等，1988；李有利等，1995；庞炜等，2019）及佛洞庙-红崖子断裂（黄雄南等，2018）等已有的古地震或历史地震事件作为此次建模的基础数据。

冉勇康等（1999）根据多年古地震研究成果，总结了古地震事件复长间隔、短间隔的分布形式特征：部分断裂在一段时间内比较活跃，一段时间内又较平静，其复发行表现为明显的长短间隔相间特征，在时间上，大地震在不同阶段有重复间隔时间。我国历史地震记载时间久，数据较完备，张秋文等（1999）经过系统整理和分析研究，进一步扩展认为准周期丛集复发具体表现为地震丛之间以准周期复发为主，而地震丛内则表现为丛集复发。基于以上理论，根据研究区各断裂（段落）古地震（历史地震）事件时间上的分布特点，将其划分为相对的长间隔期和短间隔期。

表 1 研究区主要断裂

Table 1 Introduction of main faults in the study area

断裂名称	产状	分段依据	分段
合黎山断裂	长度: 65 km 走向: N50° ~ 60°W 倾向: N 倾角: 40° ~ 70°	断层地貌 断层走向	西段: 肖家庄-阴埃墩 中段: 阴埃墩-红土沟 东段: 红土沟-猴儿头
金塔南山断裂	长度: 60 km 走向: 近EW 倾向: S 倾角: >60°	断层地貌 几何形态	西段: 梧桐墩-瓜勾山东 中段: 瓜勾山东-大口子山 东段: 大口子山-红墩西
早峡-大黄沟断裂	长度: 160 km 走向: NWW 倾向: SW 倾角: 40° ~ 70°	—	—
玉门-北大河断裂	长度: 130 km 走向: NWW 倾向: SW 倾角: 20° ~ 40°	断层地貌 活动性	西段: 青草湾-南坪 东段: 南坪-佛洞庙
榆木山北缘断裂	长度: 60 km 走向: NW 倾向: SW 倾角: 40° ~ 60°	断层地貌 活动性	西段: 元山子-芦泉河 中段: 芦泉河-九个泉 东段: 排路口至梨园小口子
榆木山东缘断裂	长度: 110 km 走向: NNW 倾向: SWW 倾角: 65° ~ 70°	断层地貌 活动性	①南丰-民乐 ②民乐-花寨子 ③花寨子-大苦水 ④大苦水-黑河口 ⑤黑河口-梨园河口 ⑥梨园河口-杨家庄
佛洞庙-红崖子断裂	长度: 110 km 走向: NW 倾向: SW 倾角: 30° ~ 45°	几何形态 地层切割 关系	西段: 洪水坝河-红山村 中段: 红山村东-马营河 东段: 马营河-西岔沟
龙首山南缘断裂	长度: 400 km 走向: NW-NWW-EW 倾向: NE 倾角: 70° ~ 80°	—	—

表 2 研究区主要历史地震

Table 2 Main historical earthquakes in the study area

时间	历史地震	宏观震中	震中烈度	发震断裂	地表破裂长度	最大同震位错	震级厘定
180年	表氏地震	高台县北 (39.65°N, 99.85°E)	IX ~ X	合黎山断裂	>65 km	3 m	7 $\frac{1}{2}$
756年	张掖-酒泉地震	高台县北 (39.6°N, 100.0°E)	IX ~ X	合黎山断裂	>30 km (红土沟-猴儿头段)	1.5 m	7 ~ 7 $\frac{1}{2}$
1609年	酒泉红崖堡地震	红崖堡西 (39.2°N, 99.0°E)	X	佛洞庙-红崖子断裂	95 km (洪水坝河-头到东湾)	1.8 m	7 $\frac{1}{2}$
1785年	玉门惠回堡地震	玉门火烧沟近 (39.9°N, 97.9°E)	IX	新民堡断裂阴洼山断裂	—	—	6 $\frac{3}{4}$
2002年	玉门地震	(39.7°N, 97.2°E)	VII	早峡-大黄沟断裂	—	—	5.9

根据 NB 模型的建模思路 (Nishenko 等, 1987), 建立该构造区强震复发概率分布模型。首先, 对区域内各活动断裂晚更新世以来的古地震资料按照长间隔期和短间隔期进行整理, 再分别计算各组强震复发间隔 ( $T$ ) 和平均复发间隔 ( $T_a$ ) 的均一化值 ( $T/T_a$ ) 如表 3 所示。如表 3 可知, 区域各活动断裂 (段落) 的古地震 (历史地震) 数据均一化结果表现出了较为相同的规律。计算后共得到 20 个值, 这些值即为建模的基本数据。



表 3 祁连山-河西走廊西段主要活动断裂(段落)强震复发间隔数据

Table 3 Strong earthquake recurrence intervals on some active faults in western Qilian Mt.-Hexi Corridor

断裂名称	段落名称	事件序列	时间/a B.P.	距离上次事件时间间隔/a	重复间隔分组/a	平均重复间隔/a	均一化值
榆木山北缘断裂	芦泉河-九个泉	1	(13200±100)	—	—	—	—
		2	8382±74	4818	4818	4818	—
		3	6511±65	1871	1871	—	0.97
		4	4533±43	1978	1978	1924	1.03
榆木山东缘断裂	梨园河口-黑河口	1	(25000)	—	—	—	—
		2	(24500)	—	—	—	—
		3	15700	—	—	—	—
		4	13150±150	2550	2550	—	0.95
	5	10500	2650	2650	—	0.99	
	6	8750±250	1750	1750	—	0.65	
	7	5000	3750	3750	2675	1.40	
佛洞庙-红崖子断裂	—	1	8895±125	—	—	—	—
		2	6718±39	2177	2177	—	1.01
		3	4960±27	1758	1758	—	0.82
		4	2438±40	2522	2522	2152	1.17
金塔南山断裂	梧桐墩西-瓜勾山东	1	6470±1.93	—	—	—	—
		2	3530±280	2940	2940	—	1.45
		3	1810±140	1720	1720	—	0.85
		4	410±200	1400	1400	2020	0.69
玉门-北大河断裂	瓜勾山东-红墩西	1	15160±1290	—	—	—	—
		2	9900±500	5260	5260	—	1.35
		3	6000	3900	3900	—	1.00
		4	3500±400	2500	2500	3887	0.64
合黎山断裂	—	1	8330	—	—	—	—
		2	4490	3840	3840	—	1.17
		3	1790	2700	2700	3270	0.82
		4	(1140)	650	650	650	—
合黎山断裂	—	1	(5000)	—	—	—	—
		2	(1939)	3061	—	—	—
		3	(1263)	676	—	—	—

注：计算时剔除括号内的数据：（1）距今大于25000a的地震数据，因其已超过地震复发周期；（2）单个地震的复发间隔值，无统计意义

对表 3 中的均一化数据进行统计处理，得到其均值为 0.998，标准差为 0.2301。利用直方图将表 3 中的均一化数据呈现出来，如图 2 所示可看出均一化值 ( $T/T_a$ ) 符合正态分布。

根据统计学中的最大似然估计法（数学手册编写组，1979；刘淑琴等，1997），分布密度为  $N(\mu, \sigma^2)$  的正态总体， $\mu$  和  $\sigma$  的最大似然估计为（陈家鼎等，1983）：

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (1)$$

根据式 (1) 计算可得： $\mu=1, \sigma=0.2243$ 。因此，祁连山-河西走廊西段构造区内各活动断裂（段落）的地震复发间隔均一化值 ( $T/T_a$ ) 服从正态分布  $N(1, 0.2243^2)$ ，其概率密度函数为：

$$f\left(\frac{T}{T_a}\right) = \frac{1}{0.2243 \times \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{T}{T_a} - 1\right)^2}{2 \times 0.2243^2}\right] \quad (2)$$

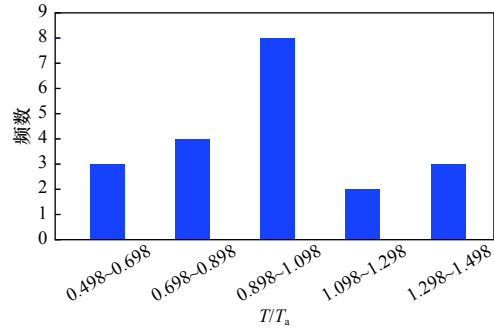


图 2 均一化值 ( $T/T_a$ ) 直方图

Fig. 2 Histogram of standardized value ( $T/T_a$ ) of the strong earthquake recurrence intervals

对式 (2) 进行  $\chi^2$  统计检验，组数为 5 (图 2)，得到  $\chi^2=2$ ，小于临界值 5.99 (自由度=2，并取  $\alpha=0.05$ )，故可认为  $T/T_a$  服从正态分布  $N(1, 0.2243^2)$ 。由于  $f(T) = \frac{f(T/T_a)}{T_a}$ ，因此祁连山-河西走廊西段构造区各活动断裂（段落）的强震复发间隔 ( $T$ ) 服从正态分布，概率密度函数为：

$$f(T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 0.2243 \times T_a} \exp\left[\frac{-(T - T_a)^2}{2 \times (0.2243 \times T_a)^2}\right] \quad (3)$$

将式 (3) 称为祁连山-河西走廊西段构造区强震复发概率分布模型。

## 4 祁连山-河西走廊西段未来地震潜势

### 4.1 发震概率计算

根据祁连山-河西走廊西段构造区古地震及历史地震数据建立强震复发间隔概率分布模型，对研究区内主要的几条活动断裂（段落）未来某时段内发生大震的概率进行统计计算。计算过程中，重点关注强震发生的累计概率，计算公式如下：

$$P(T \leq t) = \int_0^t \frac{1}{0.2243 \times \sqrt{2\pi} T_a} \exp\left[\frac{-(T - T_a)^2}{2 \times (0.2243 \times T_a)^2}\right] dT \quad (4)$$

式中， $t$  为上次强震距现在的时间； $T_a$  为平均复发间隔。

此外，利用 BPT 模型计算区域各断裂（段落）自上一次地震发生后到现在的累计概率，将结果与上述计算得到的数据进行对比分析 (表 4)。参数  $\alpha$  直接取 Ellsworth 等 (1999) 建议的 0.5，计算公式为：

$$P(T \leq t) = \int_0^t \sqrt{\frac{T_a}{2\pi\alpha^2 T^3}} \exp\left[\frac{-(T - T_a)^2}{2\alpha^2 \times T_a T}\right] dT \quad (5)$$

表 4 祁连山-河西走廊西段构造区活动断裂（段落）地震潜势定量评估表

Table 4 Quantitative estimates of seismic potential on some active faults in western Qilian Mt.-Hexi Corridor

断裂名称	段落名称	离逝时间/a B.P.	平均复发间隔/a	消失率*	累计概率/%	
					文中所建模型	BPT模型
榆木山北缘断裂	芦泉河-九个泉	4533	1924	2.408	100.00	97.88
榆木山东缘断裂	梨园河口-黑河口	5000	2675	1.906	100.00	93.89
	临泽段	2438	2152	1.179	72.34	69.00
佛洞庙-红崖子断裂	—	410	3400	0.150	0	0
金塔南山断裂	梧桐墩西-瓜勾山东	410	2020	0.252	0	0
	瓜勾山东-红墩西	3500	3887	0.926	32.86	50.94
玉门-北大河断裂	—	1140	3270	0.379	0.18	2.10

注：\*预测时段为100年

由表 4 可知, 佛洞庙-红崖子断裂、金塔南山断裂梧桐墩西-瓜勾山东段最后一次地震事件的离逝时间均为 410a, 强震的累计概率均近于零, 即这两条断裂(段落)上发生强震的可能性几乎为零。金塔南山断裂瓜勾山东-红墩段、玉门-北大河断裂上强震离逝时间均较平均复发间隔小, 强震累计概率较小。榆木山东缘断裂临泽段最近一次地震事件的离逝时间相比于平均复发间隔, 累计概率为 70% 左右, 危险性相对较高, 而对于榆木山东缘断裂梨园河口-黑河口段, 强震累积概率为 100%, 且最后一次地震事件的离逝时间为 5000 年, 已超过历史地震的最长间隔时间, 因此, 强震发生的可能性非常大。榆木山北缘断裂芦泉河-九个泉段最后一次古地震事件的离逝时间远高于平均复发间隔, 累计概率为 100%, 强震复发可能性较大。

将本文建立的概率模型和 BPT 模型计算结果进行对比, 可以发现二者得到的结果较一致, 说明本文建立的计算模型具有一定可信度。

#### 4.2 发生强震断裂预测

古地震法和消失率法作为常用的确定性分析方法, 常用于确定活动断裂(段落)未来发生强震的可能性。古地震法利用最后一次大震的离逝时间与大震平均重复间隔做对比, 当最后一次地震事件到预测时间段的总时间跨度(即离逝时间与预测时段总和)接近、等于或大于大震平均复发间隔, 则认为断裂(段落)在预测时段内有发生地震事件的可能; 反之, 不考虑发生地震事件的可能性。消失率法利用最后一次大震离逝时间( $T_c$ )与预测时段( $\Delta T$ )之和与大震平均重复间隔( $T_a$ )做对比, 比值称为消失率( $V$ ), 假使  $V > 0.5$ , 则认为断裂(段落)在预测时段内存在地震发生的危险。计算公式为:

$$V = \frac{T_c + \Delta T}{T_a} \quad (6)$$

运用上述公式计算祁连山-河西走廊西段构造区各断裂在未来 100 年发生大震的可能性结果如表 4 所示, 由表 4 可知, 榆木山北缘断裂芦泉河-九个泉段  $V > 2$ , 发生地震的可能性很大; 榆木山东缘断裂梨园河口-黑河口段  $V > 1.9$ , 发生地震的可能性较大; 金塔南山断裂梧桐墩西-瓜勾山段、玉门-北大河断裂及佛洞庙-红崖子断裂  $V < 0.5$ , 发生地震可能性较小; 金塔南山断裂瓜勾山东-红墩段  $V > 0.5$ , 有发生强震的可能。综上所述, 榆木山北缘断裂芦泉河-九个泉段和榆木山东缘断裂梨园河口-黑河口段地震危险性相对较大。

基于以上分析, 以本文建立的强震复发概率模型、BPT 模型计算结果为主, 综合消失率法计算结果, 并结合现代中强地震分布规律, 认为祁连山-河西走廊西段未来最有可能发生强震的断裂(段落)是榆木山北缘断裂芦泉河-九个泉段, 榆木山东缘断裂梨园河口-黑河口段次之(图 3)。

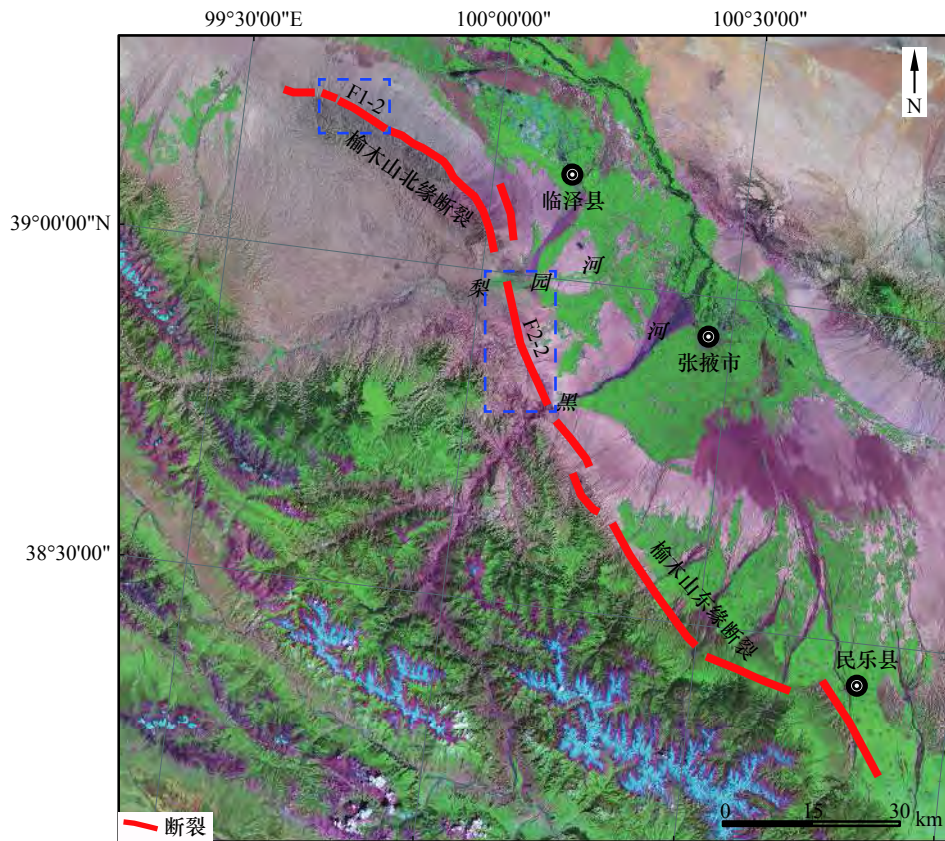
## 5 讨论与结论

根据祁连山-河西走廊西段强震复发模型, 最终得到该区未来可能发生强震的危险断裂(段落)是榆木山北缘断裂芦泉河-九个泉段和榆木山东缘断裂梨园河口-黑河口段。该结果与消逝率等确定性分析方法获得的结论一致。需要明确的是, 古地震事件的准确性、完整性对计算结果有影响, 同时河西地区由于以冲洪积物沉积为主, 地层序列不明显, 测年样品采集有难度, 且误差较大。目前的数据限于上述客观因素, 数量还需进一步增加, 质量也需进一步提升。

祁连山-河西走廊西段构造区的多条活动断裂已确定多次大的古地震事件, 历史文献也详细记载了多次破坏性大地震, 说明该区域地震活动一直很强烈, 因此, 对该区域大震中长期预报工作的不断探索很有必要, 不断摸索总结该区域强震发生的特点和规律, 是进行地震危险区判定、中长期预测的重要基础。本文借鉴前人思路, 从强震复发间隔和平均复发间隔的比值入手, 建立了祁连山-河西走廊西段构造区强震复发概率模型, 进而对强震潜势进行评估, 对可能的强震复发地点进行了预测, 得到以下结论:

(1) 祁连山-河西走廊西段构造区断裂(段落)强震复发间隔均一化值服从祁连山-河西走廊西段模型, 即服从正态分布  $N(1, 0.2243^2)$ ;

(2) 祁连山-河西走廊西段构造区未来强震潜在危险断裂(段落)为榆木山北缘断裂芦泉河-九个泉段和榆木山东缘断裂梨园河口-黑河口段。



注: F1-2:榆木山北缘断裂芦河-九个泉段; F2-2:榆木山东缘断裂梨园河-黑河口段

图3 榆木山北缘断裂及东缘断裂北段展布图

Fig. 3 Map of the distribution of northern Yumushan fault and north part of eastern Yumushan fault

## 参考文献

- 曹娜, 雷中生, 袁道阳等, 2010. 公元 180 年甘肃表氏地震考. 地震学报, **32** (6): 744—753.
- Cao N., Lei Z. S., Yuan D. Y., et al., 2010. Textural criticism on the Biaoshi, Gansu, earthquake in 180 A.D. *Acta Seismologica Sinica*, **32**(6): 744—753. (in Chinese)
- 陈柏林, 刘建生, 张永双等, 2005. 玉门断裂全新世活动特征及其与玉门地震的关系. *地质论评*, **51** (2): 138—142.
- Chen B. L., Liu J. S., Zhang Y. S., et al., 2005. Activity of the Yumen fault during the Holocene and its relation to the Yumen earthquake. *Geological Review*, **51**(2): 138—142. (in Chinese)
- 陈柏林, 王春宇, 宫红良等, 2007. 关于河西走廊盆地榆木山北缘断裂晚第四纪活动特征的新认识. *地质通报*, **26** (8): 976—983.
- Chen B. L., Wang C. Y., Gong H. L., et al., 2007. A new understanding of the characteristics of late Quaternary activity of the northern Yumushan marginal fault in the Hexi corridor, northwestern China. *Geological Bulletin of China*, **26**(8): 976—983. (in Chinese)
- 陈家鼎, 刘婉如, 汪仁官, 1983. 概率统计讲义. 北京: 高等教育出版社.
- 陈立春, 冉勇康, 2002. 京西北盆地构造区强震复发概率模型及地震潜势的定量评估. *地震地质*, **24** (1): 91—100.
- Chen L. C., Ran Y. K., 2002. Probability model for strong earthquake recurrence and quantitative estimates of seismic potential in the basin-and-range province, northwest of Beijing. *Seismology and Geology*, **24**(1): 91—100. (in Chinese)
- 陈立春, 2003. 河套断陷带的古地震、强震复发规律和未来可能强震地点. 北京: 中国地震局地质研究所.
- Chen L. C., 2003. Paleoseismicity, the law of strong earthquake recurrence and potential sites for the occurrence of future strong earthquakes in the Hetao fault-depression zone. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 邓起东, 1991. 活动断裂研究的进展与方向. 见:《活动断裂研究》编委会主编, 活动断裂研究(1). 北京: 地震出版社.
- 邓起东, 陈立春, 冉勇康, 2004. 活动构造定量研究与应用. *地学前缘*, **11** (4): 383—392.
- Deng Q. D., Chen L. C., Ran Y. K., 2004. Quantitative studies and applications of active tectonics. *Earth Science Frontiers*, **11**(4):



- 383—392. (in Chinese)
- 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所, 1993. 祁连山-河西走廊活动断裂系. 北京: 地震出版社.
- 何文贵, 郑文俊, 赵广堃等, 2004. 2002年12月14日甘肃玉门5.9级地震的发震构造研究. *地震地质*, **26**(4): 688—697.
- He W. G., Zheng W. J., Zhao G. K., et al., 2004. Study on the seismogenic structure of the Yumen, Gansu province  $M_s$ 5.9 earthquake of December 14, 2002. *Seismology and Geology*, **26**(4): 688—697. (in Chinese)
- 何文贵, 雷中生, 袁道阳等, 2010. 1785年玉门惠回堡地震的震灾特点与发震构造. *西北地震学报*, **32**(1): 47—53.
- He W. G., Lei Z. S., Yuan D. Y., et al., 2010. Disaster characteristics of Huihuiyu earthquake in 1785 in Yumen, Gansu Province, and discussion on its seismogenic structure. *Northwestern Seismological Journal*, **32**(1): 47—53. (in Chinese)
- 何文贵, 袁道阳, 王爱国等, 2012. 酒泉盆地北侧金塔南山北缘断裂西段全新世活动特征. *地震*, **32**(3): 59—66.
- He W. G., Yuan D. Y., Wang A. G., et al., 2012. Active faulting features in Holocene of the west segment of the Jintananshan north-margin fault at the north of Jiuquan basin. *Earthquake*, **32**(3): 59—66. (in Chinese)
- 黄雄南, 杨晓平, 杨海波, 2018. 佛洞庙-红崖子断裂古地震事件. *地震地质*, **40**(4): 753—772.
- Huang X. N., Yang X. P., Yang H. B., 2018. Study on paleoearthquakes along the Fodongmiao-Hongyazi fault, Gansu province. *Seismology and Geology*, **40**(4): 753—772. (in Chinese)
- 金卿, 2011. 榆木山断裂带晚第四纪构造活动与大震危险性评价. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- Jin Q., 2011. Study on activity in late quaternary and the earthquake risk assessment of the Yumu mountain fault zone. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology. (in Chinese)
- 金卿, 何文贵, 史志刚等, 2011. 榆木山北缘断裂古地震特征研究. *地震地质*, **33**(2): 347—355.
- Jin Q., He W. G., Shi Z. G., et al., 2011. Palaeo-earthquake study on the northern Yumushan active fault. *Seismology and Geology*, **33**(2): 347—355. (in Chinese)
- 雷中生, 袁道阳, 郑文俊等, 2012. 756年张掖-酒泉地震考. *西北地震学报*, **34**(1): 72—77.
- Lei Z. S., Yuan D. Y., Zheng W. J., et al., 2012. Textural research of Zhangye-Jiuquan earthquake in 756 A. D. *Northwestern Seismological Journal*, **34**(1): 72—77. (in Chinese)
- 李安, 王晓先, 张世民等, 2016. 祁连山北缘玉门断裂晚更新世以来的活动速率及古地震. *地震地质*, **38**(4): 897—910.
- Li A., Wang X. X., Zhang S. M., et al., 2016. The Slip rate and paleoearthquakes of the Yumen fault in the northern Qilian mountains since the late Pleistocene. *Seismology and Geology*, **38**(4): 897—910. (in Chinese)
- 李有利, 李保俊, 杨景春, 1995. 甘肃张掖黑河口断层晚更新世晚期以来的活动. *北京大学学报(自然科学版)*, **31**(3): 351—357.
- Li Y. L., Li B. J., Yang J. C., 1995. Late quaternary movement on the Heihekou fault, west Gansu, China. *Acta Scientiarum Naturalium (Universitatis Pekinensis)*, **31**(3): 351—357. (in Chinese)
- 李玉龙, 邢成起, 1988. 河西走廊地质构造基本特征以及榆木山北麓与黑河口红龙活断层研究. *西北地震学报*, **10**(2): 35—47.
- Li Y. L., Xing C. Q., 1988. Research on the fundamental characteristics of the geological structures of the Hexi corridor and the active faults of the northern and eastern flank of the Yumushan mountain. *Northwestern seismological Journal*, **10**(2): 35—47. (in Chinese)
- 刘淑琴, 张中信, 1997. 概率论与数理统计. 长春: 吉林人民出版社.
- Liu S. Q., Zhang Z. X., 1997. Probability theory and mathematical statistics. Changchun: Jilin People's Press. (in Chinese)
- 刘兴旺, 雷中生, 袁道阳等, 2011. 1609年甘肃红崖堡7¼级地震考证. *西北地震学报*, **33**(2): 143—148.
- Liu X. W., Lei Z. S., Yuan D. Y., et al., 2011. Textual research on the Hongyapu  $M7.25$  earthquake in 1609. *Northwestern Seismological Journal*, **33**(2): 143—148. (in Chinese)
- 刘兴旺, 袁道阳, 何文贵, 2014. 祁连山北缘佛洞庙-红崖子断裂古地震特征初步研究. *震灾防御技术*, **9**(3): 411—419.
- Liu X. W., Yuan D. Y., He W. G., 2014. Preliminary study of palaeo-earthquakes on the Fodongmiao-Hongyazi fault in the north margin of Qilian mountain. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **9**(3): 411—419. (in Chinese)
- 庞炜, 2015. 祁连山前逆冲断裂带古地震识别的关键技术研究. 兰州: 中国地震局兰州地震研究所.
- Pang W., 2015. Key techniques in paleoearthquake studies of reverse faults on Qilian mountain piedmont. Lanzhou: China Earthquake Administration Lanzhou Institute of Seismology. (in Chinese)
- 庞炜, 张波, 何文贵等, 2018. 金塔南山断裂中东段古地震特征初步研究. *地震地质*, **40**(4): 801—817.

- Pang W., Zhang B., He W. G., et al., 2018. Preliminary study of paleoearthquakes on the middle-eastern segment of Jinta Nanshan fault. *Seismology and Geology*, **40**(4): 801—817. (in Chinese)
- 庞炜, 何文贵, 张波, 2019. 临泽断裂新活动特征初步研究. *地震研究*, **42** (1): 120—132.
- Pang W., He W. G., Zhang B., 2019. Preliminary study of new faulting characteristic of the Linze fault. *Journal of seismological Research*, **42**(1): 120—132. (in Chinese)
- 冉勇康, 李志义, 尤惠川等, 1988. 河西走廊黑河口断层上的古地震及年代研究. *地震地质*, **10** (4): 118—126.
- Ran Y. K., Li Z. Y., You H. C., et al., 1988. The study and dating of paleoearthquake along Heihekou fault in Hexi corridor. *Seismology and Geology*, **10**(4): 118—126. (in Chinese)
- 冉勇康, 邓起东, 1999. 大地震重复特征与平均重复间隔的取值问题. *地震地质*, **21** (4): 316—323.
- Ran Y. K., Deng Q. D., 1999. Recurrence behavior of large earthquakes and how to take average recurrence interval of large earthquakes. *Seismology and Geology*, **21**(4): 316—323. (in Chinese)
- 数学手册编写组, 1979. 数学手册. 北京: 人民教育出版社.
- 宋春晖, 2006. 青藏高原北缘新生代沉积演化与高原构造隆升过程. 兰州: 兰州大学.
- Song C. H., 2006. Tectonic uplift and Cenozoic sedimentary evolution in the northern margin of the Tibetan Plateau. Lanzhou: Lanzhou University. (in Chinese)
- 闻学泽, 1991. 活断层的定量研究与长期地震潜势的概率估计问题. 见:《活动断裂研究》编委会主编, 活动断裂研究(1). 北京: 地震出版社.
- 闻学泽, 1995. 活动断裂地震潜势的定量评估. 北京: 地震出版社.
- Wen X. Z., 1995. Quantitative estimates seismic potential on faults. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 闻学泽, 1999. 中国大陆活动断裂的段破裂地震复发行. *地震学报*, **21** (4): 411—418.
- Wen X. Z., 1999. Recurrence behaviors of segment-rupturing earthquakes on active faults of the China mainland. *Acta Seismologica Sinica*, **21**(4): 411—418. (in Chinese)
- 杨海波, 杨晓平, 黄雄南, 2017. 祁连山北缘断裂带中段晚第四纪活动速率初步研究. *地震地质*, **39** (1): 20—42.
- Yang H. B., Yang X. P., Huang X. N., 2017. A preliminary study about slip rate of middle segment of the northern Qilian thrust fault zone since late Quaternary. *Seismology and Geology*, **39**(1): 20—42. (in Chinese)
- 张波, 何文贵, 庞炜等, 2016. 青藏块体北部金塔南山断裂晚第四纪走滑活动的地质地貌特征. *地震地质*, **38** (1): 1—21.
- Zhang B., He W. G., Pang W., et al., 2016. Geological and geomorphic expressions of late Quaternary strike-slip activity on Jinta Nanshan fault in northern edge of Qing-Zang block. *Seismology and Geology*, **38**(1): 1—21. (in Chinese)
- 张培震, 毛凤英, 1996. 活动断裂定量研究与中长期强地震危险性概率评价. 见:《活动断裂研究》编委会主编, 活动断裂研究(5). 北京: 地震出版社.
- 张秋文, 张培震, 1999. 地震中长期预测研究的进展和方向. *地球科学进展*, **14** (2): 147—152.
- Zhang Q. W., Zhang P. Z., 1999. Progress and prospect in the studies on long and medium-term earthquake prediction. *Advance in Earth Sciences*, **14**(2): 147—152. (in Chinese)
- 郑文俊, 2009. 河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式. 北京: 中国地震局地质研究所.
- Zheng W. J., 2009. Geometric pattern and active tectonics of the Hexi Corridor and its adjacent regions. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- Anderson J. G., 1979. Estimating the seismicity from geological structure for seismic-risk studies. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **69**(1): 135—158.
- Carlson J. M., 1991. Time intervals between characteristic earthquakes and correlations with smaller events: an analysis based on a mechanical model of a fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **96**(B3): 4255—4267.
- Ellsworth W. L., Matthews M. V., Nadeau R. M., et al., 1999. A physically-based earthquake recurrence model for estimation of long-term earthquake probabilities. In: Workshop on Earthquake Recurrence: State of the Art and Directions for the Future. Rome: Istituto Nazionale de Geofisica, 1—20.
- Gaudemer Y., Tapponnier P., Meyer B., et al., 1995. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the ‘Tianzhu gap’, on the western Haiyuan Fault, Gansu (China). *Geophysical Journal International*, **120**(3): 599—645.

- Kagan Y. Y., Jackson D. D., 1991. Seismic gap hypothesis: ten years after. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **96**(B13): 21419—21431.
- Molnar P., 1979. Earthquake recurrence intervals and plate tectonics. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **69**(1): 115—133.
- Nishenko S. P., Buland R., 1987. A generic recurrence interval distribution for earthquake forecasting. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77**(4): 1382—1399.
- Savage J. C., Cockerham R. S., 1987. Quasi-Periodic occurrence of earthquakes in the 1978-1986 Bishop-Mammoth Lakes Sequence, eastern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77**(4): 1347—1358.
- Schwartz D. P., Coppersmith K. J., 1984. Fault behavior and Characteristic earthquakes: Examples from the Wasatch and San Andreas Fault Zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **89**(B7): 5681—5698.
- Shimazaki K., Nakata T., 1980. Time-predictable recurrence model for large earthquakes. *Geophysical Research Letters*, **7**(4): 279—282.
- Tapponnier P., Meyer B., Avouac J. P., et al., 1990. Active thrusting and folding in the Qilian Shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, **97**(3-4): 382—403.
- Wallace R. E., 1970. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault. *GSA Bulletin*, **81**(10): 2875—2890.
- Wesnousky S. G., 1986. Earthquakes, Quaternary faults, and Seismic hazard in California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **91**(B12): 12587—12631.
- Xiao W. J., Mao Q. G., Windley B. F., et al., 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage. *American Journal of Science*, **310**(10): 1553—1594.
- Xu X. W., Yeats R. S., Yu G. H., 2010. Five short historical earthquake surface ruptures near the Silk Road, Gansu Province, China. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(2): 541—561.
- Zheng W. J., Zhang P. Z., Ge W. P., et al., 2013. Late Quaternary slip rate of the South Heli Shan Fault (northern Hexi corridor, NW China) and its implications for northeastward growth of the Tibetan plateau. *Tectonics*, **32**(2): 271—293.