

基于数值模拟的巴颜喀拉块体边界断裂强震时空活动特征¹

尹力¹, 罗纲², 周本刚¹, 李正芳¹

1) 地震动力学与强震预测全国重点实验室(中国地震局地质研究所) 北京 100029

2) 武汉大学, 地球与空间科学技术学院 武汉 430079

摘要 近年来, 巴颜喀拉活动块体周缘断裂强震频发, 其活动强度和时空迁移特征受到广泛关注。为揭示其特征, 本文构建了包含巴颜喀拉块体主要边界断裂系统的三维黏弹塑性有限元模型, 以地质和地形变观测数据为约束, 获取了符合区域变形特征的模拟结果, 在此基础上, 计算了断裂系统的长期滑动速率, 并生成了长期(数万年)的合成地震目录。通过分析各边界断裂上的强震活动频度及其时空迁移特征, 圈定了强震高风险区。研究成果可为该地区强震风险评估提供科学依据。

关键词: 地震时空活动特征; 巴颜喀拉块体; 边界断裂带; 合成地震目录; 数值模拟

中图分类号: P315

收稿日期: 2026-4-1

¹ 基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3012004)。

第一作者简介: 尹力(1989-), 副研究员, 博士, 主要从事断层活动及岩石圈变形过程的有限元数值模拟、地震长期活动特征及强震危险性分析。E-mail: yinli2022@ies.ac.cn, ORCID: 0000-0003-0850-6930。

Spatiotemporal Characteristics of Strong Earthquake Activity along the Boundary Faults of the Bayan Har Block Based on Numerical Simulation

Li Yin¹, Gang Luo², Bengang Zhou¹, Zhengfang Li¹

1 State Key Laboratory of Earthquake Dynamics and Forecasting, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2 School of Earth and Space Science and Technology, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract In recent years, frequent strong earthquakes have occurred along the boundary faults of the Bayan Har block, drawing significant attention to their seismic activity intensity and spatiotemporal migration characteristics. To investigate these features, this study constructed a three-dimensional viscoelastoplastic finite element model incorporating the major boundary fault system of the Bayan Har block. Constrained by geological and crustal deformation observations, the model yielded simulation results consistent with the regional deformation characteristics. On this basis, the long-term slip rates of the fault system were calculated, and a synthetic earthquake catalog spanning tens of thousands of years was generated. By analyzing the frequency of strong earthquake activity and its spatiotemporal migration patterns along each boundary fault, high-risk zones for strong earthquakes were delineated. The findings provide a scientific basis for seismic risk assessment in this region.

Key words: Spatiotemporal characteristics of seismic activity, Bayan Har block, Boundary fault zone, Synthetic seismic catalog, Numerical modeling

引言

巴颜喀拉块体及周缘是全球构造变形最强烈、地震活动频度和强度最高的地区之一。1997 年以来, 中国大陆共发生 M 7.0 级以上强震 12 次, 其中 9 次位于巴颜喀拉活动块体的边界断裂带上。典型实例包括: 2001 年发生于东昆仑断裂带的昆仑山口西 Mw 7.8 级地震(徐锡伟等, 2002), 2008 年发生于龙门山断裂带的汶川 Mw7.9 级地震(张培震等, 2008), 2008 年发生于块体西边界阿什库勒断裂的于田 Ms7.3 级地震(徐锡伟等, 2011), 以及 2017 年发生于虎牙断裂的九寨沟 Ms7.0 级地震等(易桂喜等, 2017)。这些强震使得巴颜喀拉块体及其周缘断裂成为中国大陆强震活动最强烈的区域, 受到广泛关注。

巴颜喀拉活动块体呈长条形, 东西延伸约 2200 km, 其东部与西部的变形特征存在显著差异(见图 1)。该块体被周缘多条大型活动边界断裂带所围限, 各边界断裂带的断层活动水平和强震频度不尽相同(程佳和徐锡伟, 2018)。在此背景下, 深入认识巴颜喀拉块体边界断裂的强震时空活动特征, 并识别强震高风险区, 具有重要的现实意义。

针对上述问题, 前人已利用地质调查和地形变观测对巴颜喀拉块体边界断裂带的强震活动开展了评估。然而, 地质调查获取的断层长期滑动速率受限于取样点位置、数量及测年技术, 误差范围较大(Allen et al., 1991); 而 GPS 等形变观测解译的断层活动, 其精度受限于观测台站密度和块体划分方案(Shen et al., 2005; Gan et al., 2007; Wang and Shen, 2020)。此外, 由于天然地震目录中地震记录不完整, 我们对地震活动水平及其演化规律的认识仍存在不足。

数值模拟方法是研究岩石圈变形、断层活动及地震演化的有效工具。特别是考虑黏-弹-塑性本构关系的有限元模型, 能够模拟连续的长期的地形变和地震活动(Luo and Liu, 2010, 2012; Yin et al., 2022)。本文综合考虑巴颜喀拉块体已有的地质、地球物理及地形变等多源观测数据, 构建了包含该块体边界断裂系统的三维黏弹塑性有限元数值模型。基于该模型, 模拟了区域变形场与断层滑动速率, 并生成了数万年尺度的合成地震目录, 进而分析了各边界断裂上的强震活动强度, 揭示了强震在边界断裂系统中的时空迁移特征。

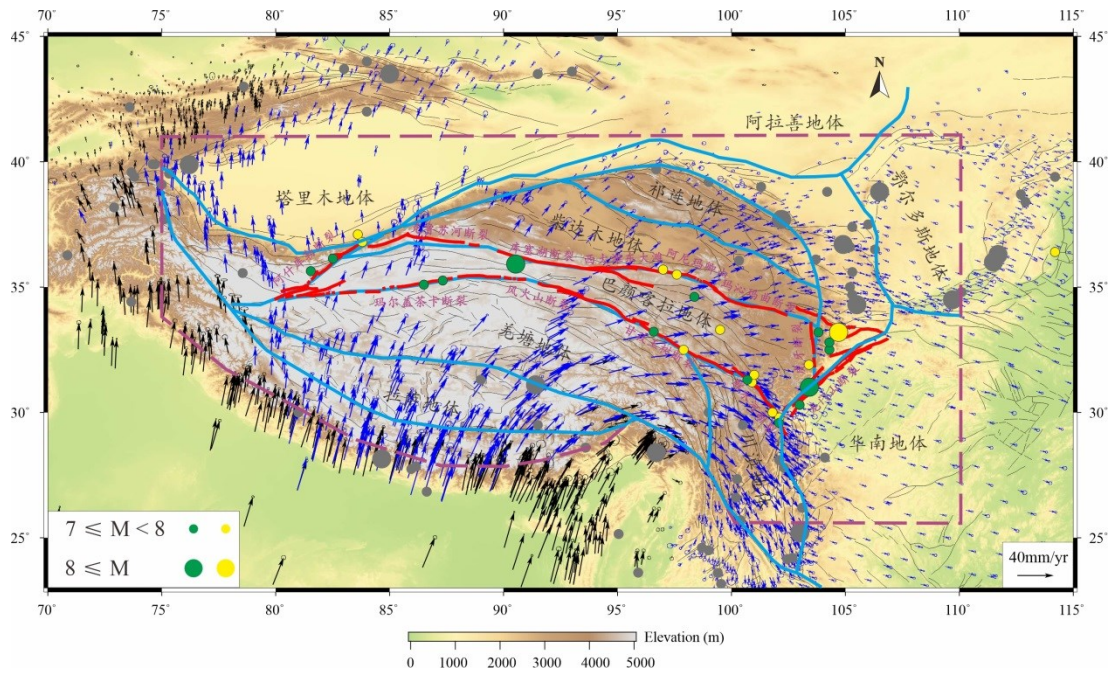


图 1 巴彦喀拉活动块体区域断裂、地形和变形图

Figure 1. Map of faults, topography, and deformation in the Bayan Har block region.

紫色虚线框指示了图 2 中的模型区域；浅蓝色线指示了块体划分边界；红色线为巴彦喀拉块体的边界断裂；蓝色和黑色箭头为 GPS 速度场(欧亚参考系, Wang and Shen, 2020)；绿色圆点为 1970 年以来的强震；黄色圆点为 1970 年以前的强震

1 地质构造背景

巴彦喀拉块体是青藏高原重要的地质构造单元，呈西部狭长、东侧张开的倒三角形态（见图 1）。该块体由多条大型断裂带所围限，主要包括东边界的龙门山（LMS）断裂带和虎牙（HY）断裂带，北边界的东昆仑（EKL）断裂带东段（玛沁-玛曲段）、中段（西大滩-东大滩段、阿尼玛卿山段和库塞湖段）以及西段（克鲁苏河段），西边界的阿什库勒（ASKL）断裂，南边界的玛尔盖茶卡（MEGCK）断裂、风火山（FHS）断裂、甘孜玉树（GZ-YS）断裂以及鲜水河（XSH）断裂(程佳和徐锡伟, 2018)。这些断裂带表现出不同的断层活动强度以及地震活动特征。

鲜水河（XSH）断裂带位于巴彦喀拉块体东南部边界，以左旋走滑为主，历史强震多发。地质调查显示，该断裂带滑动速率为 4.6~15 mm/a (Allen et al., 1991; 周荣军等, 2001; 徐锡伟等, 2003)。GPS 形变观测给出的现今滑动速率为 6~14 mm/a (Shen et al., 2005; 王敏等, 2008; Wang and Shen, 2020)。XSH 断裂带，自公

元 1500 年以来沿着鲜水河断裂带发生超过 19 次大地震($M \geq 6.0$), 包括 4 次 $M \geq 7.5$ 级地震(Wen et al., 2008)。

龙门山(LMS)断裂带位于巴颜喀拉块体东部边界, 以逆冲为主兼右旋走滑。晚第四纪滑动速率 1~3 mm/a (徐锡伟等, 2005; 徐锡伟等, 2008)。现今 GPS 观测显示该断裂带的滑动速率 <2 mm/a (张培震等, 2008)。该断裂带历史记录的强震较少, 然而在 2008 年发生 M_w 7.9 级汶川地震, 以及 2013 年 M_s 7.0 级芦山地震。

虎牙(HY)断裂带全长约 60 km, 总体走向 NNW, 逆冲兼左旋走滑。晚第四纪以来平均左旋走滑动速率为 1.4 mm/a, 晚更新世晚期以来垂向速率为 0.3~1.8 mm/a (周荣军等, 2006; 刘华国等, 2018)。GPS 观测显示该断裂的垂直滑动速率为 0.3~2 mm/a(陈长云等, 2012; 杜方等, 2008; 王康等, 2011)。

东昆仑断裂带(EKL)位于巴颜喀拉块体的北部边界, 东起玛沁、玛曲, 西至西大滩-东大滩段、阿尼玛卿山、库赛湖段和克鲁苏河段, 继续西延与阿尔金断裂相交, 全长达 2000 km (青海省地震局等, 1999)。地质调查显示, 玛沁段全新世以来滑动速率 7 ± 1 mm/a (赵国光, 1996; 李陈侠等, 2011)。玛曲断裂的滑动速率为 3.6~6.2 mm/a (李陈侠等, 2011)。西大滩-东大滩段全新世滑动速率为 9.3~12.4 mm/a (赵国光, 1996; Woerd et al., 2000)。阿尼玛卿山段落晚更新世晚期至全新世的滑动速率 10.2 ± 1.6 mm/a (Woerd et al., 2000)。库赛湖段在全新世中期活动速率为 10~14 mm/a (Li et al., 2005; 青海省地震局等, 1999)。地形变观测显示, 东昆仑东段的滑动速率为 3.8~8.1 mm/a (Li et al., 2018; Wang et al., 2010)。东昆仑中段的滑动速率为 7~13.7 mm/a (Gan et al., 2007; Li et al., 2018; Wang et al., 2010)。东昆仑西段的滑动速率为 2.5~11 mm/a (Meade, 2007; Wang et al., 2011)。2001 年在库赛湖段发生昆仑山口西 M_w 7.8 级地震。

阿什库勒(ASKL)断裂位于巴颜喀拉块体的西部边界, 呈左旋走滑特征。地质调查显示该段的滑动速率为 0.3~1.9 mm/a (潘家伟, 2011)。历史上该断裂带发生过两次 7 级强震, 包括 2008 年 M_s 7.3 级地震和 2014 年 M_s 7.3 级地震。

玛尔盖茶卡(MEGCK)断裂位于巴颜喀拉块体的西南部边界。InSAR 观测的震间滑动速率为 10.2 ± 0.4 mm/a (孙建宝等, 2007)。历史上该断裂带发生过两次 7 强震, 包括 1973 年玛尼西 M 7.3 级地震和 1997 年玛尼 M_s 7.5 级地震。

甘孜玉树（GZ-YS）断裂带位于巴颜喀拉块体南部边界的中部，由多条次级断裂段组成，以左旋走滑为主。地质调查显示该段的滑动速率为 7~11.6 mm/a (周荣军等, 1996; 石峰等, 2013)。大地测量获得的该断裂左旋走滑动速率为 6.6 ± 1.5 mm/a (王阎昭等, 2011)。历史上曾发生过 2010 年 Ms 7.1 级玉树地震。

总结以上，巴颜喀拉块体边界各个断裂上的断层活动和强震频率具有显著差异，认识该块体的强震时空活动特征，并识别该块体的强震高风险区，对未来的强震风险评估具有重要意义。

2 三维黏弹塑性有限元模型

2.1 数值模型的建立

基于研究区地质、地球物理探测相关研究成果，获取研究区断裂带几何分布、块体划分、岩石圈分层结构。在此基础上，构建研究区包含主要断层系统的三维黏弹塑性有限元模型，并对其进行合理网格剖分。图 2 显示了研究区包含主要断层系统的三维黏弹塑性有限元模型，以及研究区主要断层系统的分布。

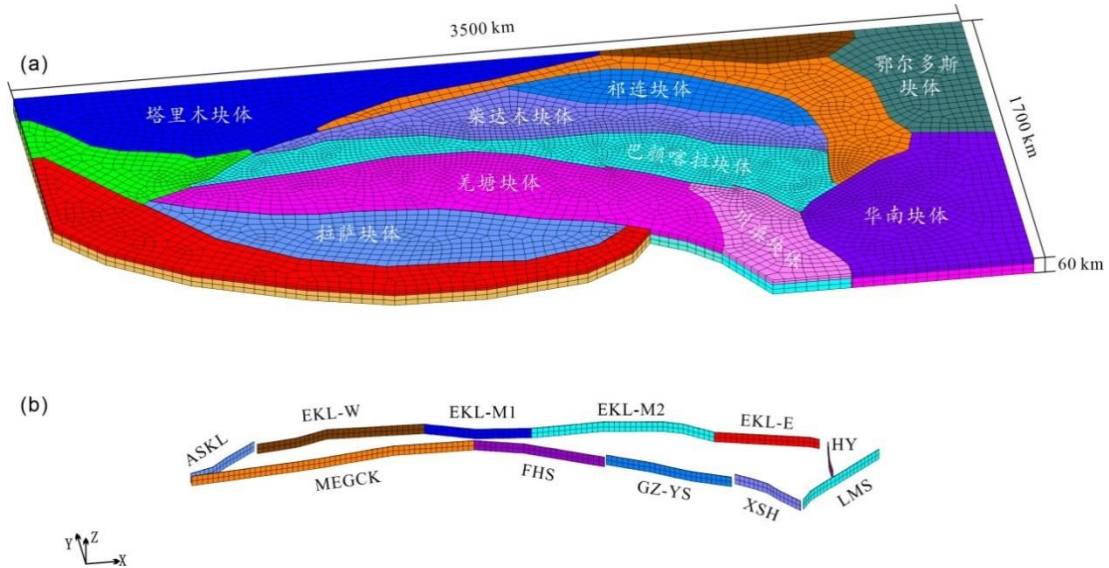


图 2 巴颜喀拉块体及周边地区的三维有限元模型

Figure 2. Three-dimensional finite element model of the Bayan Har block and its surrounding areas.

(a)网格划分;(b)断层系统;断裂依次为:阿什库勒断裂(ASKL),玛尔盖茶卡断裂(MEGCK),风火山断裂(FHS),甘孜玉树断裂(GZ-YS),鲜水河断裂(XSH),龙门山断裂(LMS),虎牙断裂(HY),东昆仑断裂东段(EKL-E,玛沁-玛曲段),东昆仑断裂中2段(EKL-M2,西大滩-东大滩段、阿尼玛卿山段),东昆仑断裂中1段(EKL-M1,库塞湖段),东昆仑断裂西段(EKL-W,克鲁苏河段)

从地表至深部，模型分层主要包括弹塑性上地壳（20km）及黏弹性下地壳（40km）。模型中包括鲜水河（XSH）断裂、龙门山（LMS）断裂和东昆仑（EKL）断裂等巴颜喀拉块体边界断裂带（图 2）。上地壳内的断层主要表现为粘滑（stick slip），而在下地壳，断层主要表现为蠕滑（creep slip or aseismic slip）。模型采用宽度为 1 km 的弱化单元来模拟断裂，断层单元是具有应变软化的弹塑性特殊单元（图 2b）。模型对断层几何进行了一定的简化，断层及岩石圈分层的参数设置见表 1。

对于模型参数，主要包括黏度，内摩擦角和内聚力。其中，黏度控制着块体的流变强度。我们对各个块体设置了不同流变强度，考虑了模型的横向非均匀性。内摩擦角和内聚力控制着断层的强度，对于巴颜喀拉块体边界活动断层，断层强度设置相对较低，且为粘滑，模拟断层上的地震目录；其他断层设置较高的强度，使其一直闭锁，或者设置为蠕滑。这样的简化也是为了更多的获得巴颜喀拉块体边界断裂的长期强震活动。以上参数的设置参考前人的研究(孙玉军等, 2015; 李平恩等, 2019; Yin and Luo, 2022)。

表 1 模型参数设置

Table 1. Model parameter settings.

		$E/10^{10} \text{ Pa}$	ν	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\eta/10^{19} \text{ Pa}\cdot\text{s}$	C/MPa	$\Phi/(^{\circ})$
上地壳	活动断层	8.75	0.25	2800	—	20	5
	块体	8.75	0.25	2800	—	40	10
下地壳	巴颜喀拉	10	0.25	2800	100	—	—
	拉萨	10	0.25	3200	100	—	—
	羌塘	10	0.25	3200	100	—	—
	川滇	10	0.25	3200	100	—	—
	柴达木	10	0.25	3200	500	—	—
	祁连	10	0.25	3200	400	—	—
	其它	10	0.25	3200	1000	—	—

注：E 为弹性模量； η 为黏度； Φ 为内摩擦角；C 为内聚力； ν 为泊松比； ρ 为密度；‘—’表示该参数的值设置较高忽略其影响

2.2 边界条件和初始条件

对于边界条件的设置，我们将 GPS 速度场插值到模型的四周作为模型的构造边界加载条件。在模型东部巴颜喀拉块体的下方，施加了基底剪切边界条件，即在下地壳的模型底边界施加更快速（10–15 mm/a）的速度加载。

本文建立的动力学模型，首先需要模拟岩石圈稳定的背景应力场，模型在重力以及边界加载条件下，经过 3 万年时间的加载之后，已达到稳定的加载变形状态，此时区域的背景应力场已经达到稳定。基于这个稳定的背景应力场，再进行断层系统长期地震活动的数值模拟。

2.3 地震及地震循环的数值模拟

本文使用 Drucker-Prager 屈服准则来判断断层单元是否到达屈服。若达到屈服，即发生同震位错变形，通过降低断层单元的内聚力来模拟断层的突然失稳和突然滑动，模拟设置的内聚力降 ΔC 为 6–10 MPa，内聚力降的取值参考 Kanamori and Anderson (1975) 关于断层的平均滑动量与应力降相关的经验公式，且经过多次调试最终确定。Drucker-Prager 准则是 Mohr-Coulomb 屈服准则的连续且平滑的表达方式 (Drucker and Prager, 1952; Khan and Huang, 1995):

$$F(\sigma, C) = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - \beta \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{6C \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (3)$$

其中， I_1 为应力张量的第一不变量（本文压应力为正）； J_2 为偏应力张量的第二不变量； α 和 β 为 Drucker-Prager 屈服准则的参数，是内聚力 C 和内摩擦角 ϕ 的函数。

当断层单元的屈服应力 $F(\sigma, C) < 0$ 时，模型处于震间加载状态，此阶段时间步长设置为 10 年；当 $F(\sigma, C) = 0$ 时，断层地震发生。此时，设定时间步长为 1s，同时将断层单元的内聚力从 C 降低到 $C - \Delta C$ 。这样导致了断层失稳，产生同震滑动。当该断层单元的屈服应力 $F(\sigma, C - \Delta C) = 0$ 时，该地震结束，断层单元的内聚

力由 $C-\Delta C$ 恢复至 C ，时间步长也由 1s 恢复至 10 年。至此，模型进入震后黏弹性应力松弛阶段和下一次地震的震间加载阶段。重复此过程即可实现地震循环的模拟。详细的力学方程和本构关系可参见前人文章(Luo and Liu, 2010; Gao et al., 2020)。

3 模拟结果

3.1 震间地表变形和断层滑动速率

图 3 展示了地表形变速度场的模拟结果与观测数据的对比。其中仅施加构造边界条件的模拟结果如图 3a 所示，模拟结果同观测结果具有很好的一致性。然而，在模型内部，特别是在巴颜喀拉块体的东部，模拟结果和观测数据拟合较差。这个结果说明，仅凭远场构造加载无法完全解释研究区的变形特征，可能需要其它边界加载条件，如地形起伏、密度的横向差异和岩石圈厚度的横向差异等因素造成的地壳流或地幔流的深部加载作用(Bird, 1991; Yi et al., 2016; Yin and Luo, 2022)。

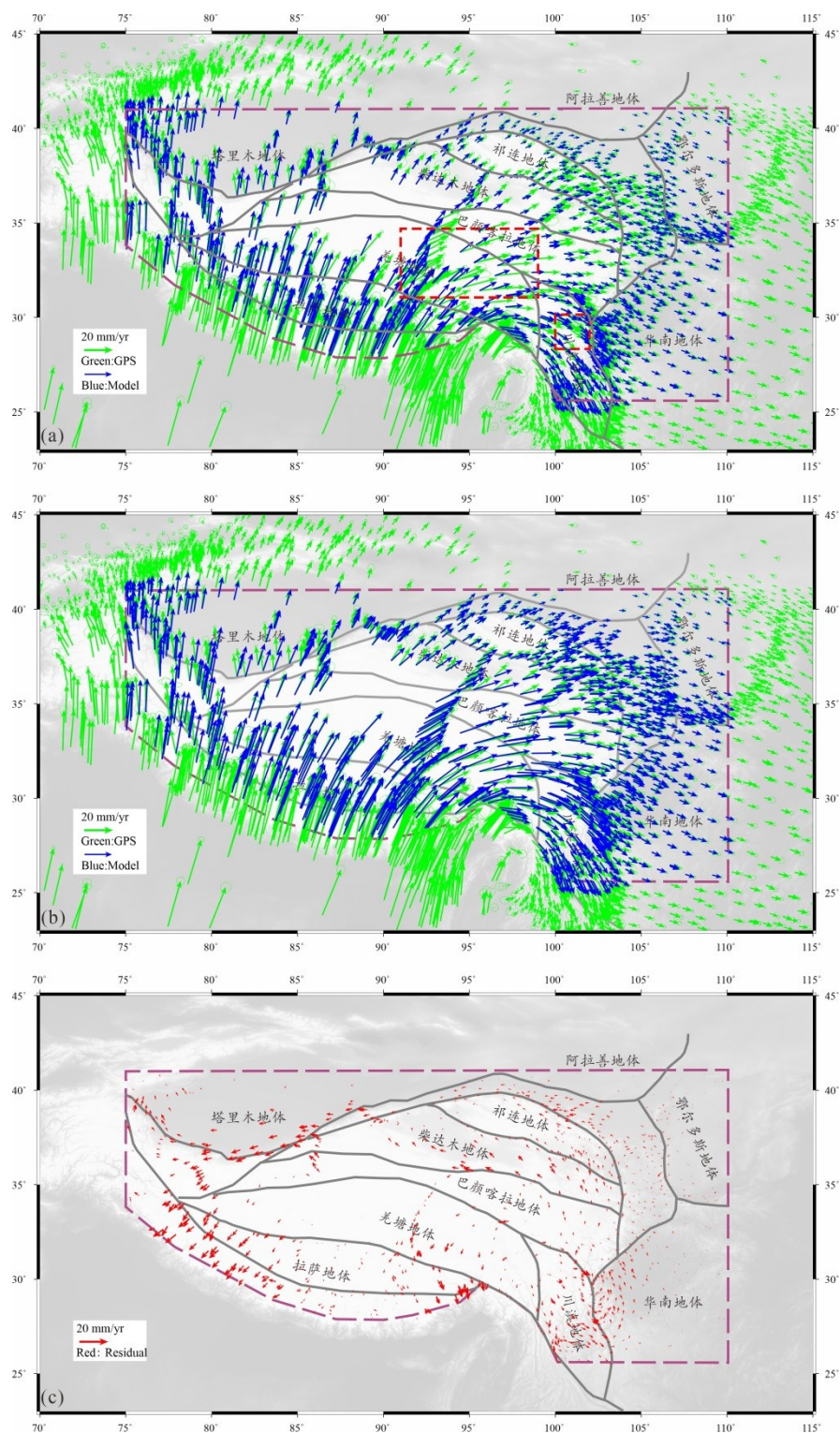


图 3 地表震间速度场的对比

Figure 3. Comparison of surface velocity fields during the interseismic period.

(a) 边界加载的模拟结果（蓝色箭头）和观测数据（绿色箭头）的对比；(b) 边界加载和基底剪切混合边界条件下的模拟结果；(c) 图 b 中二者的速度残差

在形变速率对比差的区域（图 3a 中红色虚线方框内）施加了基底剪切的边界条件，即在下地壳的模型底边界施加更快速（10~15mm/yr）的速度加载。图

3b 和图 3c 分别显示了同时考虑 GPS 边界加载和基底剪切加载的模拟结果，以及模拟与观测的速度残差。对比结果显示模型内部的对比较好，表明远场构造加载结合局部的下地壳快速流动能够很好地描述研究区现今的变形特征。

同时，我们计算了模拟时间内各个断裂上的长期平均滑动速率，并同地质调查的滑动速率和地形变观测速率进行了对比（表 2）。结果显示，东昆仑断裂中 2 段（EKL-M2；西大滩-东大滩、阿尼玛卿山段）的断层滑动速率和强震活动水平最高，EKL-E、XSH、EKL-M1 和 GZ-YS 断裂次之。模拟各断裂上的滑动速率均处于地质与地形变观测的速率范围之内，表明模拟结果符合研究区的变形特征。

表 2 巴颜喀拉边界断裂的长期滑动速率对比（mm/a）

Table 2. Comparison of long-term slip rates along the Bayan Har boundary faults (mm/a).

断层	XSH	GZ-YS	FHS	MEGCK	ASKL	EKL-W	EKL-M1	EKL-M2	EKL-E	HY	LMS
模拟结果	5.4	4.2	0.8	3.7	2.3	1.6	5.3	11.8	6.0	0.5	1.1
地质速率	4.6~15 ⁽¹⁻³⁾	7~11.6 ⁽⁷⁻⁸⁾	--	--	0.3~1.9 ⁽¹¹⁾	--	10~14 ⁽¹⁴⁻¹⁵⁾	8.6~12.4 ⁽¹⁹⁻²⁰⁾	3.6~8 ^(19,21)	0.3~1.8 ⁽²²⁻²³⁾	1~3 ⁽²⁷⁻²⁸⁾
地形变速率	6~14 ⁽⁴⁻⁶⁾	5.1~8.1 ⁽⁹⁾	--	9.8~10.6 ⁽¹⁰⁾	--	2.5~11 ⁽¹²⁻¹³⁾	7~13.7 ⁽¹⁶⁻¹⁸⁾	7~13.7 ⁽¹⁶⁻¹⁸⁾	3.8~8.1 ⁽¹⁷⁻¹⁸⁾	0.3~2 ⁽²⁴⁻²⁶⁾	<2 ⁽²⁹⁾

注：1) Allen et al., 1991; 2) 周荣军等, 2001; 3) 徐锡伟等, 2003; 4) Shen et al., 2005; 5) 王敏等, 2008; 6) Wang and Shen, 2020; 7) 周荣军等, 1996; 8) 石峰等, 2013; 9) 王阎昭等, 2011; 10) 孙建宝等, 2007; 11) 潘家伟, 2011; 12) Meade, 2007; 13) Wang et al., 2011; 14) Li et al., 2005; 15) 青海省地震局等, 1999; 16) Gan et al., 2007; 17) Li et al., 2018; 18) Wang et al., 2010; 19) 赵国光, 1996; 20) Woerd et al., 2000; 21) 李陈侠等, 2011; 22) 周荣军等, 2006; 23) 刘华国等, 2018; 24) 陈长云等, 2012; 25) 杜方等, 2008; 26) 王康等, 2011; 27) 徐锡伟等, 2005; 28) 徐锡伟等, 2008; 29) 张培震等, 2008

3.2 合成地震目录

在获得符合研究区变形特征的模拟结果之后，我们模拟了巴颜喀拉块体边界主要断裂带上数万年的合成地震目录。图 4 展示了巴颜喀拉块体各边界断裂上的合成地震目录，其中不同颜色代表不同断层上的合成地震目录。从图 4 可见，EKL-M2（西大滩-东大滩、阿尼玛卿山段）的强震发生最为频繁，且震级较大。基于该目录，我们统计分析了各个断裂上 Mw≥7.0 级强震的平均复发周期与变异

系数（见表 3）。

巴颜喀拉块体各边界断裂带的强震活动表现出不同的活动强度特征（见表 3）。块体东北部边界的东昆仑断裂，东南部边界的 XSH 断裂及 GZ-YS 断裂平均复发周期较短。LMS 断裂、FHS 断裂、ASKL 断裂及 EKL-W（克鲁苏河段）的强震复发周期较长。其中滑动速率最快的 EKL-M2（西大滩-东大滩、阿尼玛卿山段）上的强震复发间隔最短，其 $M_w7.0$ 级以上地震的平均复发间隔为 48 年。LMS 断裂带上的强震复发周期最长，平均复发周期长达 2177 年（表 3）。各断裂强震平均复发周期的计算，是基于各断裂上强震活动达到稳定之后的地震目录。

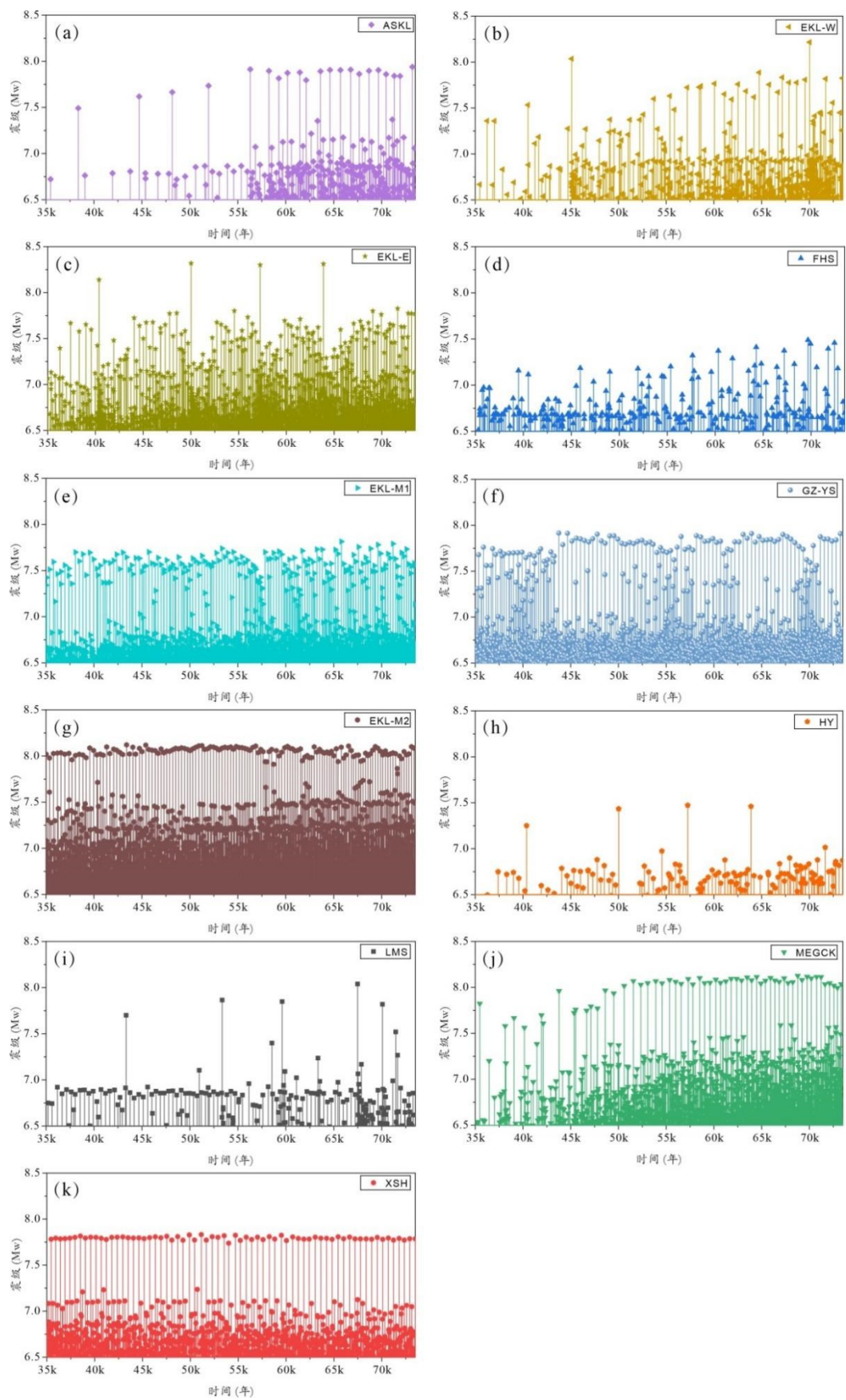


图 4 巴颜喀拉块体边界各断裂上的合成地震目录

Figure 4. Synthetic earthquake catalog for each fault on the Bayan Har block boundary.

我们计算了各边界断裂上的变异系数。变异系数为标准差和平均复发周期的比值，能够指示地震的时间分布特征。当变异系数小于 1 时，地震表现为周期或准周期行为，比值越小周期性特征越强，当变异系数为 0 时，是完全周期性；当变异系数大于 1 时，地震表现为丛集性，比值越大丛集性特征越显著；当变异系数等于 1 时，地震表现为完全随机的特征，变异系数越接近 1，地震的随机性特征越显著。模拟结果显示，巴颜喀拉块体各边界断裂上的强震表现出不同的长期活动特征。其中，FHS、ASKL 和 EKL-E 断裂上的强震表现为随机的复发行为，MEGCK 断裂上的强震表现为丛集性的特征，而其它断裂上的强震表现为周期或准周期复发行为（见表 3）。

表 3 巴颜喀拉边界断裂上强震（ $M_w \geq 7.0$ ）的平均复发周期（年）及复发特征
Table 3. Mean recurrence intervals (years) and recurrence behavior of $M_w \geq 7.0$ earthquakes on the Bayan Har boundary faults.

断层	XSH	GZ-YS	FHS	MEGCK	ASKL	EKL -W	EKL -M1	EKL -M2	EKL -E	HY	LMS
复发周期(年)	333	202	925	123	439	377	189	48	141	--	2177
变异系数	0.36	0.61	1.07	1.6	1.06	0.8	0.58	0.76	1.05	--	0.99
复发特征	周期	准周期	随机	丛集	随机	准周期	准周期	准周期	随机	--	随机

4 讨论

断层长期滑动速率和强震复发特征的模拟结果，能够指示各断裂带的活动强度及其之间的差异。这种活动强度差异，与模型的构造边界加载和断层的强度参数之间存在重要关系。在数值模型中，各边界活动断层的强度参数设置都是一致的（表 1），模拟结果显示的断层活动差异主要是由于构造加载的作用所导致。本文地表变形的模拟结果和形变观测数据的对比较为一致（图 3b），因此，本文模拟出的断层滑动速率和强震活动能够可靠地反应出各断裂现今的活动强度特征和差异。模拟结果显示，巴颜喀拉地块边界的强震高危险区为东昆仑断裂带、甘孜玉树断裂以及鲜水河断裂。这些断裂带均表现出较高的断层滑动速率和较短的强震复发周期。尤其是 EKL-M2（西大滩-东大滩、阿尼玛卿山段），该段显

示出最高的断层滑动速率和最短的强震活动复发周期。

基于人工地震目录，我们计算了各断层之间的强震迁移概率，即上一次发生强震之后，下一次强震在其它断层上发生的概率（图 5）。其中，XSH 断裂上发生强震之后，下一次在东昆仑断裂（EKL-M1、EKL-M2 和 EKL-E）、MEGCK 断裂和 GZ-YS 断裂上发生强震的概率较高（图 5a）。GZ-YS 断裂上发生强震之后，下一次在东昆仑断裂（EKL-M1、EKL-M2 和 EKL-E）、MEGCK 断裂和 XSH 断裂上发生强震的概率较高（图 5b）。EKL-M2（西大滩-东大滩、阿尼玛卿山段）发生强震之后，下一次在东昆仑断裂（EKL-M1、EKL-M2 和 EKL-E）、MEGCK 断裂、和 GZ-YS 断裂上发生强震的概率较高（图 5c）。MEGCK 断裂发生强震之后，下一次在东昆仑断裂（EKL-M1、EKL-M2 和 EKL-E）和 MEGCK 断裂上发生强震的概率较高（图 5d）。

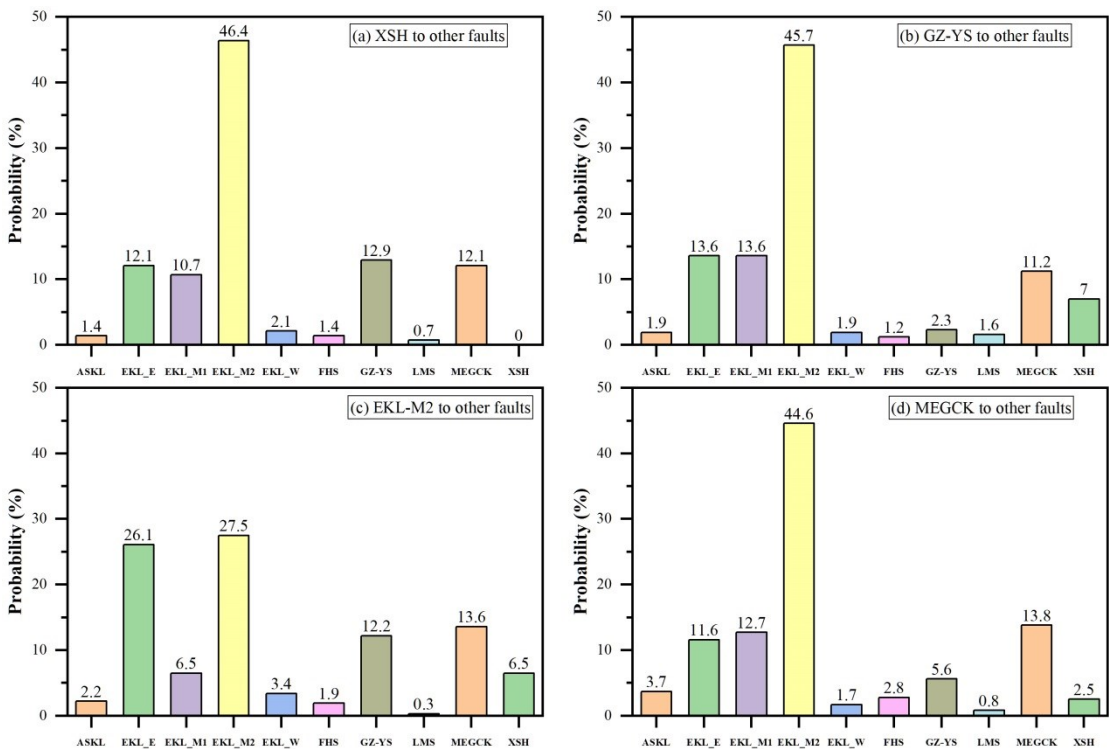


图 5 巴颜喀拉块体边界断裂上强震迁移概率图

Figure 5. Map of strong-earthquake migration probability on the Bayan Har block boundary faults.

(a)-(d)鲜水河（XSH）断裂、甘孜玉树（GZ-YS）断裂、东昆仑中 2 段（EKL-M2），以及玛尔盖茶卡（MEGCK）断裂上发生强震之后，下一次强震发生在其它断裂上的概率

综合以上强震迁移特征及概率的统计结果，我们认为下一次强震发生在东昆

仑断裂中东段（EKL-M1、EKL-M2 和 EKL-E）上的概率较高，其次是 MEGCK 断裂、GZ-YS 断裂和 XSH 断裂。东昆仑断裂上强震概率高的原因是该断裂本身断层活动速率高，且强震频率高。尤其是 EKL-M2（西大滩-东大滩、阿尼玛卿山段），其它断裂上发生强震之后，下一次强震发生在该段的概率均最高(图 5)。

同时，我们发现强震发生之后，相邻断层上发生强震的概率也会增加。例如，EKL-M2 上发生强震之后，EKL-E 上发生强震的概率显著提升（对比图 5c 和图 5abd）。XSH 断裂上发生强震之后，GZ-YS 断裂上发生强震的概率也随之提升（对比图 5a 和图 5bcd）。因此，相邻断层之间强震的相互作用，也是影响强震迁移概率的一个重要动力学因素。

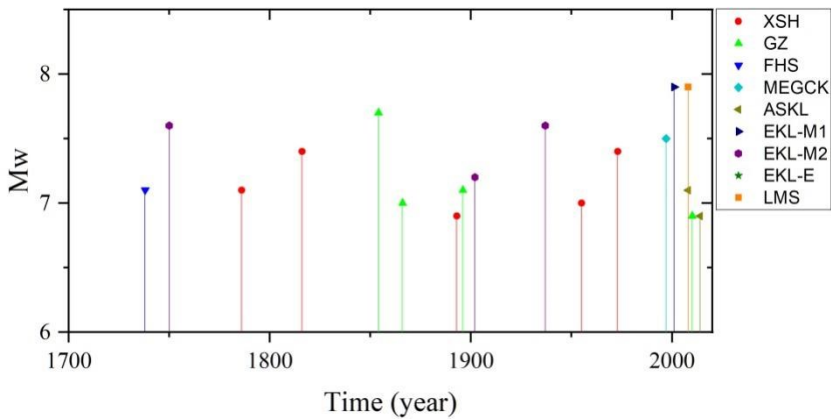


图 6 巴颜喀拉块体边界断裂历史强震（ $M \geq 7.0$ ）的 M-T 图

Figure 6. M-T diagram of historical strong earthquakes ($M \geq 7.0$) along the Bayan Har boundary faults.

基于历史地震目录，我们计算了巴颜喀拉块体边界断裂上近 500 年的强震发震频率。参考 Cheng 等（2017），我们对历史地震目录的震级统一校正为矩震级（ M_w ），校正后的历史地震目录如图 6 所示。历史上，巴颜喀拉块体上总共发生 M_w 7.0 级以上强震 18 次。其中，XSH 断裂带上发生强震的频率最高为 5 次，其发震概率为 27.8%；GZ-YS 断裂带上发生强震的频率次之为 4 次，发震概率为 22.2%；EKL-M2 段发生三次强震，发震概率为 16.7%。我们同时计算了历史强震的迁移概率，例如鲜水河断裂带上发生强震之后，下一次发生在 XSH 断裂上的概率为 40%，发生在 GZ-YS 断裂上的概率为 40%，发生在 MEGCK 断裂上的概率为 20%（见表 4）。

近 500 年的历史强震显示巴颜喀拉各边界断裂上的发震频率和模拟结果较为一致，也存在一些差别。一致的情况是，历史强震和模拟结果均显示出东昆仑

断裂中东段、XSH 段和 GZ-YS 段存在较高的强震风险。不一致的情况是，模拟结果显示东昆仑断裂中段的强震概率最高，而历史地震显示 XSH 和 GZ-YS 断裂上的强震概率最高。这种不一致可能的原因，一是因为模拟结果是长期数万年的统计结果，而历史地震仅仅是百年的记录，它们之间存在统计时间跨度的差异。模拟的长期（数万年）平均行为与历史（约几百年）短期记录之间的差异是合理的，模拟结果揭示了巴颜喀拉块体边界断裂带强震的长期复发特征。此外，历史地震目录中各强震的震级也存在显著差异，发生在东昆仑断裂上强震的震级普遍大于 XSH 断裂和 GZ-YS 断裂上的强震。因此，对比强震的发震频率不能仅基于强震的个数或频率，还需考虑断层的长期滑动速率和地震矩。

表 4 巴颜喀拉边界断裂上基于历史地震目录的强震（ $M_w \geq 7.0$ ）迁移概率

Table 4. Historical-catalog-based migration probability of $M_w \geq 7.0$ earthquakes along the Bayan Har boundary faults

断层	XSH	GZ-YS	FHS	MEGCK	ASKL	EKL -W	EKL -M1	EKL -M2	EKL -E	HY	LMS
XSH	40%	40%		20%							
GZ-YS	25%	25%			25%			25%			
EKL-M2	67%							33%			

由于模拟的区域尺度较大，本文的数值模型存在着一定的简化，模型中断层的划分并没有考虑更加精细的断层分段。例如，XSH 断裂带简化为一条断裂，这会导致强震大都是整段破裂，产生 M_w 7.7 级的强震，从而使得中等强震（ ~ 7.0 ）的数量减少。历史地震破裂显示，XSH 断裂具有显著的断层分段破裂特征（Cheng et al., 2020; Wen et al., 2008）。因此，数值模拟断裂带的长期活动特征，需要更加精细的断层分段划分，从而能够模拟出单个分段和多个分段级联破裂，获得不同震级区间且更加丰富的合成地震目录。这种精细的断层结构模型以及精细的岩石圈分层结构等，我们可能随后将在更小的研究区域进行建模和探索。此外，模型未考虑孔隙流体压力、震后余滑等复杂过程，这些因素可能对地震迁移的短期概率产生影响。作为一项初步研究，本文可为认识巴颜喀拉块体主要边界断裂带的长期强震活动特征和评估其强震危险性提供一些参考。

5 结论

通过构建巴颜喀拉活动块体的三维黏弹塑性有限元模型，本文模拟了巴颜喀

拉块体边界断裂上的断层滑动速率和合成地震目录,分析了各边界断裂上的强震活动水平和迁移特征。具体结论如下:

(1) 巴颜喀拉块体各边界断裂的活动存在较大差异,其中东昆仑断裂中 2 段(EKL-M2;西大滩-东大滩、阿尼玛卿山段)的断层滑动速率和强震活动水平最高,EKL-E、XSH、EKL-M1(库塞湖段)和 GZ-YS 断裂次之。

(2) 综合考虑断层滑动速率、强震复发周期及地震迁移概率,东昆仑断裂带的中东段是未来发生 $M_w \geq 7.0$ 强震概率最高的区域,其次为 GZ-YS、XSH 和 MEGCK 断裂。

(3) 强震在空间上的迁移概率主要受控于断裂自身的活动强度,同时,相邻断裂间的同震应力触发作用也会显著提升邻近断裂的发震概率。

致谢:感谢两位审稿专家提出的建设性意见。

References

- Allen, C. R., Luo, Z. L., Qian, H., et al., 1991. Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of southwestern China, *Geological Society of America Bulletin*, 103(9), 1178-1199.
- Bird, P., 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography in the isostatic limit, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 96(B6), 10275-10286.
- Chen, C. Y., Ren, J. W., Meng, G. J. et al., 2012. Analysis of modern activity of major faults in northeast margin of Baryan-Har block, *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese with English abstract), 32(03), 27-30.
- Cheng, J., Xu, X. W., 2018. Features of earthquake clustering from calculation of coulomb stress around the Bayan Har block, Tibetan Plateau, *Seismology and Geology* (in Chinese with English abstract), 40(1), 133-154.
- Cheng, J., T. Chartier, Xu, X. W., 2020. Multisegment Rupture Hazard Modeling along the Xianshuihe Fault Zone, Southeastern Tibetan Plateau, *Seismological Research Letters*, 92(2A), 951-964.
- Cheng, J., Rong, Y., H. Magistrale, et al., 2017. An Mw-Based Historical Earthquake Catalog for Mainland China, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5), 2490-2500.
- Drucker D. C., and Prager W., 1952. Soil mechanics and plastic analysis for limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*, 10(2), 157-165.
- Du, F., Wen, X. Z., Zhang, P. Z., et al., 2009. Interseismic deformation across the Longmenshan fault zone before the 2008 M8.0 Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese with English abstract), 52(11):2729~2738.
- Gan, W. J., Zhang, P. Z., Shen, Z.-K., et al., 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements, *Journal of Geophysical Research*, 112(B08416).

- Gao, Y. J., Luo, G., Sun, Y. Q., 2020. Seismicity, Fault Slip Rates, and Fault Interactions in a Fault System, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2).
- Kanamori, H., Anderson, D. L., 1975. Theoretical basis of some empirical relations in seismology, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 65(5), 1073-1095.
- Khan, A. S., Huang, S., 1995. *Continuum Theory of Plasticity*, John Wiley & Sons, New York, pp.440.
- Li, C. X., Xu, X. W., Wen, X. Z., et al., 2011. Rupture segmentation and slip partitioning of the mid-eastern part of the Kunlun Fault, north Tibetan Plateau, *Science China Earth Sciences*, 54(11), 1730-1745.
- Li, H. B., Woerd, J. Van der, Tapponnier, P., et al., 2005. Slip rate on the Kunlun fault at Hongshui Gou, and recurrence time of great events comparable to the 14/11/2001, Mw~7.9 Kokoxili earthquake, *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1-2), 285-299.
- Li, J. H., 1998. A study on fault activity of Qinagtang and its neighboring areas in Xizang (Tibet) by using landsat images, *Seismology and Geology (in Chinese with English abstract)*, 20(03), 201-207.
- Li, P. E., Liao, L., Feng, J. Z., et al., 2019. Numerical simulation of relationship between stress evolution and strong earthquakes around the Bayan Har block since 1900. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract)*, 62(11):4170-4188.
- Li, Y. H., Liu, M., Wang, Q., et al., 2018. Present-day crustal deformation and strain transfer in northeastern Tibetan Plateau, *Earth and Planetary Science Letters*, 487, 179-189.
- Liu, G. Z., 2014. Tectonic deformation and major earthquakes on the boundary faults of Bayan Har block (PhD Dissertation). Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration.13-30.
- Liu, H. G., Li, F., Zhang X. L., et al., 2018. Late Quaternary Activity of Huya Fault on the Eastern Margin of the Tibetan Plateau, *Journal of Seismological Research (in Chinese with English abstract)*, 41(04), 594-604.
- Luo, G., Liu, M., 2010. Stress evolution and fault interactions before and after the 2008 Great Wenchuan earthquake, *Tectonophysics*, 491(1-4), 127-140.
- Luo, G., Liu, M., 2012. Multi-timescale mechanical coupling between the San Jacinto fault and the San Andreas fault, southern California, *Lithosphere*, 4(3), 221-229.
- Meade, B. J., 2007. Present-day kinematics at the India-Asia collision zone, *Geology*, 35(1), 81-84.
- Qinghai Earthquake Agency, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, 1999. Eastern Kunlun Active Fault Zone. Beijing: Seismological Press, 1-186.
- Shen, Z.-K., Lü, J., Wang, M., et al., 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B11).
- Shi, F., Li, A., Yang, X. P., et al., 2013. Research on late quaternary activity of the southeastern segment of ganzhi-yushu fault zone, *Seismology and Geology (in Chinese with English abstract)*, 35(01), 50-63.
- Sun J. B., Xu, X. W., Shen, Z. -K., et al. 2007. Parameter inversion of the 1997 Mani earthquake from INSAR co-seismic deformation field based on linear elastic dislocation model-I.

- Uniform slip inversion, Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract), 50(4): 1097-1110
- Sun Y. J., Fan, T. Y., Zhou, C. J., et al., 2015. Numerical modeling analysis of the tectonic deformation of Bayan Har block in the Tibetan Plateau. Geological Bulletin of China (in Chinese with English abstract), 34(1):71-82.
- Woerd, J. V. D., Ryerson, F. J., Tapponnier, P., et al., 2000. Uniform slip-rate along the Kunlun Fault: Implications for seismic behaviour and large-scale tectonics, Geophysical Research Letters, 27(16).
- Wang K., Shen Z.-K., 2011. Location and focal mechanism of the 1933 Diexi earthquake and its associated regional tectonics. Acta Seismologica Sinica (in Chinese with English abstract), 33(5): 557-567.
- Wang, H., Liu, M., Shen, X. et al., 2010. Balance of seismic moment in the Songpan-Ganze region, eastern Tibet: Implications for the 2008 Great Wenchuan earthquake, Tectonophysics, 491(1-4), 154-164.
- Wang, H., Liu, M. A., Cao, J. L., et al., 2011. Slip rates and seismic moment deficits on major active faults in mainland China, Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 116.
- Wang, M., Shen, Z. -K., Gan, W. J., et al., 2008. GPS monitoring of temporal deformation of the Xianshuihe fault, Science in China Series D: Earth Sciences, 51(9), 1259-1266.
- Wang, M., Shen, Z. -K., 2020. Present-Day Crustal Deformation of Continental China Derived From GPS and Its Tectonic Implications, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 125(2).
- Wang, Y. Z., Wang, M., Shen, Z.-K., et al., 2011. Inter-seismic deformation field of the Ganzi-Yushu fault before the 2010 Yushu earthquake, Seismology and Geology (in Chinese with English abstract), 33(03), 525-532.
- Wen, X. Z., Ma, S. L., Xu, X. W., et al., 2008. Historical pattern and behavior of earthquake ruptures along the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan faulted-block, southwestern China, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 168(1-2), 16-36.
- Xu, X. W., Chen, W. B., Yu, G. H., et al., 2002. Characteristic features of the surface ruptures of the Hoh Sai hu (Kunlunshan) earthquake (ms8.1), Northern Tibetan Plateau, China, Seismology and Geology (in Chinese with English abstract), 24(01), 1-13.
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Zheng, R. Z., et al., 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China, Science in China (Series D), 46(Suppl 2), 210-266
- Xu, X. W., Zhang, P. Z., Wen, X. Z. et al., 2005. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the Western Sichuan Province and its adjacent regions, Seismology and Geology (in Chinese with English abstract), 27(03), 446-461.
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Chen G. H., et al., 2008. Discovery of the Longriba Fault Zone in Eastern Bayan Har Block, China and its tectonic implication, Science in China Series D: Earth Sciences, 51(9), 1209-1223.
- Xu, X. W., Tan, X. B., Wu G. D., et al., 2011. Surface rupture features of the 2008 Yutian Ms 7.3 earthquake and its tectonic nature, Seismology and Geology (in Chinese with English abstract), 33(02), 462-471.

- Yi G. X., Long, F., Liang M. J., et al., 2017. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017 M7.0 Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, Northern Sichuan. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract), 60(10):4083-4097.
- Yi, S., Freymueller, J. T., Sun, W. K., 2016. How fast is the middle-lower crust flowing in eastern Tibet? A constraint from geodetic observations, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(9), 6903-6915.
- Yin, L., Luo G., 2022. Does middle-lower crustal flow exist in the eastern Tibetan Plateau? Insights from finite-element modeling and geodetic observations, Tectonophysics, 832, 229363.
- Zhang P. Z., Xu, X. W., Wen, X. Z., et al., 2008. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese with English abstract), 2008, 51(4):1066~1073.
- Zhao, G. G., 1996. Quaternary Faulting in North Qinghai-Tibet Plateau, Earthquake Research in China (in Chinese with English abstract), 12(02), 107-118.
- Zhou, R. J., He, Y. L., Huang Z. Z., et al., 2001. The slip rate and strong earthquake recurrence interval on the Qianning-Kangding segment of the Xianshuihe fault zone, Acta Seismologica Sinica (in Chinese with English abstract), 23(3), 250-262.
- Zhou, R. J., Li, Y., Densmore, A. L., et al., 2006. Active tectonics of the eastern margin of the Tibet Plateau, Mineralogy and Petrology (in Chinese with English abstract), 26(02), 40-51.
- Zhou, R. J., Ma, S. H., Cai, C. X., 1996. Late Quaternary Active Features of the Ganzi-Yushu Fault Zone, Earthquake Research in China (in Chinese with English abstract), 12(03), 250-260.

附中文参考文献

- 陈长云, 任金卫, 孟国杰, 等, 2012. 巴颜喀拉块体北东缘主要断裂现今活动性分析, 大地测量与地球动力学, 32(03), 27-30.
- 程佳和徐锡伟, 2018. 巴颜喀拉块体周缘强震间应力作用与丛集活动特征初步分析, 地震地质, 40(1), 133-154.
- 杜方, 闻学泽, 张培震, 等, 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震前横跨龙门山断裂带的震间形变, 地球物理学报, 52(11), 2729-2738.
- 李陈侠, 徐锡伟, 闻学泽, 等, 2011. 东昆仑断裂带中东部地震破裂分段性与走滑运动分解作用, 中国科学:地球科学, 41(09), 1295-1310.
- 李建华, 1998. 利用卫星图像研究西藏羌塘及邻区的断裂活动性, 地震地质, 20(03), 201-207.
- 李平恩, 廖力, 奉建州, 等, 2019. 1900 年以来巴颜喀拉块体应力演化与周缘强震关系的数值模拟, 地球物理学报, 62(11), 4170-4188.
- 刘冠中, 2014. 巴颜喀拉块体边界断裂的跨断层形变与地震活动(博士学位论文). 北京: 中国地震局地质研究所, 13-30.
- 刘华国, 李峰, 张效亮, 等, 2018. 青藏高原东缘虎牙断裂晚第四纪活动特征, 地震研究, 41(04), 594-604.
- 潘家伟, 2011. 西昆仑构造地貌与阿什库勒地区活动构造研究. 北京: 中国地质科学院, 博士

毕业论文.

- 青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所, 1999. 东昆仑断裂带. 北京: 地震出版社, 1-186.
- 石峰, 李安, 杨晓平, 等, 2013. 甘孜-玉树断裂带东南段晚第四纪活动性研究, 地震地质, 35(01), 50-63.
- 孙建宝, 徐锡伟, 沈正康, 等, 2007. 基于线弹性位错模型及干涉雷达同震形变场反演 1997 年玛尼 Mw7.5 级地震参数-I.均匀滑动反演, 地球物理学报, 50(04), 1097-1110.
- 孙玉军, 范桃园, 周春景, 等, 2015. 青藏高原巴颜喀拉地块构造形变特征的数值模拟, 地质通报, 34(1), 71-82.
- 王康和沈正康, 2011. 1933 年叠溪地震的发震位置、震源机制与区域构造, 地震学报, 33(05), 557-567.
- 王敏, 沈正康, 甘卫军, 等, 2008. GPS 连续监测鲜水河断裂形变场动态演化, 中国科学(D 辑: 地球科学), 38(05), 575-581.
- 王阎昭, 王敏, 沈正康, 等, 2011. 2010 年玉树地震震前甘孜-玉树断裂形变场分析, 地震地质, 33(03), 525-532.
- 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等, 2002. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库赛湖地震 ($M_s8.1$) 地表破裂带的基本特征, 地震地质, 24(01), 1-13.
- 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等, 2003. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源, 中国科学(D 辑:地球科学), 33(S1), 151-162.
- 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等, 2005. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型, 地震地质, 27(03), 446-461.
- 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华, 等, 2008. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义, 中国科学(D 辑:地球科学), 38(05), 529-542.
- 徐锡伟, 谭锡斌, 吴国栋, 等, 2011. 2008 年于田 MS 7.3 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论, 地震地质, 33(02), 462-471.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等, 2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 M7.0 地震及余震震源机制解与发震构造分析, 地球物理学报, 60(10), 4083-4097.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等, 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因, 地球物理学报, 51(4), 1066-1073.
- 赵国光, 1996. 青藏高原北部的第四纪断层运动, 中国地震, 12(02), 107-118.
- 周荣军, 何玉林, 黄祖智, 等, 2001. 鲜水河断裂带乾宁—康定段的滑动速率与强震复发间隔, 地震学报, 23(3), 250-262.
- 周荣军, 李勇, Densmore, A. L., 等, 2006. 青藏高原东缘活动构造, 矿物岩石, 26(02), 40-51.
- 周荣军, 马声浩, 蔡长星, 1996. 甘孜—玉树断裂带的晚第四纪活动特征, 中国地震, 12(03), 250-260.