

# 喜马拉雅主逆冲断层闭锁程度与滑动亏损特征研究

赵 静<sup>1,2</sup> 江在森<sup>3</sup> 牛安福<sup>2</sup> 武艳强<sup>4</sup> 占 伟<sup>4</sup> 魏文薪<sup>3</sup>

1 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京,100029  
2 中国地震台网中心,北京,100045  
3 中国地震局地震预测研究所中国地震局地震预测重点实验室,北京,100036  
4 中国地震局第一监测中心,天津,300180

**摘 要:**基于融合的 GPS 速度场结果,使用 DEFNODE 负位错反演程序估算了喜马拉雅主逆冲断层(the main Himalayan thrust, MHT)的闭锁程度和滑动亏损空间分布,并结合剖面结果分析了断层远、近场的运动特征。结果表明,MHT 的闭锁深度基本达到 18~24 km,断层面闭锁宽度达到 102~136 km,两次历史大地震破裂区域之间的未破裂段落和未发生大地震的段落闭锁深度更深,闭锁断面更宽,2015 年尼泊尔 Mw7.8 大地震就发生在两次大地震破裂区域之间的段落;MHT 总滑动亏损速率和垂直断层挤压滑动亏损速率自东向西逐渐减小,平行断层右旋滑动亏损速率则基本上自东向西逐渐增加;MHT 3 条剖面拟合结果也反映出其存在很强的闭锁。根据估算的此次 Mw7.8 地震的复发周期 230 年和最近 500 多年发生的大地震分布,认为 MHT 整条段落尤其是尼泊尔西部与印度接壤处和可能还没有破裂的不丹地区依然有发生 8 级大地震的危险。

**关键词:**尼泊尔地震;速度场融合;MHT;断层闭锁;滑动亏损

**中图法分类号:**P223      **文献标志码:**A

北京时间 2015-04-25T 14:11:26,尼泊尔发生 Mw7.8 大地震,美国地质调查局(USGS)测定震中位置为(28.147°N,84.708°E),震源深度为 15 km,震源机制结果显示此次地震为逆冲型破裂,地震发生于喜马拉雅构造带中段,由印度板块与欧亚板块俯冲碰撞形成。全球地震台网宽频带波形数据快速反演的地震破裂模型显示,主震断层面最佳模型走向为 295°,倾角为 10°,释放的地震矩为  $8.1 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$  (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20002926>)。该地震发生后,2015 年 4 月 25 日、4 月 26 日与 5 月 12 日,又分别发生了尼泊尔 Mw6.6、Mw6.7 和 Mw7.3 地震。

印度板块与欧亚板块的俯冲碰撞开始于距今约 55~65 Ma,至今仍处于强烈推挤过程中,在长期的陆-陆俯冲碰撞过程中,喜马拉雅构造带上大地震不断发生,也形成了一个由北向南发展的前展式逆断裂系,分别为喜马拉雅主中央断裂(the main

central thrust, MCT)、喜马拉雅主边界断裂(the main boundary thrust, MBT)和喜马拉雅主前缘断裂(the main frontal thrust, MFT)3 个巨大逆断裂系,其中 MBT 和 MFT 晚第四纪以来仍在活动<sup>[1]</sup>,而且在地壳下部存在喜马拉雅主逆冲断层(the main Himalayan thrust, MHT)<sup>[2-4]</sup>。目前有关喜马拉雅构造带的相关研究较为丰富,各国学者利用 GPS 观测资料、水准数据、InSAR 数据等对该地区不同区域之间的相对运动速率和 MHT 闭锁规律进行了研究<sup>[3,5-7]</sup>。

虽然目前对断层闭锁和块体相对运动研究较多,但有关断层滑动亏损速率和断层远近场运动速率等的研究较少。地壳变形动态特征是断层深浅部动力作用的表现形式,因此可以利用地表 GPS 观测结果反演断层深浅部的闭锁程度、滑动亏损分布等特征,进而结合历史地震分布和大地震空区等判断断裂带未来一段时期内的地震危险性。目前,喜马拉雅构造带附近 GPS 观测资料已

较为丰富。本文首先收集了覆盖印度板块、青藏高原及周边地区的 6 套 GPS 水平速度场并将其融合为同一参考框架的结果;然后以融合的速度场作为震间地壳变形的约束,通过 DEFNODE 负位错反演方法和剖面拟合方法分析了 MHT 的闭锁程度、闭锁断层面宽度、断层滑动亏损速率、远近场运动速率等,并讨论了该逆冲断层的地震危险性。

# 1 DEFNODE 负位错反演方法基本原理

本文反演研究采用 DEFNODE 负位错反演程序<sup>[8]</sup>,该方法在国际上已得到了较为广泛的应用<sup>[9-17]</sup>,程序假定块体内部点的运动为块体旋转、块体内部整体均匀应变、块体边界由于断层闭锁产生的滑动亏损而引起的地表弹性变形之和。若块体内部不存在整体均匀应变,理论表达式为:

$$V_i(X)=\sum_{b=1}^BH(X\in\Delta_b)[{}_R\Omega_b\times X]\cdot i-\sum_{k=1}^F\sum_{n=1}^{N_k}\sum_{j=1}^2\varphi_{nk}G_{ij}(X,X_{nk})[{}_h\Omega_f\times X_{nk}]\cdot j$$

(1)

式中,各参数的定义见文献[8,18],其中  $\varphi_{nk}$  为断层  $k$  上节点  $n$  处的闭锁程度,是断层滑动亏损速率与长期滑动速率的比值,若值为 0,表明断层完全蠕滑;若值为 1,表明断层完全闭锁。

若块体内部存在整体均匀应变,应变率的计算采用 Savage 等<sup>[19]</sup>给出的式(2)。此时模型原理为式(1)加式(2),其中式(2)表示块体内部均匀应变引起的速度量值大小。

$$\begin{bmatrix}V_{\lambda}\\V_{\theta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R\sin\theta_0\Delta\lambda&R\Delta\theta&0\\0&R\sin\theta_0\Delta\lambda&R\Delta\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{\epsilon}_{\lambda}\\\dot{\epsilon}_{2\theta}\\\dot{\epsilon}_{\theta}\end{bmatrix}$$

(2)

式中,各参数的定义见文献[9]。

利用 GPS 水平速度场数据反演块体旋转和断层闭锁程度等参数的过程中,参数拟合的不符值可由式(3)表征,其中各参数含义可参考文献[8,10,18]:

$$\chi_n^2=[\sum_{i=1}^n(r_i/f\sigma_i)^2]/\text{dof}$$

(3)

为得到使  $\chi_n^2$  达到最小的一组最佳参数值,本反演程序使用网格搜索和模拟退火算法求解,通过不断改变  $f$  值大小进行逐步择优,寻求最满意的  $f$  值,进而保证  $\chi_n^2\approx 1$ ,此时模型能够最佳地解释观测数据。

# 2 GPS 资料收集与融合

根据前人研究结果,本文收集了覆盖印度板块、青藏高原及周边地区的 6 套 GPS 速度结果(75°E~110°E,15°N~55°N),详细的数据信息见表 1。在应用表 1 结果进行地壳变形综合分析之前,应完成不同来源数据参考基准的统一。经过分析发现,表 1 中第 1 套速度场<sup>[20]</sup>的分布范围较大且包含大部分国际 GNSS 服务(International GNSS Service, IGS)站点,便于与其他结果融合,选定其为参考速度场。速度场融合的具体方法见文献[25],但时间尺度上未考虑观测时间点的差异性,因为目前求解速度场一般基于线性模型,认为速度在一段时间内都是线性的,尤其流动观测都是不定期观测,观测时间太短,获得的观测数据太少,只能用线性模型,因此观测时间点的差异性并不会对求解的速度场结果产生较大影响。表 1 中公共站速度矢量差的均方差结果显示,融合前后的速度残差较小,均方差均小于 2 mm/a,由于目前求解速度场自身的精度为 1~2 mm/a 左右,而本文融合的速度场精度与求解速度场自身的精度大致相当,表明融合结果满足研究震间变形的要求。

表 1 本文使用的 GPS 速度场资料  
Tab.1 GPS Velocity Field Used in This Work

| 序号 | 区域      | 点数  | 时间/年份     | 框架               | 融合时使用的 | 融合后残差均                   | 资料来源   |
|----|---------|-----|-----------|------------------|--------|--------------------------|--------|
|    |         |     |           |                  | 公共站个数  | 方差/(mm·a <sup>-1</sup> ) |        |
| 1  | 中国大陆    | 354 | 1991~2001 | ITRF97           | -      | -                        | 文献[20] |
| 2  | 青藏高原    | 45  | 1991~2001 | ITRF97           | 40     | 0.49                     | 文献[21] |
| 3  | 尼泊尔喜马拉雅 | 97  | 1995~2006 | ITRF2000         | 33     | 0.43                     | 文献[6]  |
| 4  | 青藏高原及周边 | 726 | 1998~2004 | ITRF2000-Eurasia | 10     | 1.48                     | 文献[22] |
| 5  | 印度及邻区   | 229 | 1995~2007 | ITRF2000         | 36     | 0.35                     | 文献[23] |
| 6  | 青藏高原    | 750 | 1998~2013 | ITRF2008-Eurasia | 11     | 1.72                     | 文献[24] |

注:ITRF2000-Eurasia 为欧亚基准,是 ITRF2000 的结果去除了相对于欧亚板块的整体运动量。ITRF2008-Eurasia 以此类推

图 1 给出了融合后的 ITRF97 参考框架下研究区域的 GPS 速度场分布。结果显示,印度板块

以北东向运动为主,青藏高原内部的地壳运动具有顺时针方向旋转的特点,自南向北逐渐由北东向偏转向东向,且量值有所减小,表明青藏高原内部存在近南北向挤压应变积累且东西向断层存在左旋剪切应变变形背景<sup>[25]</sup>。

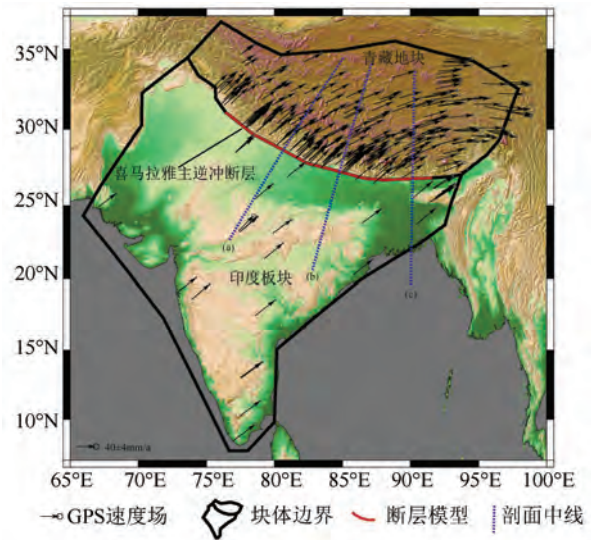


图 1 研究区域 GPS 速度场结果

Fig.1 The GPS Velocity Field in the Study Region

### 3 断层闭锁程度与滑动亏损速率结果

#### 3.1 断层模型与最优模型

本文研究区域以 MHT 为界,包含南部的印度板块和北部的青藏地块(如图 1 所示,因本文主要研究 MHT,青藏地块只包含鲜水河-玉树-玛尔盖查卡断裂带以南的区域)。数据约束方面,包括 320 个 GPS 测点参与反演,其中印度板块 46 个,青藏地块 274 个。根据相关文献<sup>[3,6,7]</sup>的研究结果,断层倾角设为  $10^{\circ}$ 。断裂总长度为 1 616 km,断面总宽度为 241 km;沿着 MHT 走向共设 8 条等深线,深度依次为 0.1、6、12、18、24、30、36 和 42 km,每条等深线上有 16 个节点。利用 DEF-NODE 程序可反演计算得到每个节点处断层的闭锁程度,进而通过双线性插值方法计算相邻节点之间断层网格(沿走向方向长 10 km,深度方向宽 6 km)区域的闭锁程度。对断层节点  $\varphi$ (闭锁程度)值加约束为:节点均为独立节点, $\varphi$  值从地表沿垂直等深线向下单调递减(0.1 km 与 6 km 深度处的  $\varphi$  值相等)。

由于印度板块的内部变形很小<sup>[3,6]</sup>,因此本文假定印度板块内部不存在整体均匀应变。Gan 等<sup>[23]</sup>以鲜水河-玉树-玛尔盖查卡断裂带将青藏高

原分为南北两大部分,南部区域即为本文的研究区域。由于研究区域距离 MHT 较近,印度板块的推挤作用、喜马拉雅主逆冲断层的闭锁作用是其运动与变形的动力源,因此将该区域作为一个大的块体来研究,暂不考虑区域内亚块体的内部变形差异。

首先,假定青藏地块内部的变形只是由于 MHT 的逆冲运动和闭锁作用引起的弹性变形(假定 1),其内部不存在整体均匀应变。对于假定 1,通过不断试算得到了最优模型,其中 GPS 速度场误差权重因子  $f$  取为 4.2,  $\chi^2_n \approx 0.991$ (观测值个数为 640,自由度为 522)。为了观察模型拟合效果,图 2(a)给出了残差分布情况。结果显示,假定 1 的最优模型中,印度板块测点拟合较好,除了块体东北角几个测点的残差稍大以外,其他测点的残差基本保持在 5 mm/a 以内(大部分测点残差处在误差范围之内)。青藏地块断层附近测点拟合很好,残差基本处在测点误差范围之内;而块体东部和西部远离断层、处于青藏地块的东西边缘处的测点拟合较差,这些测点由于距离断层较远,受断层闭锁的约束相对较弱,而且青藏地块南边受到喜马拉雅东、西构造节不同方向的挤压,造成其东、西边缘处分别具有东向、西向的运动特征,使得青藏块体的整体运动特征减弱。对假定 1 最优模型的残差进行计算,得到了青藏地块的残差应变,其中  $E_{EE} = 6.88 \times 10^{-9} \cdot a^{-1}$ ,  $E_{NN} = -5.08 \times 10^{-9} \cdot a^{-1}$ ,  $E_{NE} = -3.66 \times 10^{-9} \cdot a^{-1}$ ,约为北东  $16^{\circ}$  的主压和与之垂直方向的主张应变。这表明青藏地块内部除了由于 MHT 的逆冲运动和闭锁作用引起的弹性变形外,整体均匀应变的量值也不容忽视<sup>[7]</sup>。对于假定 2,将假定 1 的最优模型中得到的整体均匀应变值作为约束数据加入到模型中,通过不断试算得到了最优模型,其中 GPS 速度场误差权重因子  $f$  取 3.09,  $\chi^2_n \approx 1.001$ (自由度为 528)。图 2(b)残差分布结果显示,假定 2 的最优模型中,印度板块的拟合情况与假定 1 基本一致;青藏地块东部和西部远离断层的测点拟合情况相对于假定 1 的拟合情况有了明显改善,其误差基本在 10 mm/a 以内,而且也不具有明显的规律性,断层附近测点拟合情况与假定 1 基本一致。综上分析,认为 MHT 附近的变形主要由断层逆冲运动和闭锁作用引起,同时青藏地块内部存在整体均匀应变,因此选择假定 2 的最优模型作为本研究的最优模型。

#### 3.2 块体旋转欧拉极

表 2 给出了假定 2 最优模型计算得到的印度



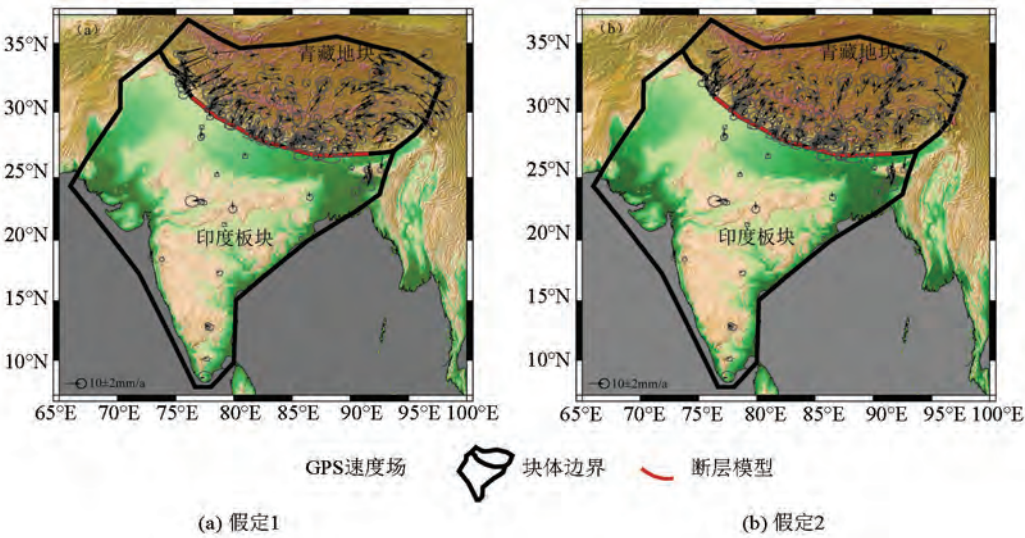


图 2 最优模型速度残差  
Fig.2 Residual Velocities of the Optimal Model

板块与青藏地块的欧拉极,结果显示在 ITRF97 参考框架下,印度板块为逆时针旋转,青藏地块为顺时针旋转。表 2 显示,Bettinelli 等<sup>[6]</sup>计算的

ITRF2000 下印度板块的欧拉极和 Ader 等<sup>[3]</sup>计算的 ITRF2005 下印度板块的欧拉极与本文得到的欧拉极基本一致。

表 2 块体欧拉矢量  
Tab.2 Euler Vectors of Blocks

| 欧拉矢量                   | 经度(W)     | 纬度(N)     | 速率/(°·Ma <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|-----------|-----------|--------------------------|
| 印度板块(ITRF97)           | -6.797 2° | 51.840 2° | 0.493 4±0.018 3          |
| 印度板块(参考文献[8],ITRF2000) | -10.915°  | 51.409°   | 0.483 0±0.015            |
| 印度板块(参考文献[5],ITRF2005) | -1.34°    | 51.4°     | 0.502 9±0.007 2          |
| 青藏地块(ITRF97)           | 97.611 2° | -7.103 8° | -0.607 2±0.038 9         |

注:速率为负代表顺时针旋转,反之为逆时针旋转

3.3 断层闭锁程度

根据假定 2 的最优模型,得到 MHT 闭锁程度的空间分布(图 3),图 3 中震源机制解数据来源于 <http://www.globalcmt.org>,其中黑色五角星为此次震中位置,历史地震破裂区域参考文献[3,6,26]的研究结果绘制。最优模型结果表明,整条 MHT 的闭锁深度基本达到 18~24 km,断层面闭锁宽度达到 102~136 km;而两次大地震之间的未破裂区域和未发生大地震的不丹地区断层基本为完全闭锁,闭锁深度为 42 km、闭锁断层面宽度达到 241 km。该结果与文献[3,6]相比长度更长,除了尼泊尔地区的断层外,还包括了东部的不丹地区和西部尼泊尔与印度接壤地区的断层,且 GPS 速度场的数据更为丰富;但反演的断层闭锁深度和闭锁断层面宽度在两次大地震之间的未破裂区域结果有所差异。本文除了反演断层闭锁程度,还反演了断层滑动亏损速率的分布。

喜马拉雅构造带是一条强烈活动带,沿这条构造带发生过多 8 级及 8 级以上大地震,图 3 中标注了破裂范围较大的 3 次地震,其中 1905 年

印度坎格拉 8.0 级地震的破裂区域参考文献[6],1505 年尼泊尔格尔纳利河 8.2 级地震的破裂区域参考文献[3],1934 年尼泊尔比哈尔邦 8.1 级地震的破裂区域参考文献[3,6,26]。这 3 次大地震的破裂段落附近,其闭锁深度和闭锁程度较研究区域的其他位置相对较弱。1934 年尼泊尔比哈尔邦 8.1 级地震破裂段落中西段附近,其 12 km 深度以下的闭锁程度约为 0.60;破裂段落中段附近基本为完全闭锁;破裂段落东段闭锁程度约为 0.85。1505 年尼泊尔格尔纳利河 8.2 级地震破裂段落附近,其 24 km 深度以下基本为完全蠕滑状态。1905 年印度坎格拉 8.0 级地震破裂段落附近,其 15 km 深度以下基本为完全蠕滑状态。

两次大地震破裂区域之间的未破裂段落和未发生大地震的段落闭锁深度更深、闭锁断层面更宽。相关研究表明,此次尼泊尔地震的浅部破裂紧邻 1934 年 8.1 级地震的地表破裂<sup>[26,27]</sup>,余震分布与 1833 年 7.6 级地震的宏观震中基本重合,其破裂填补了前两次地震破裂以西 100 km 左右的空区,可见此次地震是前两次地震向西继续延伸

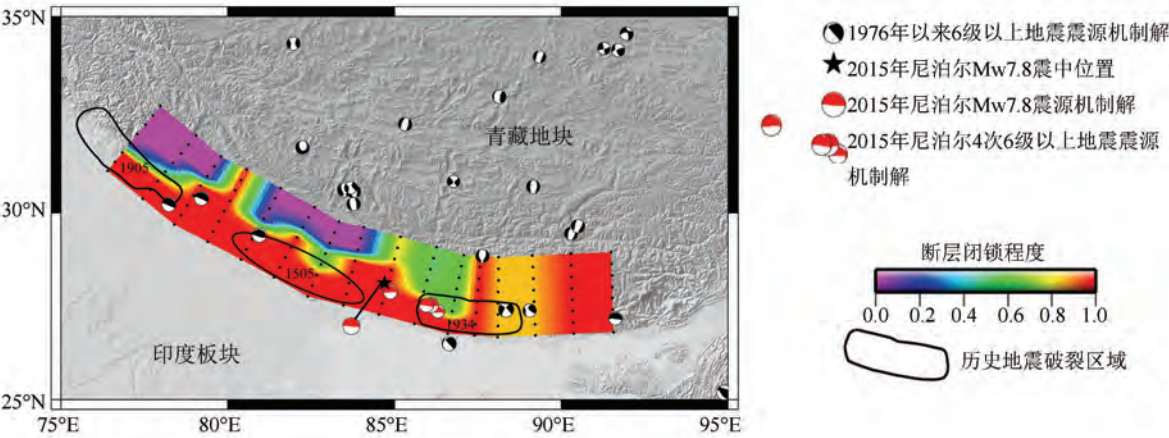


图 3 喜马拉雅主逆冲断层闭锁程度

Fig.3 Fault Locking of the Main Himalaya Thrust Fault

的结果<sup>[26,28]</sup>。2015 年尼泊尔 Mw7.8 大地震发生在强闭锁区域内,一定程度上证明了计算结果的可靠性。

震间期,MHT 的闭锁部分吸收了块体俯冲挤压造成的弹性应变,直到有 8 级甚至更大地震发生时,弹性应变才得到释放<sup>[3,29]</sup>,而大地震发生的频率也并不高<sup>[30]</sup>,Feldl 和 Bilham<sup>[31]</sup>曾估计喜马拉雅地区 Mw8.6 大地震的复发间隔约为 500 a。根据 USGS<sup>[26]</sup>的计算结果,此次地震的最大滑移量在 4 m 左右,结合 § 3.4 中该位置处约 17.5 mm/a 的垂直断层滑动亏损速率,估算该位置处 Mw7.8 地震的复发周期约为 230 a。目前来看,由于最近 500 多年只发生了 1905 年印度坎格拉 8.0 级、1934 年尼泊尔比哈尔邦 8.1 级和 2015 年尼泊尔 Mw7.8 地震,因此整条段落尤其是尼泊尔西部与印度接壤处<sup>[30]</sup>和可能还没有破裂的不丹地区<sup>[26]</sup>依然有发生 8 级大地震的危险。

3.4 断层滑动亏损速率分布

图 4(a)~4(c)分别为 MHT 总滑动亏损速率、垂直断层滑动亏损速率、平行断层滑动亏损速率。图 4(a)显示,MHT 总滑动亏损速率呈现自东向西逐渐减小的特征,最东端滑动亏损速率约为 28.2 mm/a,中间完全闭锁区域的滑动亏损速率逐渐过渡,到最西端滑动亏损速率降低到约为 7.9 mm/a。

喜马拉雅构造带的地壳缩短吸收了印度板块和欧亚板块俯冲汇聚的很大一部分量值<sup>[6]</sup>。图 4(b)显示,MHT 垂直断层挤压滑动亏损速率也呈现自东向西逐渐减小的特征,最东端挤压滑动亏损速率约为 28.0 mm/a,中间完全闭锁区域的滑动亏损速率逐渐过渡,到最西端挤压滑动亏损速率降低到约为 6.4 mm/a。其中,尼泊尔境内最

东端挤压滑动亏损速率约为 22.1 mm/a,最西端挤压滑动亏损速率约为 11.0 mm/a,这与 Ader<sup>[3]</sup>、Bettinelli 等<sup>[6]</sup>、Lavé 和 Avouac<sup>[29]</sup>以及 Ponraj 等<sup>[4]</sup>的研究结果基本一致。MHT 全新世时期的平均地质缩短速率为  $21 \pm 1.5$  mm/a<sup>[29]</sup>,因此本文的计算结果与地质结果也较为吻合。

图 4(c)显示,MHT 平行断层右旋滑动亏损速率基本上自东向西逐渐增加。其中,最东端右旋滑动亏损速率约为 2.0 mm/a,在苏丹与尼泊尔之间的部分区域降低到约 0.4 mm/a,进入尼泊尔后逐渐增加,到尼泊尔西部达到最大值 7.0 mm/a,在印度约为 3.3~5.2 mm/a。

另外,在获得融合的 ITRF97 参考框架下的 GPS 速度场后,将其统一扣除相对于欧亚板块的整体运动量,获得欧亚参考基准的 GPS 速度场;然后将不同参考基准速度场都进行负位错反演,通过对比两种反演结果发现,其反演的闭锁程度、滑动亏损分布等结果几乎完全一样,这表明 DEFNODE 负位错反演结果与速度场的参考基准无关,与文献<sup>[32]</sup>一致,即参考基准的不同并不影响地壳的相对运动,因此也不影响块体之间断层的相对运动与闭锁。

3.5 剖面拟合结果

图 5(a)~5(c)为 MHT 3 条剖面的 GPS 站速度场与最优模型计算结果的拟合情况(分别对应图 1(a)~1(c)剖面),每条剖面长约 1 600 km,宽 390 km,基本跨越本文研究断层的西段、中段和东段。图 5(a)显示垂直断层的挤压速率约为 14 mm/a,平行断层的右旋滑动速率约为 7 mm/a。图 5(b)显示垂直断层的挤压速率约为 19 mm/a、平行断层的右旋滑动速率约为 5 mm/a。图 5(c)显示垂直断层的挤压速率约为 26 mm/a,



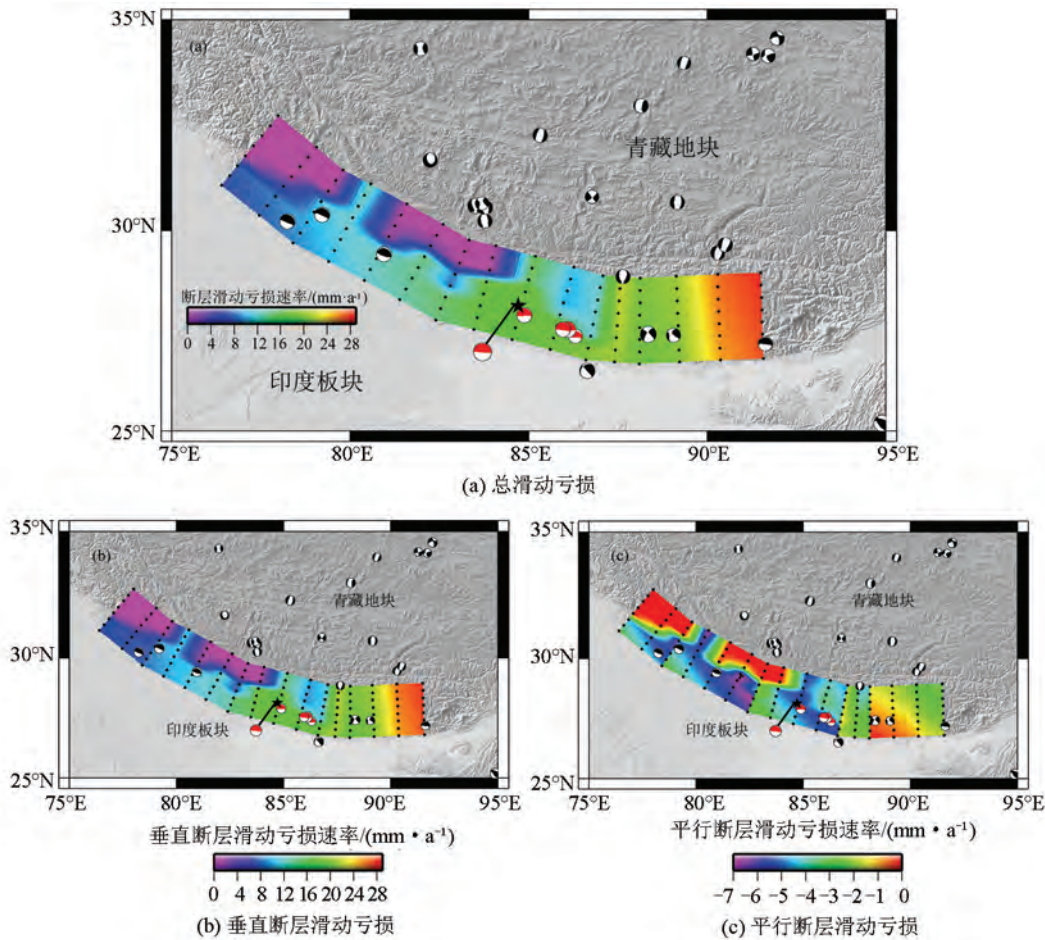


图 4 喜马拉雅主逆冲断层滑动亏损速率  
Fig.4 Fault Slip Deficit of the Main Himalaya Thrust Fault

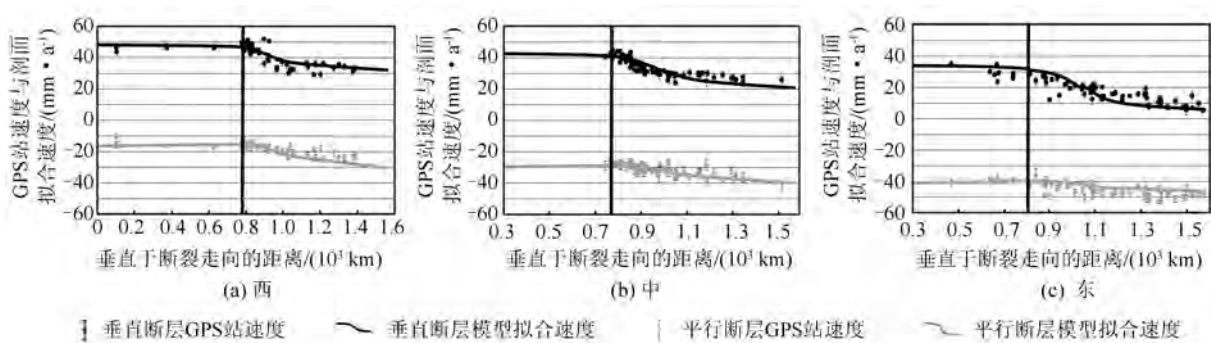


图 5 横跨喜马拉雅主逆冲断层剖面的 GPS 站速度和最优模型结果拟合  
Fig.5 GPS Velocity Profiles Across the Main Himalaya Thrust Fault and the Model Fitting Results

平行断层的右旋滑动速率约为 3 mm/a。剖面拟合结果与断层面上的滑动亏损速率基本一致。

通过分析发现,垂直和平行断裂带走向的挤压缩短变形和剪切变形主要发生在该断裂带的北侧,即青藏块体内部,而断裂带内部几乎无变形,即喜马拉雅主逆冲断裂带内部的 GPS 站速度与南侧印度板块中的几乎没有差异。另外,MHT 的剖面结果反映的变形与 2008 年四川汶川  $M_s$  8.0地震前,横跨龙门山断裂带中段的 GPS 变形

图像<sup>[9,18]</sup>非常相似,这也反映出喜马拉雅主逆冲断裂带存在很强的闭锁。

4 结 语

本文通过对印度板块、青藏高原及周边地区的 6 套 GPS 速度场数据进行融合,得到了近似统一参考框架下的速度场结果,然后以融合的速度场作为震间地壳变形的约束,采用 DEFNODE 负位

错反演程序估算了 MHT 的闭锁程度和滑动亏损空间分布特征;结合剖面结果分析了断层远、近场的运动特征,并讨论了该逆冲断层的地震危险性。

1)负位错模型反演结果表明,MHT 的闭锁深度基本达到 18~24 km,断层面闭锁宽度达到 102~136 km;3 次发生过大地震的破裂段落附近,其闭锁深度较浅、闭锁断层面较窄;两次大地震破裂区域之间的未破裂段落和未发生大地震的段落闭锁深度更深、闭锁断层面更宽。2015 年尼泊尔  $M_w$ 7.8 大地震就发生在两次大地震破裂段落之间闭锁更深、更强的区域。根据此次地震 4 m 左右<sup>[26]</sup>的最大滑移量的计算结果,结合该位置处约 17.5 mm/a 的垂直断层滑动亏损速率,我们估算该位置处  $M_w$ 7.8 地震的复发周期约为 230 a。由于最近 500 多年只发生了 1905 年印度坎格拉 8.0 级、1934 年尼泊尔比哈尔邦 8.1 级和 2015 年尼泊尔  $M_w$ 7.8 地震,因此整条段落尤其是尼泊尔西部与印度接壤处和可能还没有破裂的不丹地区依然有发生 8 级大地震的危险。此外,我们将不同参考基准速度场的反演结果进行对比,其反演的闭锁程度、滑动亏损分布等结果几乎完全一样,这表明反演结果与速度场的参考基准无关。

2)MHT 总滑动亏损速率和垂直断层挤压滑动亏损速率呈现自东向西逐渐减小的特征,其中最东端垂直断层挤压滑动亏损速率约为 28.0 mm/a,到最西端垂直断层挤压滑动亏损速率约为 6.4 mm/a。平行断层右旋滑动亏损速率基本上自东向西逐渐增加,尤其在尼泊尔,右旋滑动亏损速率从约 0.4 mm/a 增大到约 7.0 mm/a。

3)MHT 的 3 条剖面拟合结果与相应位置处断层面的滑动亏损速率基本一致。垂直和平行断裂带走向的挤压缩短变形和剪切变形主要发生在断裂带北侧的青藏块体内部,而断裂带内部和南侧印度板块几乎无变形,反映出 MHT 存在很强的闭锁。汶川地震与 2015 年尼泊尔地震都属于逆冲型地震,其中汶川地震属于仰冲型地震(主动盘为上盘)、尼泊尔地震属于俯冲型地震(主动盘为下盘),这两次大地震的发生对加深对逆冲型地震的理解和认识起到了重要作用。

参 考 文 献

[1] Deng Qidong, Cheng Shaoping, Ma Ji, et al. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2014, 57(7): 2 025-2 042(邓起东,程绍平,马冀,等.青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. 地球

物理学报, 2014, 57(7): 2 025-2 042)

[2] Xu Zhiqin, Wang Qin, Zeng Lingsen, et al. Three-Dimensional Extrusion Model of the Great Himalaya Slice [J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 671-680(许志琴,王琴,曾令森,等.高喜马拉雅的三维挤出模式[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 671-680)

[3] Ader T, Avouac J P, Jing L Z, et al. Convergence Rate Across the Nepal Himalaya and Interseismic Coupling on the Main Himalayan Thrust: Implications for Seismic Hazard [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, 117(B4): 389-399

[4] Ponraj M, Miura S, Reddy C D, et al. Estimation of Strain Distribution Using GPS Measurements in the Kumaun Region of Lesser Himalaya [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2010, 39(6): 658-667

[5] Wang Qi, You Xinzhaoh, Wang Wenying, et al. GPS Measurement and Current Crustal Movement Across the Himalaya [J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 1998, 18(3): 43-50(王琪,游新兆,王文颖,等.跨喜马拉雅的 GPS 观测与地壳形变[J]. 地壳形变与地震, 1998, 18(3): 43-50)

[6] Bettinelli P, Avouac J P, Flouzat M, et al. Plate-Motion of India and Interseismic Strain in the Nepal Himalaya from GPS and DORIS Measurements [J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(8-11): 567-589

[7] Stevens V L, Avouac J P. Interseismic Coupling on the Main Himalayan Thrust [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(14): 5 828-5 837

[8] McCaffrey R. Crustal Block Rotations and Plate Coupling [J]. *Plate Boundary Zones, AGU Geodynamics Series*, 2002, 30: 101-122

[9] Zhao Jing, Wu Yanqiang, Jiang Zaisen, et al. Fault Locking and Dynamic Deformation of the Longmenshan Fault Zone Before the 2013 Lushan Ms7.0 Earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(5): 681-691(赵静,武艳强,江在森,等.芦山地震前龙门山断裂带闭锁程度与变形动态特征研究[J]. 地震学报, 2013, 35(5): 681-691)

[10] Zhao Jing, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, et al. Analysis of Reliability and Stability of Inversion Result with Negative Dislocation Model of Defnode [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33(1): 21-24(赵静,江在森,武艳强,等. Defnode 负位错模型反演结果的可靠性和稳定性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(1): 21-24)

[11] Manaker D M, Calais E, Freed A M, et al. Interseismic Plate Coupling and Strain Partitioning in the Northeastern Caribbean [J]. *Geophys. J. Int.*, 2008, 174(3): 889-903

[12] McCaffrey R. Block Kinematics of the Pacific-North America Plate Boundary in the Southwestern United

- States from Inversion of GPS, Seismological, and Geologic Data [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110 (B7): 139-148
- [13] McCaffrey R, Qamar A I, King R W, et al. Fault-Locking, Block Rotation and Crustal Deformation in the Pacific Northwest [J]. *Geophys. J. Int.*, 2007, 169(3): 1 315-1 340
- [14] Wallace L M, Beavan J, McCaffrey R, et al. Subduction Zone Coupling and Tectonic Block Rotations in the North Island, New Zealand [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109(B12): 159-163
- [15] Wallace L M, Stevens C, Silver E, et al. GPS and Seismological Constraints on Active Tectonics and Arc-Continent Collision in Papua New Guinea: Implications for Mechanics of Microplate Rotations in a Plate Boundary Zone [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109(B5): 219-240
- [16] Wallace L M, Beavan J, McCaffrey R, et al. Balancing the Plate Motion Budget in the South Island, New Zealand Using GPS, Geological and Seismological Data [J]. *Geophys. J. Int.*, 2007, 168(1): 332-352
- [17] Zhao Jing, Jiang Zaisen, Niu Anfu, et al. Study on Dynamic Characteristics of Fault Locking and Fault Slip Deficit in the Eastern Boundary of the Sichuan-Yunnan Rhombic Block [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2015, 58(3): 872-885(赵静, 江在森, 牛安福, 等. 川滇菱形块体东边界断层闭锁程度与滑动亏损动态特征研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(3): 872-885)
- [18] Zhao Jing, Jiang Zaisen, Wu Yanqiang, et al. Study on Fault Locking and Fault Slip Deficit of the Longmenshan Fault Zone Before the Wenchuan Earthquake [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2012, 55(9): 2 963-2 972(赵静, 江在森, 武艳强, 等. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究[J]. 地球物理学报, 2012, 55(9): 2 963-2 972)
- [19] Savage J C, Gan W J, Svarc J L. Strain Accumulation and Rotation in the Eastern California Shear Zone [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106 (B10): 21 995-22 007
- [20] Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. Present-Day Crustal Deformation in China Constrained by Global Positioning System Measurements [J]. *Science*, 2001, 294(5 542): 574-577
- [21] Chen Q Z, Freymueller J T, Wang Q, et al. A Deforming Block Model for the Present-Day Tectonic of Tibet [J]. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, B01403, doi: 10.1029/2002JB002151
- [22] Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. Present-Day-Crustal Motion with the Tibetan Plateau Inferred from GPS Measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112(B08): 582-596
- [23] Banerjee P, Bürgmann R, Nagarajan B, et al. Intra-plate Deformation of the Indian Subcontinent [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35, L18301, doi:10.1029/2008GL035468
- [24] Liang S, Gan W, Shen C, et al. Three-Dimensional Velocity Field of Present-Day Crustal Motion of the Tibetan Plateau Derived from GPS Measurements [J]. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 2013, 118, doi:10.1002/2013JB010503
- [25] Zhan Wei, Wu Yanqiang, Liang Hongbao, et al. Characteristics of the Seismogenic Model for the 2015 Nepal Mw7.8 Earthquake Derived from GPS Data [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2015, 58(5): 1 818-1 826(占伟, 武艳强, 梁洪宝, 等. GPS 观测结果反映的尼泊尔 Mw7.8 地震孕震特征[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1 818-1 826)
- [26] USGS. The April-May 2015 Nepal Earthquake Sequence [EB/OL]. [http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/Nepal\\_Slides.pdf](http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/Nepal_Slides.pdf), 2015
- [27] Avouac J P, Meng L, Wei S, et al. Lower Edge of Locked Main Himalayan Thrust Unzipped by the 2015 Gorkha Earthquake [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(9): 1-6
- [28] Zhang Yong, Xu Lisheng, Chen Yuntai. Rupture Process of the 2015 Nepal Mw7.9 Earthquake: Fast Inversion and Preliminary Joint Inversion [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2015, 58(5): 1 804-1 811(张勇, 许力生, 陈运泰. 2015 年尼泊尔 Mw7.9 地震破裂过程:快速反演与初步联合反演[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1 804-1 811)
- [29] Lavé J, Avouac J P. Active Folding of Fluvial Terraces Across the Siwaliks Hills, Himalayas of Central Nepal [J]. *J. Geophys. Res.*, 2000, 105(B3): 5 735-5 770
- [30] Bilham R, Larson K, Freymueller J, et al. GPS Measurements of Present-Day Convergence Across the Nepal Himalaya [J]. *Nature*, 1997, 386 (6 620): 61-64
- [31] Feldl N, Bilham R. Great Himalayan Earthquakes and the Tibetan Plateau [J]. *Nature*, 2006, 444 (7 116): 165-170
- [32] Jiang Zaisen, Liu Jingnan. The Method in Establishing Strain Field and Velocity Field of Crustal Movement Using Least Squares Collocation [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2010, 53(5): 1 109-1 117(江在森, 刘经南. 应用最小二乘配置建立地壳运动速度场与应变场的方法[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1 109-1 117)



Characteristics of Fault Locking and Fault Slip Deficit  
in the Main Himalaya Thrust Fault

ZHAO Jing<sup>1,2</sup> JIANG Zaisen<sup>3</sup> NIU Anfu<sup>2</sup> WU Yanqiang<sup>4</sup> ZHAN Wei<sup>4</sup> WEI Wenxin<sup>3</sup>

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

2 China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

3 CEA Key laboratory of Earthquake Prediction, Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

4 First Crust Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

**Abstract:** An Mw7.8 earthquake occurred in Nepal on April 25, 2015. The epicenter is (28.147°N, 84.708°E). It occurred as a result of fault thrusting on the main thrust interface between the subducting India plate and the overriding Eurasia plate to the north. The movement and locking of the main Himalaya thrust (MHT) fault and its seismic potential need us to do some further study. We collected 6 sets of GPS horizontal velocity field covering Indian plate, Qinghai-Tibet plateau and adjacent areas, and transformed them to an approximately unified reference frame. Then we used the negative dislocation model of DEFNODE to invert the spatial fault locking and fault slip deficit in the MHT, and analyzed the far-near field movement of the fault combining with the GPS velocity profiles.

The results show that the locking depth of the MHT is about 18-24 km, and the locking width of the fault plane reaches 102-136 km. The locking depth is deeper and the locking width of the plane is wider in the fault between two major historical earthquakes rupture area and the fault of no historical earthquakes. The Mw7.8 Nepal Earthquake is located in the area between two major historical earthquakes rupture area where the fault is relatively deeply and tightly locked. The total slip deficit and vertical compressional slip deficit of the MHT gradually reduce from east to west. The vertical compressional slip deficit of the easternmost segment of the fault is about 28.0 mm/a, which gradually reduces in the tightly locked area, and decreases to about 6.4 mm/a at the westernmost segment. The dextral strike-slip of parallel slip deficit changes from 0.4-7.0 mm/a from east to west in Nepal. The three profile model fitting results of the MHT are consistent with the slip deficit of corresponding fault plane, and it is very like the profile results across the middle segment of the Longmenshan fault before the 2008 Wenchuan earthquake, which reflects that the MHT is tightly locked. We estimated that the Mw7.8 earthquake recurrence is about 230 years according to the peak slip and the vertical compressional slip deficit at the epicenter. Because only the 1905 India Kangra 8.0 earthquake, the 1934 Nepal Bihar 8.1 earthquake and this Nepal Mw7.8 earthquake happened for recent 500 years, it is possible that M8 earthquake happens on this fault especially on the border of Nepal and India and possibly unruptured Bhutan.

**Key words:** Nepal Earthquake; velocity fields combination; main Himalaya thrust fault (MHT); fault locking; slip deficit

**First author:** ZHAO Jing, PhD candidate, assistant researcher, specializes in processing GPS data, analyzing crustal deformation and inverting fault locking. E-mail: zhaozhengjiajia1@126.com

**Corresponding author:** NIU Anfu, PhD, professor. E-mail: niuanfu01@sina.com

**Foundation support:** The Spark Program of Earthquake Technology of CEA, No. XH15049Y; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41330314, 41274008; the Earthquake Tracking of 2015, No. 2015010201.