

文章编号: 1006-6616 (2010) 02-0159-17

河西走廊及邻区大震重复周期估算 与未来地震趋势

陈柏林¹, 刘建生², 张永双¹, 刘建民¹, 董 诚¹, 吴乃芬¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 河西走廊是我国中原通往西北地区的重要交通运输要道。受印度板块与欧亚板块于中生代末—新生代早期的碰撞及持续至今的向北推挤作用的远程效应的影响, 河西走廊及邻区是现今地壳活动地区, 其中地震活动为其主要表现形式。已有地震资料分析显示, 公元 1555 年以来划分为 2 个平静期和 2 个活跃期, 现在处于 1920 年以来的第 2 个活跃期内; 而最近 100 年的第 2 个活跃期内又可以划分为 5 个相对平静阶段和 5 个相对活跃阶段, 目前处于 2002 年以来的第 5 个活跃阶段内。从大震重复周期分析, 区内各断裂带发生 7.0~7.5 级大地震的时间间隔为 2000~3000 年左右。结合各断裂带最近一次地震的时间, 推测未来 100 年发生 7 级以上大震可能性很大的区段是三个墩—松山地区、玉门地区、磁窑口—苦水沟地区和嘉峪关地区; 未来 100 年发生 7 级以上大震可能性较大的区段是石包城—昌马大坝区段和高台地区。与地震活动相关的研究工作应该在确认活动断裂的基础上加强大震重复周期的研究与分析。

关键词: 活动断裂; 大震重复周期; 地震趋势; 河西走廊及邻区

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

河西走廊由于其特殊的地理地貌特点决定了其是我国中原通往西北地区的重要交通要道和必经之路。在中国历史上, 这里是我国通往中亚和欧洲丝绸之路的交通要道。沿河西走廊有万里长城西端起点的嘉峪关, 有“沙漠绿洲”之称的甘州(今张掖)、肃州(今酒泉)和凉州(今武威), 还有以“千佛洞”壁画而扬名的敦煌等古今著名的城市, 而玉门市则是我国最早的石油城和石油基地。现在沿河西走廊主要的现代交通运输干线有兰(州)新(疆)铁路、312 国道(上海—伊宁)、连(云港)—霍(城)国家干线高速公路、西气东输管线、西气东输二线、兰新输油管线等, 承担着国家经济建设、西部大开发和对外贸易(欧亚大陆桥)等重要历史使命, 因此河西走廊具有重要的政治、经济和军事战略地位。

河西走廊及邻区主要由 3 个地质构造单元组成, 即南侧为祁连山褶皱带、北侧为阿拉善地块、中间为河西走廊。受印度板块与欧亚板块于中生代末—新生代早期的碰撞及持续至今

收稿日期: 2010-05-05

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(项目编号; 水 [2003] 018-02 和水 [2005] 018-04) 资助。

作者简介: 陈柏林 (1962-), 男, 博士, 研究员, 从事构造地质学和新构造研究。电话: 68486764, E-mail: cblh6299@263.net。

的向北推挤作用的远程效应的影响,河西走廊及邻区是现今地壳活动地区,其中在地壳结构上属于典型的压陷盆地、其南侧的祁连山北缘活动断裂带和北侧的龙首山南缘活动断裂带均以巨大的逆冲(推覆)为特征,尤其是祁连山北缘断裂带的巨大逆冲作用,形成了走廊地区巨厚的中生代沉积物,其中第四系就超过千米,并形成了最具特色的走廊现今地形特征—冲(洪)积物组成的斜坡地貌。同时,阿尔金活动断裂带东段具有强烈的地震和地形变等现今活动,而途经河西走廊的交通运输干线均斜交阿尔金活动断裂带东段。所以,河西走廊及邻区新构造发育、地震活动比较频繁、大地形变明显、具有异常地应力,而且走廊内的断裂往往是现今最活动的断裂,这些可能对主要交通运输干线安全性产生重要的影响。地震活动是新构造活动的最主要表现形式,也是对主要交通运输干线最具有破坏性的新构造活动形式。

对于河西走廊及邻区的新构造活动已经开展了比较详细的研究,并取得重要进展^[1-14]。但是前人侧重于主要活动断裂的全新世活动性、代表性地震的发震构造、地震破坏性等方面的研究,而对以活动断裂的活动性与地震活动的关系,特别是主要活动断裂的大震重复周期和未来地震趋势的研究相对比较少。近几年特别是2008年汶川5.12地震以来,国内也更注重对地震地质、地质灾害和地震机理的研究^[15-23]。本文依据现有的地震记录资料,结合主要活动断裂古地震事件的探槽揭露和识别,并运用该区地震陡坎夷平衰竭经验公式^[24]和热释光技术进行新构造测年,从而对区内主要活动断裂开展未来地震趋势分析和大震重复周期估算。

1 区域构造背景

河西走廊及邻区地处青藏高原东北侧外围,在大地构造上属于甘青地块北部的祁连褶皱系和河西走廊盆地。该区在太古宙—早元古代为陆壳基底形成阶段;中元古代—震旦纪,古陆核解体,形成开阔洋盆,以沉积浅海碳酸盐岩为特征,属于稳定大陆边缘环境,并于新元古代后期形成稳定的大陆克拉通^[25]。震旦纪末—早古生代在大陆克拉通上裂解为坳拉槽,其中在晚寒武世—早奥陶世,坳拉槽达到最大规模,并发育较大面积海相中基性火山岩;中奥陶世开始,坳拉槽趋于减小;在志留纪中晚期发生的“祁连运动”使坳拉槽闭合形成古祁连山,导致褶皱、变质和大规模构造变形,结束了早古生代坳拉槽构造演化阶段^[26];晚古生代—中三叠世古祁连山遭受剥蚀夷平,作为新克拉通盆地的一部分,接受稳定型沉积;中三叠世末由于羌塘板块碰撞的影响,引起印支期的板内构造变形,但没有形成强烈的造山带;中生代—古近纪北祁连山处于准平原化阶段^[25-26]。

在中生代末期,阿尔金断裂带形成;而后在新生代始新世早期开始,由于印度板块向欧亚板块的碰撞和持续至今的向北推挤作用的远程效应的影响,板内变形十分强烈^[27-29]。从新近纪中新世起,阿尔金活动断裂带的大规模左行平移、祁连山的大规模隆升、河西走廊的相对强烈凹陷,至此奠定了现在北祁连山—河西走廊的构造格局^[4, 26, 30-33]。

区内主要断裂构造带有昌马断裂带、祁连山北缘断裂带、河西走廊盆地内断裂带和龙首山南缘断裂带及阿尔金断裂带东段。

昌马断裂带位于祁连山北缘山前以南15~25km的祁连山腹地,沿昌马—祁连县一带延伸,走向北西西,以比较陡的倾角倾向南南西,形成于中生代晚期,以逆冲为主伴有左行走滑位移,沿断裂带发育中生代盆地。该断裂也是一条现代活动断裂^[34];1932年在该断裂

西段发生了 7.6 级昌马大地震。

祁连山北缘断裂带包括旱峡 - 大黄沟断裂、玉门断裂、佛洞庙 - 红崖子断裂、民乐 - 大马营断裂及冷龙岭断裂等。断裂带北西西走向, 由相互平行、呈斜列的多条压扭性断裂组成, 是北祁连山与河西走廊的分界线, 沿走廊南缘长度达 800km 以上; 倾角 $40^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 倾向南西, 形成于中新世 - 上新世^[4, 33, 35-36]。山前主断裂破碎带一般宽数十米, 最宽超过 100m; 断裂带具有强烈的逆冲活动特点, 逆冲断层切割地层时代多, 导致前新生代地层、变质岩及古生代花岗岩体逆冲于新近纪泥岩、早 - 中更新世松散砾石层之上, 其新构造活动强烈, 为地震断裂。其东段冷龙岭断裂于 1927 年发生 8.0 级古浪大地震。

河西走廊盆地内断裂包括文殊山断裂、嘉峪关断裂、阴洼山断裂、新民堡断裂、火烧沟断裂, 榆木山北缘断裂、高台车站断裂及丰乐断裂等。断裂呈 NWW、NW 向延伸, 普遍以中等 - 低倾角 ($15^{\circ} \sim 40^{\circ}$) 为主, 倾向 SW。单条规模一般为 10 ~ 80km。具有形成时代新、新构造活动强烈等特点, 为地震断裂。其中高台车站断裂西端引发 180 年高台大地震^[12-13]。

位于河西走廊及邻区西段的昌马大坝 - 宽滩山一带的阿尔金断裂, 以规模巨大和显示强烈的左行平移活动为特点^[37-38]; 但是其东段各方面特征有所差异, 走向呈北东东向 ($70^{\circ} \sim 80^{\circ}$) 甚至近东西向, 该断裂截切祁连山西段后, 晚新生代位移速率迅速锐减, 反映了阿尔金断裂的巨大走滑位移已经转换为包括祁连山北缘断裂带在内的一系列断裂带的巨大逆冲^[14, 37]。

龙首山南缘断裂位于河西走廊盆地北缘, 呈北西西延伸, 中等倾角 ($30^{\circ} \sim 60^{\circ}$), 倾向北东, 具有明显的新构造活动性, 也是地震断裂。

2 有史以来地震活动阶段性和小周期性

2.1 有史以来主要地震活动

本文用以分析地震活动的地震资料来源: 公元 180 ~ 1993 年的资料, 来源于国家地震局地质研究所等 (1993)^[4] (震级 $M_s \geq 4.7$ 级强震和 $M_s \geq 2.0$ 级弱震)。1994 ~ 2004 年地震资料来源于中国地震局网站 (震级 $M_s \geq 2.8$ 级) (网名: data. earthquake. cn)。其中强震 (震级 $M_s \geq 4.7$) 资料时间公元 180 ~ 2004 年, 弱震 (震级 $M_s \geq 2.0$ 级) 资料时间 1970 ~ 2004 年。

河西走廊及邻区属于祁连山地震亚区^[39]。自公元 180 年以来, 祁连山地震亚区共记载 4.7 级以上地震 110 次 (图 1)。其中所发生的一次 8 级地震、4 次 7 级以上的地震均位于北西 - 北西西向断裂与北北西向构造带的交汇部位。13 次 6 级以上地震绝大部分均由北西 - 北西西向活动断裂、或同一方向的新生代断陷盆地控制。河西走廊盆地及祁连山的部分地区近年发生的 $M_s = 4.7 \sim 6.4$ 级地震主要与北西 - 北西西向或其它方向的断裂及相伴的断陷盆地有关。

2.2 有史以来地震活动时序特征

研究地震活动时序是为了分析未来地震活动的趋势, 为确定地震活动性提供依据。虽然 1900 年之前的地震记录不完整, 但是本区有史以来的地震可以划分为几个活动期和平静期^[4]: 即 1555 年之前为平静期, 1556 ~ 1609 年为第 1 个活跃期, 1610 ~ 1920 年为第 2 个平静期, 1920 年以来为第 2 个活跃期。

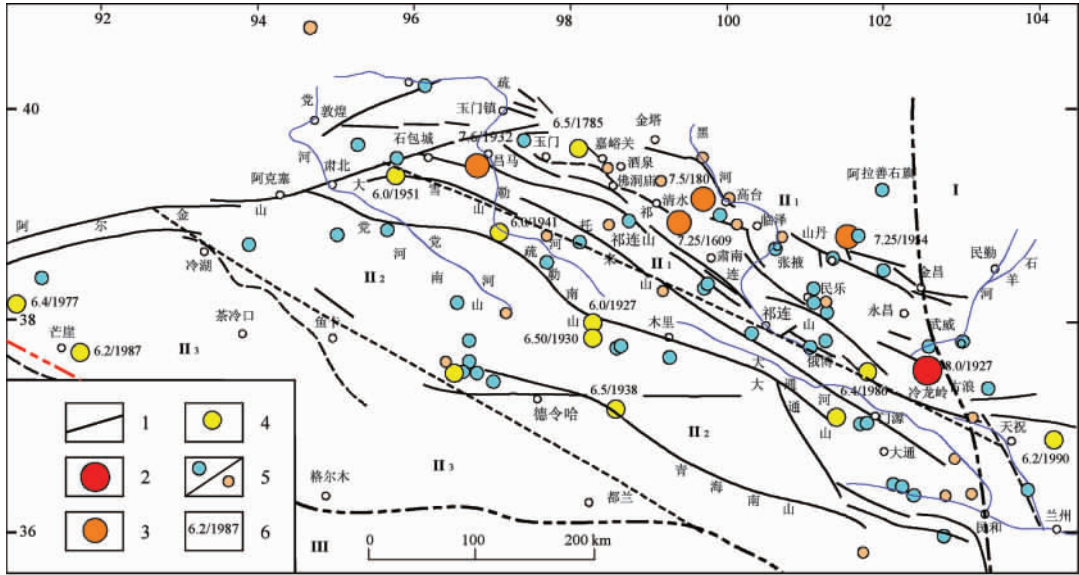


图 1 河西走廊及邻区地震分布图 (据参考文献 [4], 补充 1994~2004 年资料)

Map showing distribution of earthquake in Hexi corridor and its adjacent area

- 1. 活动断裂; 2. 8.0 级地震; 3. 7.0~7.9 级地震; 4. 6.0~6.9 级地震;
- 5. 5.0~5.9 级/4.7~4.9 级地震; 6. 震级/发震时间

I. 宁夏-龙门山地震亚区; II. 祁连山地震亚区 (II₁-河西走廊地震带, II₂-祁连山地震带, 柴达木地震带); III. 托索湖地震亚区 (地震亚区和地震带划分据参考文献 [33])

2.3 近 100 年来地震活动阶段性与周期性

近 100 年来, 由于地震仪器的广泛应用, 特别是 1917 年以来, 本区地震获得较为精确的记录, 这为地震小的周期性和阶段性分析提供了基础数据 (图 2, 表 1)。

表 1 祁连山地震亚区 1900 年以来地震活动阶段划分表

Table 1 Subdivision of of earthquakes active stages in Qilianshan earthquake area since 1900

地震阶段划分		时间范围	持续时间 (a)	各级地震次数					地震 总数	最大 震级	应变能量释放 ($\times 10^3$ J)
阶段	活动性			≥ 8	7.0~7.9	6.0~6.9	5.0~5.9	4.7~4.9			
I	活跃阶段	1900~1916	16								
	平静阶段	1917~1926	10				3	2	5	5.75	3.5
II	活跃阶段	1927~1941	15	1	1	4	10	2	18	8.0	7962
	平静阶段	1942~1950	9				3		3	5.5	0.9
III	活跃阶段	1951~1962	12		1	3	11	3	18	7.25	591.2
	平静阶段	1963~1976	14				3	3	6	5.5	2.3
IV	活跃阶段	1977~1988	12			4	11	3	18	6.4	90.3
	平静阶段	1988~2001	14				2	1	3	5.4	0.8
V	活跃阶段	2002~现在				3	8	5	16	6.3	

注: 据参考文献 [4], 补充 1994~2004 年资料。

从图表中可以看出, 近 100 年来祁连山地震亚区及其包含的祁连山地震带和河西走廊地

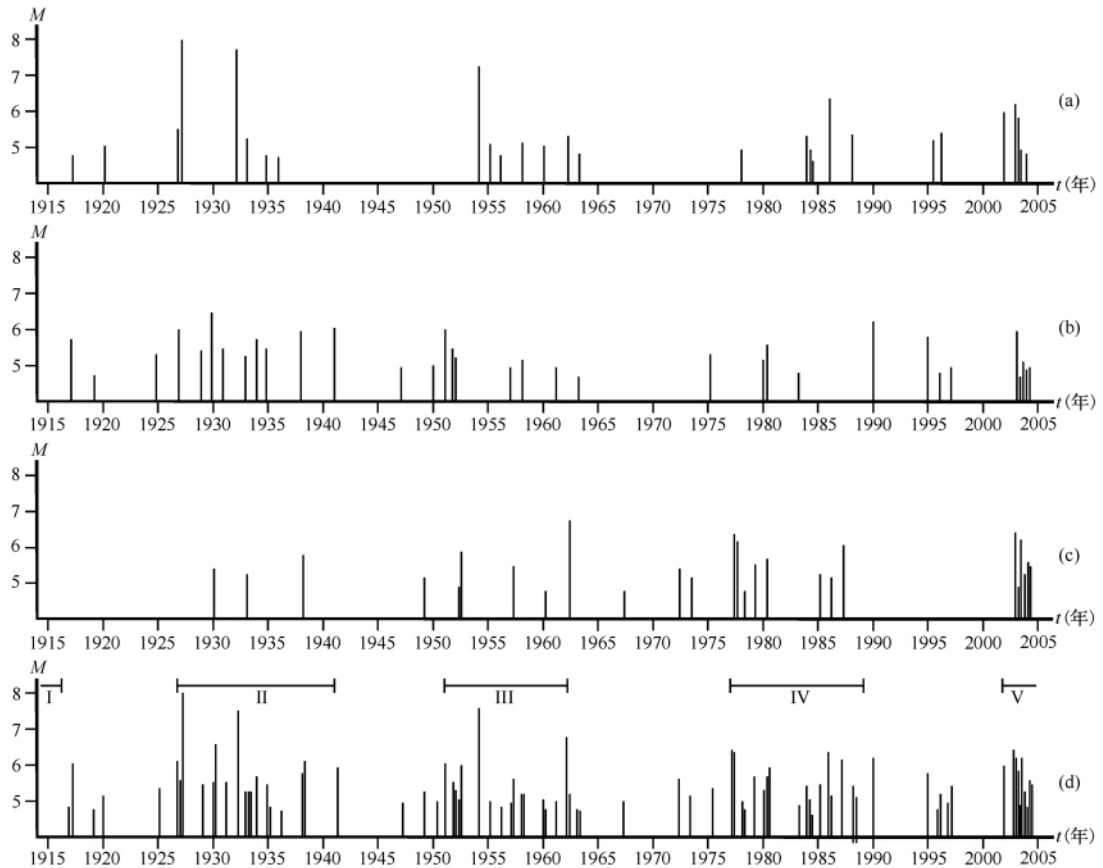


图 2 祁连山地震亚区 1900 年以来地震时序图 (据参考文献 [4], 补充 1994 ~ 2004 年资料)

Fig. 2 Map showing the earthquake chronogenesis in Qilianshan earthquake sub-area since 1900

(a) 河西走廊地震带; (b) 祁连山地震带; (c) 柴达木地震带; (d) 祁连山地震亚区

震带的地震活动具有极为明显的阶段性和周期性。自 1900 年以来, 可以划分为 5 个活动阶段, 周期为 25 年左右, 每个阶段又具有明显的地震活动平静阶段和活跃阶段, 各为 9 ~ 16 年。20 世纪初以来, 在 1900 ~ 1916 年 (注: 由于没有地震记录资料, 依据 1917 年之后的平静阶段和活跃阶段倒推应该是活跃阶段)、1927 ~ 1941 年、1951 ~ 1962 年、1977 ~ 1988 年和 2002 年以来属于活跃阶段, 不仅发震次数多, 而且地震震级也大, 均发生有 6 级以上破坏性地震; 而介于其间的 1917 ~ 1926 年、1942 ~ 1950 年、1963 ~ 1976 年和 1989 ~ 2001 年为地震活动平静阶段, 不仅地震次数少 (仅为活跃阶段的 $1/3 \sim 1/6$), 而且最大震级也小, 都小于 5.8 级, 地震应变能量释放仅为活跃阶段的 $1/100 \sim 1/1000$ ^[4]。

3 活动断裂带大地震重复时间间隔估算

主要发震断裂带的大地震重复时间估算有四种方法, 即古地震事件探槽剖面研究、断层滑动速率估算、历史地震资料和断层崖形态识别。

3.1 古地震事件探槽剖面估算法

通过对昌马地震、红崖堡地震、高台地震、山丹地震和古浪地震相关的发震断裂的地震

地质遗迹（崩积楔、复合型断层陡坎、地震位移断错、地震滑坡及地震堰塞塘等）的探槽揭露和详细研究，总结了河西走廊及邻区主要断裂带的大地震重复时间间隔。

(1) 祁连山北缘断裂带：祁连山北缘断裂带中段清水—红崖堡地区，在 1609 年红崖堡地震之前，该断裂至少发生过 2 次 7~7.5 级的古地震事件，分别距今 2100 年和 4230 年。所以该断裂带大地震重复时间间隔为 1925 年^[4]。在祁连山北缘断裂带中段的榆木山地区，沿榆木山北缘断裂发生过 3 次明显的古地震事件，分别在距今 3400 年、8500 年和 10500 年，其大地震平均重复时间间隔为 3400 年^[4,13]。而榆木山北侧的高台车站断裂在距今 19000 年以来经历了 5 次明显的古地震事件，其中距今 13000 年以来经历了 4 次古地震事件，最近一次在距今 2000~3000 年左右，高台地震距今 1800 年，接近在最近一次古地震事件时间范围内^[12]。因此，该断裂带大地震平均重复时间间隔为 3700 年^[12]。祁连山北缘断裂带西段的次级断裂之一的玉门断裂，据闵伟等（2002）^[8]和陈柏林等（2005）^[11]研究资料，推算大地震重复时间间隔为 3200~3800 年。

(2) 昌马断裂带：昌马活动断裂带西段的三个泉、捷大坂和大泉口剖面均反映该断裂带经历了 3~4 次古地震事件，其中捷大坂剖面 4 次古地震的事件（含昌马地震）分别距今 74 年、3000 年、4000 年和 5500 年。所以该地区 7.5 级大地震重复时间间隔为 1800 年^[34]昌马活动断裂带东段的雷公山—毛毛山地区，在距今 3500 年发生过垂直断距达 2m 的古地震事件，说明该地区断裂带大地震重复时间间隔为 3500 年^[5,34]。

(3) 阿尔金断裂带：通过在阿尔金断裂带红柳峡和沙坪一带的古地震剖面及其年代学研究，该断裂带大地震重复时间间隔为 2700~2900 年^[14,40]。

3.2 运用断层滑动速率估算大地震重复时间间隔

在地壳岩石中，由于具有一定的温度和压力，尤其是在较长时间处于均一的构造应力作用下，一条断层的位移滑动都表现为地震性的弹性位错（粘滑）和非地震性塑性变形（蠕滑）两部分，以及介于两者之间的弹塑性和粘弹性变形。在地震学研究中，将中大地震引起的粘滑位移称为一条断裂带的地震位移，其速率为地震滑动速率，而该断裂带由粘滑和蠕滑位移总和称为地质位移，其速率为地质滑动速率。

已有研究成果显示，大多数活动断裂带地质滑动速率比地震滑动速率大许多。但是由于活动断裂带的内部结构、物质组成的不同，断裂带周围地质环境因素（边界条件、温度压力的大小、应力作用方向和大小等）的变化，不同断裂带的粘滑位移与蠕滑位移的量级关系也是不同的。长期历史地震资料的积累、跨断裂带的应变测量资料的积累是研究一条断裂带粘滑位移与蠕滑位移的量级关系的重要方法，同时断层的地貌形态（纹沟的直线拐弯中的错断段和牵引变形段）也是研究一条断裂带粘滑位移与蠕滑位移量级关系的直观的地质方法（图 3（a））。

国家地震局兰州地震研究所（1992）^[34]、国家地震局阿尔金活动断裂课题组（1992）^[40]和国家地震局地质研究所等（1993）^[4]对区内主要活动断裂带的粘滑位移与蠕滑位移的量级关系进行了研究，昌马活动断裂带的地质位移中有 60% 以地震位移形式表现出来，阿尔金断裂东段断裂带的地质位移中有 80% 是地震位移，而祁连山北缘断裂带的地质位移中有 70% 是粘滑位移。

通过对河西走廊及邻区 5 个大于 6.4 级地震的地震位移数据与震级作对数关系图（图 3（b）），可以求得地震—位错的经验公式，即本区内 6.5、7.0、7.5、8.0 级地震的地震位移分别为 80cm、200cm、360cm 和 760cm。结合发震断裂带的地震位移速率，就可以估算各断

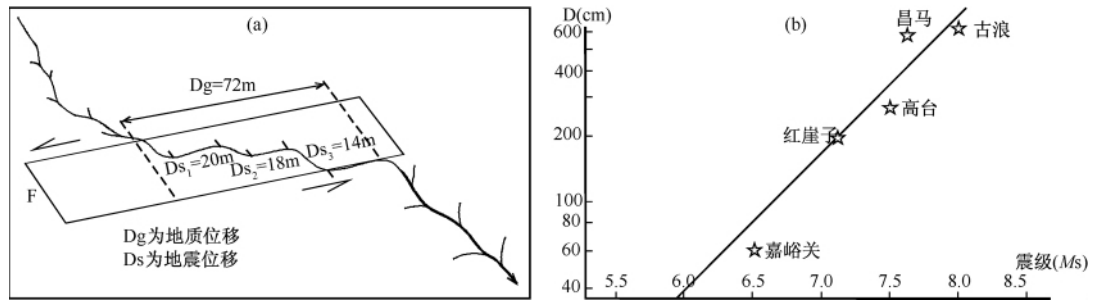


图 3 断层水系位错及位移与地震震级的关系 (据参考文献 [4] 修改编制)

Fig. 3 Map showing the river system dislocation and fault displacement related to the earthquake magnitude

(a): 阿尔金断裂大泉口水系位错形式; (b): 河西走廊 - 祁连山北缘地区震级 - 位错量关系图

裂带不同区段相应震级地震的重复间隔时间 (表 2)。

表 2 河西走廊及邻区主要活动断裂带由滑动速率求得的大震重复间隔时间

Table 2 Time interval of major earthquakes estimated from slip speed of main active fault zone in Hexi corridor and its adjacent area

断裂名称	断裂区段名称	长与宽 (km)	平均地质滑动速率 (mm/a)	蠕缩量占总位移比例	平均地震滑动速率 (mm/a)	各类震级地震的理论重复间隔 (a)				资料来源
						6.5	7.0	7.5	8.0	
祁连山北缘断裂带	玉门—佛洞庙	80 × 25	1.8	0.30	1.26	635	1587	2857	6032	本文
	清水—红崖子	30 × 25	3.0	0.30	2.10	381	952	1717	3610	
	苦水沟—石炭沟	45 × 25	2.2	0.30	1.54	519	1299	2338	4935	
	大磁窑—苦水沟	40 × 25	2.4	0.40	1.44	556	1389	2500	5278	
	武威以南	55 × 25	3.1	0.20	2.40	333	833	1500	3166	
昌马断裂带	石包城—小口子	80 × 25	2.6	0.45	1.43	559	1398	2517	5314	据参考文献 [4]
	红崖子—大泉口	60 × 25	3.0	0.40	1.80	444	1111	2000	4222	
	三个墩—乌鞘岭	55 × 25	4.0	0.70	1.20	667	1667	3000	6333	
	毛毛山—松山	60 × 25	4.9	0.80	0.98	816	2041	3673	7755	
阿尔金断裂东段 (石包城西—昌马大坝段)		100 × 25	4.5	0.80	0.90	889	2222	4000	8444	

3.3 由历史地震资料估算大震重复间隔

把一个断裂带近似地看成一个简单的平面剪切带，并设想断裂带内所有地震都发生破裂位移。那么整个断裂带内的总的地震位移与总的地震矩和断层面积具有函数关系： $\Sigma U = \mu A_0 \Sigma M_0$ 。

式中 U 是地震位移， A_0 为断层面积， M_0 为地震矩， μ 为常数 (不同地区有差异)。

应用上述公式结合我国西部地区的 $M_s - M_0$ 的关系，可求得区内各断裂带平均地震滑动位移速率，并以此估算累计相应震级地震位错所需的时间，即各断裂带大震平均重复间隔 (表 3)。

祁连山北缘断裂带自 1609 年以来，有古浪 8 级地震、红崖堡 7.25 级地震、嘉峪关 6.5 级地震和 3 次 6 级地震 (其中 2 次为 1927 年古浪地震的余震)。其总地震矩为 $31.5 \times 10^{21} \text{ N} \cdot \text{cm}$ ，总地震位错为 70.6cm，平均地震位错速率为 1.9mm/a (表 3)。由此计算区内各断裂

带 6.0、6.5、7.0、7.5 级地震的重复间隔时间分别为 210、421、1053、1895 年，8.0 级地震的重复间隔时间为 4000 年（表 3）。其它断裂带的总地震矩、平均地震位错速率和大震重复间隔时间均见表 3。

表 3 由历史地震资料估算的河西走廊及邻区平均地震位移及大震重复间隔（据参考文献 [4]）

Table 3 Displacement and time interval estimated from historic earthquake information in Hexi corridor and its adjacent area

断裂区段名称	长宽深 (km)	统计时间段	统计震 级范围	总地震矩 ($N \cdot cm$)	地震位移 (cm)	平均地震滑动 速率 (mm/a)	地震重复间隔 (a)				
							6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
祁连山北缘断裂带	540 × 100 × 25	1609 ~ 1988	≥6.0	31.5×10^{21}	70.6	1.0	210	421	1053	1895	4000
昌马断裂带西段	200 × 60 × 25	1440 ~ 1988	≥5.5	9.46×10^{21}	57.3	0.98	408	816	2041	3673	7755
阿尔金断裂带东段	200 × 40 × 25	1832 ~ 1988	≥5.5	2.52×10^{21}	16.1	1.0	400	800	2000	3600	

3.4 运用断层崖形态识别估算大地震重复时间间隔

断层崖是指断层错动事件（主要是垂向位移）中形成的沿断层发生的地貌陡坎，复合型断层崖是指多次断层错动事件形成的断层地貌陡坎。断层崖剖面形态特征是辨认多次断层位错事件的标志，较大的断层崖高度（断距）及其坡度、显著的坡度间断点和平剖面不对称是识别多次地震断层事件的重要标志。断层崖的内部结构（通过探槽揭露，包括多期断层崩积楔、崩积楔的期次、崩积楔的沉积物特征等）是断层古地震事件的直接证据。

Harks 等 (1984)^[24] 最早建立了复合型断层崖演化模式，经有关学者的研究和改进^[41, 42]，提出了一套通过野外直接测量断层崖剖面数据、用坡矩（ M ，即某时间段内断层崖受剥蚀（或者接受堆积）的体积）反演扩散年龄的方法。经过复杂的微积分计算和简化，最后形成如下递进超越函数方程组^[4, 42]：

$$\begin{cases} \tau_0^{n+1} = [(3n+1)/(n+1)]\tau_0^1 + [2n/(n+1)] [(\tau_{app}^n/\pi)^{1/2}](a/\alpha) + [n/(n+1)]\tau_{app}^n \\ \tau_{app}^n = \tau + \tau_0^n \end{cases}$$

式中 n 为复合型断层崖断层错动次数、 τ_0^1 为最后一次活动时间、 a 为断层累计半错距、 α 为断层面坡度、 τ_{app}^n 为断层崖第 n 次活动视扩散年龄、 τ 为断层重复活动间隔。

依据上式，选择阿尔金断裂带东段地区的扩散系数为 1.5（由沉积物年代、成分、固结程度、坡度、降水量，冲刷侵蚀条件决定^[4, 40, 42]）可以求得阿尔金断裂带东段（青石峡—骆驼泉）断层崖形态年龄参数（表 4）。其中青石峡段 2 次地震事件、2.40m 的断层崖剖面，可求得断层平均重复间隔时间为 2.38ka，断层最早活动时间为 4.76ka；3 次地震事件、3.60m 的断层崖剖面，可求得断层平均重复间隔时间为 1.86 ~ 2.25ka，断层最早活动时间为 5.58 ~ 6.75ka。骆驼泉段 2 次地震事件、2.84 ~ 3.20m 的断层崖剖面，可求得断层平均重复间隔时间为 2.53 ~ 3.59ka，断层最早活动时间为 5.06 ~ 7.18ka，3 次地震事件、4.50m 的断层崖剖面，可求得断层平均重复间隔时间为 4.04ka，断层最早活动时间为 12.12ka（表 4）。

选择昌马断裂石包城—大泉口段地区的扩散系数 2.5^[4, 34, 42]，可以求得昌马断裂带石包城—大泉口段断层崖形态年龄参数 0.056ka，断层平均重复间隔为 1.68 ~ 2.29ka（表 4）。

榆木山北缘断裂石炭沟断层崖 13.50 ~ 16.00m，取扩散系数 3.0^[4, 42]，可以求得断层平均重复间隔为 2.8 ~ 3.1ka；梧桐泉一带绿泉河年轻洪积扇上的 2.7m 的断层崖，断层平均重

复间隔为 4.62ka。

表 4 阿尔金断裂带东段(青石峡—骆驼泉)断层崖形态年龄参数表(据参考文献[4])

Table 4 Age parameters of fault scarp in the eastern part of Alyu Tagh fault

剖面位置		累计断距 $\Sigma 2a$ (m)	一次事件 断距 $2a$ (m)	事件 次数 (n)	断层面 坡度 (α)	原始面 坡度 (β)	视扩散年龄 (τ_{app}) (ka)	断层重复间隔 时间 (ka)		扩散系 数 k	断层形 成时代 (ka)
位置	剖面号							$\tau = kt$	t		
青石峡	871030-7	3.60	1.19	3	3.73	0.07	6.10	2.79	1.86	1.5	5.58
	871030-5	3.60	1.20	3	3.73	0.01	7.30	3.37	2.25	1.5	6.75
	871030-4	2.40	1.20	2	3.73	0.05	5.60	3.57	2.38	1.5	4.76
骆驼泉	871030-3	2.84	1.42	2	3.73	0.06	6.00	3.80	2.53	1.5	5.06
	871030-2	3.20	1.60	2	3.73	0.08	8.50	5.39	3.59	1.5	7.18
	871030-1	4.50	1.50	3	3.73	0.05	13.40	6.06	4.04	1.5	12.12
大泉口东	DQK-3	9.60	1.20	8	2.75	0.01	18.5	4.19	1.68	2.5	0.056
大泉口西	DQK-12	12.4	1.5	8	2.75	0.02	25.4	5.72	2.29	2.5	0.056

3.5 主要断层的大震重复时间间隔综合分析

在活动断裂带探槽揭露、年代学测定的基础上,结合断层滑动速率、历史地震资料和断层崖形态识别等方法,估算了河西走廊及邻区主要断层的大震重复时间间隔。但是不仅各种方法之间估算结果有差异,也与探槽揭露、年代学测定结果以及实际发生的地震时间存在某些差异。本小节就此进行综合分析和总结。

(1) 阿尔金断裂带石包城—昌马大坝地区:综合估算发生 7 级地震的平均重复间隔时间 2200 年,7.5 级地震的平均重复间隔时间 4000 年。实际情况在青石峡—骆驼泉一带洪积扇上,最新一级陡坎 1.0m,较老一级陡坎 4~6m,说明该断裂在全新世发生国过 2~3 次 7.5 级地震。用断层陡坎法测算的实际地震发生时间与理论估算是比较接近的(表 5)。

(2) 昌马断裂带西段大泉口—捷大坂地区,综合估算发生 7 级地震的平均重复间隔时间 1111a,7.5 级地震的平均重复间隔时间 2000 年,8.0 级地震的平均重复间隔时间 4222a。实际情况在捷大坂剖面,包括 1932 年 7.6 级昌马地震在内发生 4 次大地震事件,7.5 级地震平均重复间隔为 1814 年;在大泉口地区,7.5~8.0 级地震平均重复间隔为 3333 年^[4-5];理论估算与实际地震发生时代比较接近(表 5)。

(3) 昌马断裂带东段三个墩—松山地区:综合估算发生 7 级地震的平均重复间隔时间 2041 年,7.5 级地震的平均重复间隔时间 3673 年。实际情况在松山附近 8.0m 高的断层陡坎发生过 4 次地震,平均重复间隔 2270 年^[4-5];两种结果非常接近(表 5)。

(4) 祁连山北缘断裂带西段玉门地区:综合估算发生 7 级地震的平均重复间隔时间 1587 年,7.5 级地震的平均重复间隔时间 2857 年。实际情况沿玉门断裂带在大红泉—冰沟口附近探槽记录于 7600 年、和 3200 年发生过 2 次 7.5~8.0 级地震^[4,8,11],同时在距今 220 年(1785)在玉门北侧 30km 的新民堡发生 7.25 级地震^[43],三次地震平均重复间隔 3600a;介于 7.5~8.0 级地震估算间隔之间,两种结果比较吻合(表 5)。

(5) 祁连山北缘断裂带西段清水—红崖子地区:综合估算发生 7 级地震的平均重复间隔时间 952 年,7.5 级地震的平均重复间隔时间 1717 年,8.0 级地震的平均重复间隔时间 3619 年。实际情况在红崖堡一带探槽剖面揭露在距今 4230 年和 2100 年发生过 2 次 7.5 级左

右的古地震,同时在1609年发生了7.25级地震,平均重复间隔1925年^[4];两种结果比较接近(表5)。

表5 河西走廊及邻区主要活动断裂带大震重复时间间隔(据参考文献[4],补充本文资料)

Table 5 Time interval of major earthquakes in main active fault zone in Hexi corridor and its adjacent area

断裂带名称	地区	平均地震重复间隔时间(a)				实际地震事件、期次、距今年代(a)				实际地震	
		6.5	7.0	7.5	8.0	IV	III	II	I	间隔(a)	震级
阿尔金断裂	石包城—昌马大坝	889	2222	4000	8444		12120	8080	4040	4040	7.5
昌马断裂带	捷大坂		1111	2000	4222	5500	4000	3000	70	1814	7.5
	大泉口		1111	2000	4222	10000	8000	4000	70	3333	7.6
	三个墩—松山	816	2041	3673	7755	9080	6810	4540	2270	2270	7.0
祁连山北缘断裂带	玉门	635	1587	2857	6032		7400	3200	220	360	7.7
	清水—红崖子		952	1717	3619		4230	2100	380	1925	7.5
	高台南		1299	2338	4935		800	6539	1809	3095	7.5
	磁窑口—苦水沟		1389	2500	5278		10500	7200	3700	3400	7.5
	武威南		833	1500	3166		6000	3000	75	3000	8.0
嘉峪关断裂	嘉峪关						9660	6440	3220		

(6) 祁连山北缘断裂带中段高台地区:综合估算发生7级地震的平均重复间隔时间1299年,7.5级地震的平均重复间隔时间2338年,8.0级地震的平均重复间隔时间4935年。实际情况在榆木山北缘断层陡坎显示在距今8000年以来发生过2次7.5~8.0级大地震,同时在180年发生了7.25级地震,3次地震平均重复间隔3095年^[4,12];两种结果差异不大(表5)。

(7) 祁连山北缘断裂带中段磁窑口—苦水沟地区:综合估算发生7级地震的平均重复间隔时间1389年,7.5级地震的平均重复间隔时间2500年,8.0级地震的平均重复间隔时间5278年。实际情况在黑河口探槽和断层陡坎显示在距今10500年、7200年和3700年发生过3次7.5~8.0级大地震,平均重复间隔3400年^[4];两种结果也是比较吻合的(表5)。

(8) 祁连山北缘断裂带东段武威南一带地区:综合估算发生7级地震的平均重复间隔时间833年,7.5级地震的平均重复间隔时间1500年,8.0级地震的平均重复间隔时间3166年。该区在1927年发生了8.0级古浪大地震,沿皇城—塔儿庄一带发育与古浪地震有关的断层陡坎和山体滑塌断错。而在王家新庄,沿古浪地震断层陡坎南侧的山前地带,可见有高达13m的断层陡坎,陡坎坡角为30°,初步估算属于全新世中期(6000年)以来2次8级左右大地震所形成,平均重复间隔3000年^[4];两种结果也非常接近(表5)。

(9) 嘉峪关断裂高达4.2m的断层陡坎含3次古地震事件,每次位错量1.4m,平均重复间隔时间3220年^[4]。人类有文字记载以来未有地震记录(表5)。

总之,区内各断裂带发生7.0~7.5级大地震的时间间隔为2000~3000年左右。

4 未来发生大地震可能性预测

通过综合分析河西走廊及邻区发生大地震的重复时间间隔,并与实际发生的古地震和历史地震及其时间间隔进行了对比。本节将在对区内不同区段地震重复时间间隔不均一性分析

的基础上，对区内不同区段未来发生大地震的可能性进行预测。

4.1 全新世时期（12000 年以来）区内地震活动阶段

将河西走廊及邻区 9 个地段（断裂带）的古地震和历史地震发生的距今时间作图（图 4），虽然各个区段地震重复时间间隔存在差异，但是从全区宏观到分析，地震活动仍然存在一定的规律性。

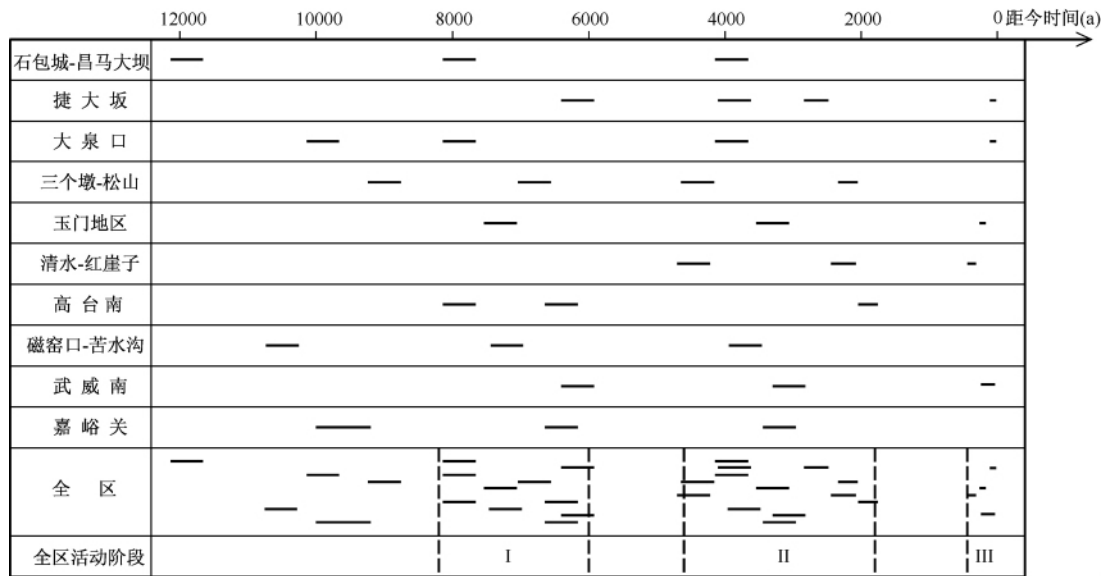


图 4 河西走廊及邻区全新世时期（12000 年以来）大震发生时间统计图

Fig. 4 Cartogram showing the major earthquake time in Holocene (since 12000 years) in Hexi corridor and its adjacent area (据参考文献 [4], 补充 1994~2004 年资料修改编制)

在全新世时期（距今 12000 年以来），区内地震活动可以分为 2 个大时期，其一是距今 12000 年~8200 年期间，地震活动比较分散，这是由于各个区段大震重复间隔存在差异，导致各个区段综合的全区地震期次时出现相互交叉，而没有明显的集中趋势；其二是距今 8200 年以来，全区地震活动阶段性非常明显，可以分为 3 大活跃阶段和 2 个安静阶段：

(1) 距今 8200 年~6000 年地震活动非常活跃阶段：在 2200 年的时间内发生 7 级以上大地震达 10 次之多，相当于平均 220 年发生一次 7 级以上大地震；

(2) 距今 6000 年~4600 年安静阶段：在近 1400 年的时间内地震活动非常微弱，基本上没有发生 7 级以上大地震；

(3) 距今 4600 年~1800 年地震活动非常活跃阶段：在 2800 年的时间内发生 7 级以上大地震达 13 次之多，也相当于平均 220 年发生一次 7 级以上大地震；

(4) 距今 1800 年~400 年安静阶段：在近 1400 年的时间内地震活动非常微弱，基本上没有发生 7 级以上大地震；

(5) 距今 400 年~现在地震活动非常活跃阶段：在 400 年的时间内发生 7 级以上大地震达 4 次之多，相当于平均 100 年发生一次 7 级以上大地震，全区大震间隔明显趋短，这表明最近 400 年以来，本区处于全新世地震活动的最活跃阶段。

4.2 未来 1000 年和 100 年河西走廊 - 祁连山北缘地区大震可能性预测

(1) 未来 1000 年全区大震可能性预测

根据全新世时期全区地震活动阶段特点,目前本区处于全新世地震活动的最活跃阶段。如果按照全新世早中期(距今8200年)以来的阶段性特点,现在这个活跃阶段还将持续1800年~2000年,还将发生6~10次7级以上大地震。

(2) 未来100年全区大震可能性预测

将实际地震重复时间间隔与理论震重复时间间隔进行对比,并求得各个区段综合平均大震重复间隔(表6)。

根据综合平均重复间隔与区段内最近一次地震距今时间,可以推测未来100年该区段发生大震的可能性。预测结果分为三个层次,可能性很大、可能性较大、无可能性。具体结果详见表6。

表6 河西走廊及邻区大震重复间隔与未来100年全区大震可能性预测

(据参考文献[4],补充本文资料)

Table 6 Time interval and forecast of major earthquake in coming 100 years in Hexi corridor and its adjacent area

地区	实际地震重复间隔		平均理论地震重复间隔(a)				综合平均大震重复间隔(a)			最近1次7级以上地震距今时间(a)	未来100a发生7级以上大地震的可能性
	震级	时间(a)	6.5	7.0	7.5	8.0	7.0	7.5	8.0		
石包城—昌马大坝	7.6	4047	889	2200	4000	8400	2200	4023		2220	有
捷大坂	7.5	1814		1111	2000	4222		1907		70	无
大泉口	7.5	3333		1111	2000	4222		2667		70	无
三个墩—松山	7.0	2270	1143	2500	4500		2041			2270	有,很大
玉门	7.5	3600	635	1587	2857	6032		3230		3200	有,很大
清水—红崖子	7.5	1925		952	1717	3619	952	1821		380	无
高台南	7.5	3095		1299	2338	4935	1299	2716		1820	有
磁窑沟—苦水沟	7.5	3400		1389	2500	5278	1389	2950		3700	有,很大
武威南				833	1500	3166		1500	3166	75	无
嘉峪关	7.5	3200						3200		3200	有,很大

a. 发生7级以上大震可能性很大的区段是昌马断裂带东段三个墩—松山地区、祁连山北缘断裂带西段的玉门地区、祁连山北缘断裂带中段的磁窑口—苦水沟地区和嘉峪关断裂带的嘉峪关地区(表6)。三个墩—松山地区最近一次7级以上地震发生的距今时间为2270年,已超过该区段发生7级地震的平均重复间隔2041年;玉门地区最近一次7级以上地震发生的距今时间为3200年,已经非常接近该区段发生7.5级地震的平均重复间隔3230年;磁窑口—苦水沟地区最近一次7级以上地震发生的距今时间为3700年,已超过该区段发生7.5级地震的平均重复间隔时间2950年;嘉峪关地区最近一次7级以上地震发生的距今时间为3200年,已达到该区段发生7.5级地震的平均重复间隔3200年(表6)。

b. 发生7级以上大震可能性较大的区段是阿尔金断裂带东段的石包城—昌马大坝区段和祁连山北缘断裂带高台南地区。石包城—昌马大坝区段地段最近一次7级以上地震发生的距今时间2220年,已经达到该区段发生7级地震的平均重复间隔2200年;高台南地区最近一次7级以上地震发生的距今时间是1820年,已超过该区段发生7级地震的平均重复间隔1299年,但是还没有达到该区段发生7.5级地震的平均重复间隔2716年(表6)。

c. 没有发生7级以上大震可能性的区段是昌马断裂带西段捷大坂—大泉口地区和祁连山北缘断裂带中段清水—红崖子地区、祁连山北缘断裂带东段武威以南地区(表6),这些地区最近一次7级以上地震发生的距今时间比较短,远小于该区段发生7级地震的平均重复

间隔时间。

5 结论和讨论

河西走廊是我国中原通往西北地区的重要交通运输要道。受印度板块与欧亚板块于中生代末—新生代早期的碰撞及持续至今的向北推挤作用的远程效应的影响, 河西走廊及邻区是现今地壳活动地区, 其中地震活动为其主要表现形式。已有地震资料分析显示, 公元 1555 年以来地震活动划分为 2 个平静期和 2 个活跃期, 现在处于 1920 年以来的第 2 个活跃期内; 而近 100 年来的第 2 个活跃期内又可以划分为 5 个相对平静阶段和 5 个相对活跃阶段, 目前正处于 2002 年以来的第 5 个活跃阶段内。

从大震重复周期分析, 区内各断裂带发生 7.0 ~ 7.5 级大地震的时间间隔为 2000 年 ~ 3000 年左右。结合各断裂带最近一次发生地震的时间, 推测未来 100 年发生 7 级以上大震可能性很大的区段是昌马断裂带东段三个墩—松山地区、祁连山北缘断裂带西段的玉门地区、祁连山北缘断裂带中段的磁窑口—苦水沟地区和嘉峪关断裂带的嘉峪关地区; 未来 100 年发生 7 级以上大震可能性较大的区段是阿尔金断裂带东段的石包城—昌马大坝区段和祁连山北缘断裂带高台南地区。而昌马断裂带西段捷大坂—大泉口地区和祁连山北缘断裂带中段清水—红崖子地区、祁连山北缘断裂带东段武威以南地区在最近 400 年来已经发生过 7.0 ~ 7.5 级大地震, 因此未来 100 年发生 7 级以上大震可能性比较小, 是相对最安全的地区。当然地震活动是非常复杂的, 上述推测的未来 100 年发生 7 级以上大震可能性只是相对的。

从大震重复周期及未来地震趋势来看, 如果是已经确认的活动断裂, 即距今 12000 年以来发生过多次地震和新构造活动的断裂, 那么距今越长时间没有发生过地震 (已经接近或超过大震重复周期, 或者没有人类文史记录过地震) 的地区, 就是未来 100 年地震危险性越大的地区。相反在近期 (三四百年以来) 发生过大地震的地区, 却是比较安全的地区。

虽然地震的预报是困难的, 还有许多自然规律值得我们继续深入的研究和探索, 但是作为研究地震及发震构造相关的调查研究单位和部门应该通过对活动断裂的详细探槽揭露探测和运用精确的测年技术等方法, 加强活动断裂带及其大震重复周期的研究工作, 总结地震活动的一些规律性认识, 为国家防震减灾做点实事、而不应该总是“跟着地震后面跑” (即在地震发生后才在地震区开展大量的调查与研究)。

参 考 文 献

- [1] 时振梁, 环文林, 谢原定. 河西走廊西部的活动断层与地震, 中国活动断裂 [C], 地震出版社, 1982. 212 ~ 218.
SHI Zhen-liang, HUAN Wen-lin and XIE yuan-ding. Active faults and earthquakes in west part of Hexi Corridor [A]. Active faults in China. Beijing: Seismological Press, 1982. 212 ~ 218 (in Chinese).
- [2] 向宏发, 毓顺民. 河西走廊玉门—嘉峪关地区活动断裂的初步研究 [C]. 现代地壳运动研究 (5). 北京: 地震出版社, 1990. 139 ~ 145.
XIANG Hong-fa and GUO Shun-min. Preliminary study on active faults in Yumen-Jiayuhuan area of Hexi Corridor [A]. In: Institute of Geology, SSB, ed. Research on Recent Crustal Movement (5). Beijing: Seismological Press, 1990. 139 ~ 145 (in Chinese).
- [3] 毓顺民, 向宏发, 黄昭, 等. Tapponnier P and Peltzer G. 祁连山—河西走廊断裂带与地震. 中法合作活断层对比研究 [C]. 北京: 地震出版社, 1993, 94 ~ 102.
GUO Shun-min, XIANG Hong-fa, HUANG Zhao, et al. Qilian Mountain-Hexi corridor active fault zone and earthquake.

- Comparison studing of active faults on China-France cooperation [C]. Beijing: Seismological Press, 1993. 94 ~ 102 (in Chinese).
- [4] 国家地震局地质研究所, 国家地震局兰州地震研究所. 祁连山-河西走廊活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社, 1993. 1 ~ 340.
Institute of Geology, SSB and Lanzhou Institute of Seismology, SSB. Active faults in Qilian mountain and Hexi corrdor [M]. Beijing: Seismological Press, 1993. 1 ~ 340 (in Chinese).
- [5] Peltzer G, Tapponnier P, Gaudemer Y, 等. 昌马断裂的晚第四纪地貌断错、滑动速率及大地震重复 [M]. 中法合作活断层对比研究, 北京: 地震出版社, 1993. 123 ~ 143.
Peltzer G, Tapponnier P, Gaudemer Y, et al. Offsets of late Quaternary morphology, rate of slip, and recurrence of large earthquakes on the Changma fault, Gansu, China. Comparison studing of active faults on China-France cooperation. Beijing: Seismological Press, 1993. 123 ~ 143 (in Chinese).
- [6] 才树华, 向宏发, 李伯栋, 等. Tapponnier P, Meyer B. 祁连山北缘断裂带中段全新世活动特征及其与地震的关系. 中法合作活断层对比研究 [C]. 北京: 地震出版社, 1993. 113 ~ 122.
CAI Shu-hua, XIANG Hong-fa, LI Bo-dong et al. Tapponnier P and Meyer B. Holocene faulting and its relation to earthquake in the central segment of the northern Qilianshan fault zone. Comparison studing of active faults on China-France cooperation. Beijing: Seismological Press, 1993. 113 ~ 122 (in Chinese).
- [7] 陈文彬, 刘百箴, 徐锡伟, 等. 祁连山西段玉门断裂晚第四纪活动特征及相关问题的讨论 [J]. 西北地震学报, 1999, 21 (4): 389 ~ 394.
CHEN Wen-bin, LIU Bai-chi, XU Xi-wei et al. Activity of the Yumen fault, western Qilian mountains, During late Quaternary and its implication to regional tectonic movements [J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21 (4): 389 ~ 394 (in Chinese with English abstract).
- [8] 闵伟, 张培震, 何文贵, 等. 酒西盆地断层活动特征及古地震研究 [J]. 地震地质, 2002, 24 (1): 35 ~ 44.
MIN Wei, ZHANG Pei-zhen, HE Wen-gui, et al. Reseach on the active faults and paleoearthquakes in the western Jiuquan basin [J]. Seismology and Geology, 2002, 24 (1): 27 ~ 34 (in Chinese with English abstract).
- [9] 何文贵, 刘百箴, 袁道阳, 等. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究 [J]. 西北地震学报, 2000, 22 (1): 90 ~ 97.
HE Wen-gui, LIU Bai-chi, YUAN Dao-yang, et al. Resarch on slip rates of the Lenglongling active fault zone. Northwestern Seismological Journal, 2000, 22 (1): 90 ~ 97 (in Chinese with English abstract).
- [10] 何文贵, 郑文俊, 赵广堃, 等. 2002年12月14日玉门5.9级地震震震构造研究 [J]. 地震地质, 2004, 26 (4): 688 ~ 697.
HE Wen-gui, ZHANG Wen-jun, ZHAO Guang-kun, et al. Study on the seismogenic structure of the Yumen, Gansu province 5.9 M_s earthquake of December 14, 2002 [J]. Seismology and Geology, 2004, 26 (4): 688 ~ 697 (in Chinese with English abstract).
- [11] 陈柏林, 刘建生, 张永双, 等. 玉门断裂全新世活动特征及其与玉门地震的关系 [J]. 地质论评, 2005, 51 (2): 138 ~ 142.
CHEN Bai-lin, LIU Jian-sheng, ZHANG Yong-shuang, et al. Activity of the Yumen fault during Holocene epoch and its relation to Yumen earthquake [J]. Geological Review, 2005, 51 (2): 138 ~ 142 (in Chinese with English abstract).
- [12] 陈柏林, 刘建民, 刘建生, 等. 高台车站断裂全新世活动特征 [J]. 地质学报, 2006, 80 (4): 497 ~ 507.
CHEN Bai-lin, LIU Jian-min, LIU Jian-sheng, WANG Chun-yu, ZHANG Yong-shuang, DONG Cheng and WU Nai-fen. Study on the Activity and Chronology of the Gaotai Railway Station Fault During Holocene Epoch [J]. ACTA Geologica Sinica, 2006, 80 (4): 497 ~ 507 (in Chinese with English abstract).
- [13] 陈柏林, 王春宇, 宫红良, 等. 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 [J]. 地质通报, 2007, 26 (8): 976 ~ 983.
CHEN Bai-lin, WANG Chun-yu, GONG Hong-liang, LIU Jian-min, ZHANG Yong-shuang and LIU Jian-sheng. A new understanding of the characteristics of Late Quaternary activity of the northern Yumushan marginal fault in the Hexi corridor, northwestern China [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26 (8): 976 ~ 983 (in Chinese with English abstract).
- [14] 陈柏林, 刘建生, 王春宇, 等. 阿尔金断裂昌马大坝一宽滩山段全新世活动特征 [J]. 地质学报, 2008, 82 (4): 433 ~ 440.

- CHEN Bai-lin, LIU Jian-sheng, WANG Chun-yu, et al. Study on the Activity of the Changmadaba-Kuangtanshan Segment of Eastern Altyn Tagh Fault During Holocene Epoch [J]. *ACTA Geologica Sinica*, 2008, 82 (4): 433 ~ 440.
- [15] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. 5.12 汶川 M_s 8.0 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
- TAN Cheng-xuan, SUN Ye, WU Shu-ren, et al. A consideration on regional crustal stability assessment after M_s 8.0 Wenchuan strong earthquake in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
- [16] 姚鑫, 张永双. 基于差分干涉雷达的汶川地震同震形变特点 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2): 151 ~ 161.
- YAO Xin, ZHANG Yong-shuang. Co-seismic deformation of 5.12 Wenchuan earthquake based on D-INSAR [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 151 ~ 161.
- [17] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. *地质力学学报*, 2008, 14 (2): 109 ~ 116.
- ZHANG Yong-shuang, LEI Wei-zhi, SHI Ju-song, et al. General characteristics of 5.12 earthquake-induced geo-hazards in Sichuan [J]. *Journal of Geomechanics*, 2008, 14 (2): 109 ~ 116.
- [18] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2): 131 ~ 141.
- ZHANG Yong-shuang, SHI Ju-song, SUN Ping, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 131 ~ 141.
- [19] 王连捷, 周春景, 孙东生, 等. 汶川 5.12 地震引起的库仑应力变化及其对周边地震活动的影响 [J]. *地质力学学报*, 2008, 14 (3): 193 ~ 200.
- WANG Lian-jie, ZHOU Chun-jing, SUN Dong-sheng, et al. Coulomb stress changes caused by Wenchuan earthquake and its influence on seismic activity in the adjacent area [J]. *Journal of Geomechanics*, 2008, 14 (3): 193 ~ 200.
- [20] 王连捷, 崔军文, 周春景, 等. 汶川 5.12 地震发震机理的数值模拟 [J]. *地质力学学报*, 2009, 15 (2): 105 ~ 113.
- WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, ZHOU Chun-jing, et al. Numerical modeling for Wenchuan earthquake mechanism [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15 (2): 105 ~ 113.
- [21] 姚鑫, 张永双, 杨农, 等. 玉树地震地表变形 InSAR 观测及初步分析 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2): 129 ~ 136.
- YAO Xin, ZHANG Yong-shuang, YANG Nong, et al. D-InSAR Deformation Observation and Preliminary Analysis of the M_s 7.1 Yushu Earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 129 ~ 136.
- [22] 王连捷, 崔军文, 王薇, 等. 青海玉树 M_s 7.1 地震发震过程的数值模拟 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2): 137 ~ 145.
- WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, WANG Wei, et al. Numerical modeling of Yushu M_s 7.1 earthquake mechanism [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 137 ~ 145.
- [23] 马寅生, 张永双, 胡道功, 等. 玉树地震地表破裂与宏观震中 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2): 115 ~ 124.
- MA Yin-sheng, ZHANG Yong-shuang, HU Dao-gong, et al. The Surface Ruptures And The Macroscopical Epicenter Of Yushu M_s 7.1 Earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 115 ~ 124.
- [24] Harks T C, Bucknam R C, Lajoie K R, et al. Modification of wave cut and faulting-controlled landforms [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89 (B7): 5771 ~ 5791.
- [25] 甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1989. 1 ~ 692.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu province. Regional geology of Gansu province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. 1 ~ 692 (in Chinese with English abstract).
- [26] 葛肖红, 刘俊来. 北祁连造山带的形成与背景 [J]. *地学前缘*, 1999, 6 (4): 223 ~ 230.
- GE Xiao-hong and LIU Jun-lai. Formation and tectonic background of the northern Qilian orogenic belt [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6 (4): 223 ~ 230 (in Chinese with English abstract).
- [27] 尹安. 喜马拉雅-青藏高原造山带地质演化 [J]. *地球学报*, 2001, 22 (3): 193 ~ 230.
- YIN An. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *ACTA Geoscientia Sinica*, 2001, 22 (3): 193 ~ 230 (in Chinese with English abstract).

- [28] 朱弟成,潘桂棠,莫宣学,等. 印度大陆和欧亚大陆的碰撞时代 [J]. 地球科学进展, 2004, 19 (4): 564 ~ 571.
ZHU Di-cheng, PAN Gui-tang, MO Xuan-xue, DUAN Li-ping and LIAO Zhong-li [J]. The age of collision between India and Eurasia. *Advances Earth Science*, 2004, 19 (4): 564 ~ 571 (in Chinese with English abstract).
- [29] 莫宣学,赵志丹,周肃,等. 印度-亚洲大陆的碰撞时限 [J]. 地质通报, 2007, 26 (10): 1240 ~ 1244.
MO Xuan-xue, ZHAO Zhi-dan, ZHOU Su, et al. On the timing of India-Asia continental collision [J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26 (10): 1240 ~ 1244 (in Chinese with English abstract).
- [30] 宋春晖,方小敏,李吉均,等. 青藏高原北缘酒西盆地 13Ma 以来沉积演化与构造隆升 [J]. 中国科学 (D 辑), 2001. 31 (增刊): 155 ~ 162.
SONG Chun-hui, FANG Xiao-min, LI Ji-jun, et al. Tectonic uplift and sedimentary evolution of the Jiuxi basin in the northern margin of the Tibetan plateau since 13Ma B P [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31 (Suppl): 155 ~ 162 (in Chinese).
- [31] 宋春晖,孙淑荣,方小敏,等. 酒西盆地晚新生代沉积物重矿物分析与高原北部隆升 [J]. 沉积学报, 2002, 20 (4): 552 ~ 559.
SONG Chun-hui, SUN Shu-rong, FANG Xiao-min, et al. Analysis of Tectonic Uplift and Heavy Minerals of Sediments on Jiuxi Basin in the Northern Margin of Tibetan Plateau since the Late Cenozoic [J]. *ACTA Sedimentologica SINICA*, 2002, 20 (4): 552 ~ 559 (in Chinese with English abstract).
- [32] 方小敏,赵志军,李吉均,等. 祁连山北缘老君庙背斜晚新生代磁性地层与青藏高原隆升 [J]. 中国科学 (D 辑), 2004, 34 (2): 97 ~ 106.
FANG Xiao-min, ZHAO Zhi-jun, LI Ji-jun, et al. Magnetostratigraphy of Late Cenozoic Laojunmiao anticline in the northern Qilian Mountains and its implications for the northern Tibetan plateau uplift [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34 (2): 97 ~ 106 (in Chinese).
- [33] 陆洁民,郭召杰,赵泽辉,等. 新生代酒西盆地沉积特征及其与祁连山隆升关系的研究 [J]. 高校地质学报, 2004, 10 (1): 50 ~ 61.
LU Jie-min, GUO Zhao-jie, ZHAO Ze-hui, et al. Cenozoic Sedimentation Characteristics of Jiuxi Basin and Uplift History of Northern Qilian Mountain [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10 (1): 50 ~ 61 (in Chinese with English abstract).
- [34] 国家地震局兰州地震研究所. 昌马活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社, 1992. 1 ~ 207.
Lanzhou Institute of Seismology, SSB. Active Changma fault zone [M]. Beijing: Seismological Press, 1992. 1 ~ 207 (in Chinese).
- [35] 陈汉林,杨树锋,肖安成,等. 酒泉盆地南缘新生代冲断带的变形特征和变形时间 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27 (4): 488 ~ 494.
CHEN Han-lin, YANG Shu-feng, XIAO An-cheng, et al. Deformation characteristics and time of Cenozoic thrust belt in southern margin of Jiuquan basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27 (4): 488 ~ 494 (in Chinese with English abstract).
- [36] 杨树锋,陈汉林,程晓敢,等. 祁连山北缘冲断带的特征和空间变化规律 [J]. 地学前缘, 2007, 14 (5): 211 ~ 221.
YANG Shu-feng, CHEN Han-lin, CHENG Xiao-gan, et al. Deformation characteristics and rules of spatial change for the Northern Qilianshan thrust belt [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (5): 211 ~ 221 (in Chinese with English abstract).
- [37] 徐锡伟, Tapponnier P, Woerd J V D, 等. 阿尔金断裂带晚第四纪左旋走滑速率及其构造运动转换模式讨论 [J]. 中国科学 (D 辑), 2003, 33 (10): 967 ~ 974.
XU Xi-wei, Tapponnier P, Woerd J V D, et al. Late Quaternary sinistral slip rate along the Altyn Tagh fault and its structural transformation model [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33 (10): 967 ~ 974 (in Chinese).
- [38] 陈正乐,万景林,王小凤,等. 阿尔金断裂带 8Ma 左右的快速走滑及其地质意义 [J]. 地球学报, 2002, 23 (4): 295 ~ 300.
CHEN Zheng-le, WAN Jing-lin, WANG Xiao-feng, et al. Rapid Strike-slip of the Altyn Tagh Fault at 8 Ma and Its Geological Implications [J]. *ACTA Geoscientia Sinica*, 2002, 23 (4): 295 ~ 300 (in Chinese with English abstract).
- [39] 李玉龙,候珍清,康哲民. 中国西北陕甘宁青地震区划 [M]. 甘肃人民出版社, 1986.

- LI Yu-long, HOU Zhen-qing and KAN Zhe-min. Seismic zonation in Shanxi, Gansu, Ningxia and Qinghai province, northwestern China [M]. Lanzhou: Gansu People Publishing House (in Chinese), 1986.
- [40] 国家地震局阿尔金活动断裂课题组. 阿尔金活动断裂带 [M]. 北京: 地震出版社, 1992.
Research Group on the Active Altyn Tagh Fault Zone of SSB. Active Altyn Tagh fault zone [M]. Beijing: Seismological Press (in Chinese), 1992.
- [41] Andrews D J, Hanks T C. Scarp degraded by linear diffusion: Inverse solution for age [J]. Jour Geophys Res, 1985, 90 (B12): 10193 ~ 10208.
- [42] 尤惠川, 邓起东, 冉永康. 断层崖演化与古地震研究 [J]. 地震地质, 2004, 26 (1): 33 ~ 45.
YOU Hui-chuan, DENG Qi-dong, RAN Yong-kang. Degradation on fault scarp and paleoearthquake research [J]. Seismology and Geology, 2004, 26 (1): 33 ~ 45 (in Chinese with English abstract).
- [43] 何文贵, 雷中生, 袁道阳, 等. 新民堡发生 7.25 级地震 [J]. 西北地震学报, 2010, 32 (1): 47 ~ 53.
HE Wen-gui, LEI Zhong-sheng, YUAN Dao-yang, et al. Disaster characteristics of Huihuipu earthquake in 1785 in Yumen, Gansu province, and discussion on its seismogenic structure [J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32 (1): 47 ~ 53 (in Chinese with English abstract).

ESTIMATION OF MAJOR EARTHQUAKE CYCLE AND FUTURE TENDENCY IN HEXI CORRIDOR AND ITS ADJACENT AREA, NW CHINA

CHEN Bai-lin¹, LIU Jian-sheng², ZHANG Yong-shuang¹,
LIU Jian-min¹, DONG Cheng¹, WU Nai-fen¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Hexi corridor, with its particular geographical position, is an important line connecting middle and lower reaches of the Yellow River and NW China. Affected by the late Mesozoic-early Cenozoic collision between Indian Plate and Eurasian Plate and the continuous northward compression the Hexi corridor and its adjacent area occur as a strong Crustal movement zone, as marked by earthquakes. Since 1555AD, two active periods and two quiet periods have been recognized and now is in the second active period since 1920. The second active period in the past 100 years can be divide to five active stages and five quiet stages, each lasting for 9 ~ 16 years, and now is in the last active stage since 2002. Study of major earthquake cycle indicates that the major earthquakes ($M_s = 7.0 \sim 7.5$) happen at the interval of 2000 ~ 3000 years in the study area. According to the state of every active fault in the recent earthquake, it can be predicted that in the coming 100 years the $M_s > 7.0$ earthquakes most likely appear in San'gedun-Songshan area of Changma active fault zone, Yuemen area in west part of the Northern Qilianshan fault zone, the Ciyaokou-Kushuigou area in the middle part of Northern Qilianshan fault zone and Jiayuguan area of the Jiayuguan active fault, and likely in Shibaocheng-Changmadaba area in eastern part of Altyu tagh active fault and Gaotai area of Gaotaichezhan active fault. The authors suggest that more attention should be paid to active fault and major earthquake cycle in the study related to earthquake movement.

Key words: active fault; period of major earthquake; future tendency of earthquake; Hexi corridor and its adjacent area