

文章编号: 1000-8349(2007)03-0270-09

对 2004 年苏门答腊 – 安达曼岛 地震的测地学机制讨论

杨志根^{1,2}

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 动力大地测量重点实验室, 武汉 430077)

摘要: 采用 GPS 测地学观测资料, 基于 NUVEL-1A 板块运动模型, 分别估计和讨论了 INDI 板块与 Burma 微板块之间、AUST 板块与 Burma/SE EURA 板块之间的聚敛率, 以及 INDI 与 AUST 板块间的相对速率。结果显示, 沿苏门答腊 – 尼科巴群岛和沿安达曼群岛两个阶段的地壳破裂分别与 AUST 板块和 Burma 板块间、INDI 板块和 Burma 板块间的聚敛率密切相关, 从板块运动学角度提供了解释整个苏门答腊 – 安达曼群岛地壳破裂带上板块间耦合由南向北递减观测结论的佐证; 在 NUVEL-1A 板块运动模型的背景下, 2004 年苏门答腊 – 安达曼岛主震应当为 AUST 板块相对于 Burma/SE EURA 板块以近 60 mm/a、方向 NE 30° ~ 35° 的运动所致, 而非 INDI 板块或印 – 澳 (INDI-AUST) 板块运动所致; 根据 2004 年苏门答腊 – 安达曼岛地壳破裂特征并结合其余震的分布, 进一步肯定了 AUST 板块西北边界带的地质位置分布。

关键词: 空间大地测量; 地震; NUVEL-1A 板块运动模型; GPS; 板块间聚敛率; 地壳破裂的测地学机制

中图分类号: P315.1, P541 文献标识码: A

1 引 言

2004 年 12 月 26 日印度尼西亚苏门答腊岛西北印度洋海底发生了 $M_W = 9.3$ 级的特大地震, 主震位于澳大利亚 (AUST) 板块与缅甸 (Burma) 微板块 / 东南欧亚 (SE EURA) 板块之间断层带附近 (N 3.316°, 东经 95.854°), 地震引起的沿苏门答腊 – 安达曼岛的地壳破裂起始于主震位置的 SW 侧, 快速向 NW 而后向 NE 方向延伸, 直至 N15° 附近。由于 AUST 板块以 60 mm/a 的运动速度相对于 Burma/SE EURA 板块作俯冲运动, 并且这种俯冲由于受到板块间百年时间尺度的阻挡应力作用后, 产生 Burma/SE EURA 板块的逆断层作用, 引发了 $M_W = 9.3$ 级的特大地震。2004 年苏门答腊 – 安达曼岛地震是属于俯冲型板块边界大地震, 它是由

收稿日期: 2007-02-07; 修回日期: 2007-03-08

基金项目: 中国科学院动力大地测量重点实验室创新课题

俯冲板块和上覆板块之间发生的浅源逆断层作用形成的^[1]。上述各板块的分布和运动, 以及主震和地壳破裂位置可参见本文第 3 节的表 2 和图 1。

根据对地震动量矩和断层模型的估计, Park 等人 (2005)^[2], Bilham 等人 (2005)^[3] 和 Ammon 等人 (2005)^[4] 肯定了在北 3° ~ 15° 纬度带的苏门答腊 - 安达曼群岛的板块边界带产生了板块间的相对位移, 触发产生海啸的破裂带位于整个破裂带的南端; 而北 9° 以北的破裂带是缓慢形成的, 从印尼班达亚齐省到尼科巴群岛的板块间的最大位移达 20 m, 该最大位移发生在北 3° ~ 6° 的纬度带, 向北逐渐减小, 在安达曼群岛只有约不到 7 m。

基于现有的研究手段, 我们可能仍不清楚到底是什么板块的运动真正触发了 2004 年苏门答腊 - 安达曼岛的大地震, 以及是什么机制引起了上述主震后的单向、快速、大范围和长距离的地壳破裂。近年来对该地震的研究中有两种 INDI 和 AUST 板块边界划分模型已普遍被采用。一种是 INDI 板块与 AUST 板块之间大致呈 SW(约 S 2°)—NE(约 N 5°) 走向的板块边界划分^[5-9], 另一种是认为 2004 年苏门答腊 - 安达曼岛地震是位于 INDI 板块内, 并且在 INDI 板块与 AUST 板块之间无板块边界划分的 INDI-AUST 板块模型^[3,10-13]。由于这两种 INDI 与 AUST 板块边界划分的采用, 使得 2004 年苏门答腊 - 安达曼岛主震位置普遍被认为是位于 INDI 板块与 Burma/SE EURA 板块的交界处, 并且此次地震被认为是相对于 Burma/SE EURA 板块沿 NE 方向的 INDI 板块俯冲运动所致, 从而引起了整个苏门答腊 - 安达曼群岛 1200 ~ 1500 km 长的地壳破裂, 这使得南北两段地壳破裂带破裂特征的不一致一直得不到合理的机制解释。

Sieh [2005]^[1] 认为须要弄清楚为什么 2004 年苏门答腊 - 安达曼岛地震引起的地壳破裂在地质结构上是分段实现的, 而 Ammon 等人 (2005)^[4] 把上述破裂特征的不一致归因于沿整个苏门答腊 - 安达曼群岛的破裂带板块间耦合力由南向北的递减; Singh 等人 (2006)^[14] 的研究认为虽然许多研究已经肯定了位于安达曼群岛的第二阶段地壳破裂是慢速的俯冲过程, 而且这种过程与观测得到的地震资料和 GPS 观测结果是符合的, 但引起这种慢速俯冲过程的原因仍然不是很清楚。

本文采用了 GPS 站速度资料^[15], 基于 NUVEL-1A 板块运动模型^[16] 中 INDI、AUST 和 EURA 板块的运动参数, 并根据 INDI 板块和 AUST 板块边界的分布特征, 估计了 INDI 板块与 Burma 微板块之间、AUST 板块与 Burma/SE EURA 板块之间的板块聚敛率; 根据 2004 年苏门答腊 - 安达曼岛地壳破裂特征, 结合该地震的余震分布, 讨论了两个阶段地壳破裂的可能的测地学原因; 为便于对第二阶段地壳破裂形成的可能的测地学原因进行探讨, 我们还估计了 INDI 板块与 AUST 板块之间的相对运动在沿逆太平洋 (PCFC) 板块运动方向上的相对运动速率。本文的讨论可为进一步研究 2004 年苏门答腊 - 安达曼岛地震的地质学形成机制提供可能的测地学依据。

2 方 法

NUVEL-1A 地球板块运动模型作为国际地球参考架 (ITRF) 的参考标准, 自 1996 年以来已被广泛用于天体测量学、大地测量学和地球物理学研究^[17]。由 INDI、AUST 和 EURA 板块的欧拉旋转参数, 考虑地面点的地心位置 X_0 、 Y_0 、 Z_0 取自 ITRF 地球参考架解, Ω_x 、

Ω_y 、 Ω_z 为板块的旋转速率分量, 可得地面点速度分量的观测方程为^[18]

$$\begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

其中 Ω 的各分量可由下式精确估计得到:

$$\begin{aligned} \Omega_x &= \Omega \cos \Phi \cos \lambda, \\ \Omega_y &= \Omega \cos \Phi \sin \lambda, \\ \Omega_z &= \Omega \sin \Phi. \end{aligned} \quad (2)$$

式中 Ω 、 Φ 、 λ 为板块的欧拉旋转参数。

为保证聚敛率估计的可靠性, 我们采用位于 INDI、AUST 和 EURA 板块上的 GPS 站速度资料, 估计得到沿地震破裂带不同板块间的平均聚敛率。表 1 中给出了基于 NUVEL-1A 模型的 INDI、AUST 和 EURA 板块的欧拉旋转参数, 可用于理论的板块间聚敛率估计。

表 1 INDI、AUST 和 EURA 板块在 NUVEL-1A 板块运动模型中的欧拉旋转参数

板 块	$\Omega / (^\circ) \cdot 10^{-6} \cdot \text{a}^{-1}$	$\lambda / (^\circ)$	$\Phi / (^\circ)$
INDI	0.545	0.3	45.5
AUST	0.464	33.2	33.9
EURA	0.234	-112.3	50.6

3 板块间的相对运动和 2004 年印度洋主震的可能成因

3.1 INDI 与 AUST 板块间的相对运动速率

由位于 INDI 板块近中部的 3 个 GPS 站 (ban2, hyde, iisc) 和位于 AUST 板块的 11 个 GPS 站 (alic, cedu, coco, darw, karr, mobs, nnor, pert, tidb, tow2, yar2) 的站速度资料^[15], 我们估计得到 INDI 板块和 AUST 板块的平均板块速度矢量, 结果列于表 2; 表中 EURA 板块结果由位于 SE EURA 板块的 4 个 GPS 站 (tnml, twtf, bako, tcms) 的结果估计得到, 模型结果是由表 1 中位于 INDI 板块与 Burma/SE EURA 板块边界上在 N 10° ~ 14° 间 INDI 板块的平均速度矢量和位于 AUST 与 Burma/SE EURA 板块边界带在 N 3° ~ 9° 间 AUST 板块的平均速度矢量估计得到。

表 2 结果表明, INDI 板块和 AUST 板块两者均以大致相同的约 60 mm/a 的速度朝 NE 方向作俯冲运动, 但 INDI 板块的运动具有更大的 NE 方位角值。根据 GPS 结果, INDI 板块与 AUST 板块两者的运动实际上存在约 $22.7^\circ \pm 6.7^\circ$ 的方向差, 这种方向差在美国喷气推进实验室 (JPL) 的 GPS 资料全球解结果中已有充分的验证^[19]。由此, 根据 NUVEL-1A 的 INDI、AUST 板块边界分布, 可以认为, 由于 INDI 板块的运动, 在逆 PCFC 板块运动的方

向上, 存在一个 INDI 板块相对于 AUST 板块约 (20.8 ± 5.3) mm/a 的运动速率, 这个速率主要是由 INDI 板块的 NE 方向的运动引起的。上述估计中, 我们采用了基于 PCFC 板块近中部 4 个 GPS 站 (hnlc, mkea, bako, thti) 速度矢量的平均方向 $NW28.7^\circ \pm 4.1^\circ$ 为参考^[15], 速度值为 (74.6 ± 3.2) mm/a。由表 2 结果可见, NUVEL-1A 模型结果基本证实了现代 GPS 的观测结果, 表明在最近的 3×10^6 a 中地球上 INDI 和 AUST 板块的运动基本是稳定的。由图 1 的 AUST 板块西北边界分布和上述估计结果可见, 在 INDI 与 AUST 板块之间, AUST 板块可能受到 INDI 板块在逆 PCFC 板块运动的方向上长期的压应力的作用。

表 2 INDI 和 AUST 板块平均速度矢量及其相对运动速率

板 块	速度 /mm·a ⁻¹	方位角 /(^o)
INDI: GPS 观测	55.1±2.3	53.2±1.9
模型	60.2	45.1
AUST: GPS 观测	64.8±4.7	30.5±6.4
模型	63.4	35.3
EURA: GPS 观测	29.1±3.2	110.9±5.2
模型	24.2	113.3
INDI 与 AUST 相对		
速度: GPS 观测	20.8±5.3	沿 PCFC 运动的反方向
模型	9.7	

3.2 2004 年印度洋主震的可能形成

DeMets 等人 (1994) 基于最近 300 万年以来的地质与地球物理资料建立了全球 14 个主要板块和板块边界模型, 并根据主要板块的划分 (见图 1), 给出了各板块的欧拉运动参数。

由于 2004 年印度洋主震是发生在 AUST 板块与 Burma/SE EURA 板块边界的断层带附近, 并且主要是由于 AUST 板块以约 60 mm/a 的速度向 NE $30^\circ \sim 35^\circ$ 的方向运动所致, 这个运动方向大致垂直于 AUST 板块与 Burma/SE EURA 板块的边界带。AUST 板块俯冲插入 Burma/SE EURA 板块, 并引起 Burma/SE EURA 板块的逆冲位移, 触发产生了苏门答腊-尼科巴群岛的地壳破裂和 2004 年印度洋海啸。因此, 由图 1 的 INDI, AUST 板块边界的分布可直观地发现, INDI 板块相对于 Burma 微板块的聚敛和滑行俯冲可能不会对 2004 年印度洋主震的发生存在明显的触发作用, 而对第二阶段地壳破裂的形成会有一些贡献。

3.3 板块间的聚敛率估计及其与区域性大地震分布的可能关系

由图 1 可见, 考虑在尼科巴群岛 AUST 板块与 Burma 微板块边界破裂带大约在 $N 9^\circ$ 位置, 破裂方向由在其以南的 $NW20^\circ$ 改变为在其以北的 $NE 10^\circ$ ^[3], 利用表 2 的 GPS 结果, 可估计得到 AUST 板块与 EURA(Burma) 板块之间在尼科巴群岛破裂带边界和 INDI 板块与 EURA(Burma) 板块之间在安达曼群岛破裂带边界的平均聚敛率分别为 (28.0 ± 5.6) mm/a 和 (9.1 ± 3.9) mm/a; 如果基于表 1 中 NUVEL-1A 模型板块运动欧拉参数, 可估计得上述两平均聚敛率分别为 34.5 mm/a 和 11.0 mm/a, 表明 AUST 板块 NE 方向的运动引起在 AUST 板块与 Burma 微板块的交界处的聚敛率大约是 INDI 板块 NE 方向的运动引起的 INDI 板块与 Burma 微板块边界间聚敛率的近 3 倍, 并且由 GPS 资料估计的结果与基于板块模型估计的结果具有很好的一致性。

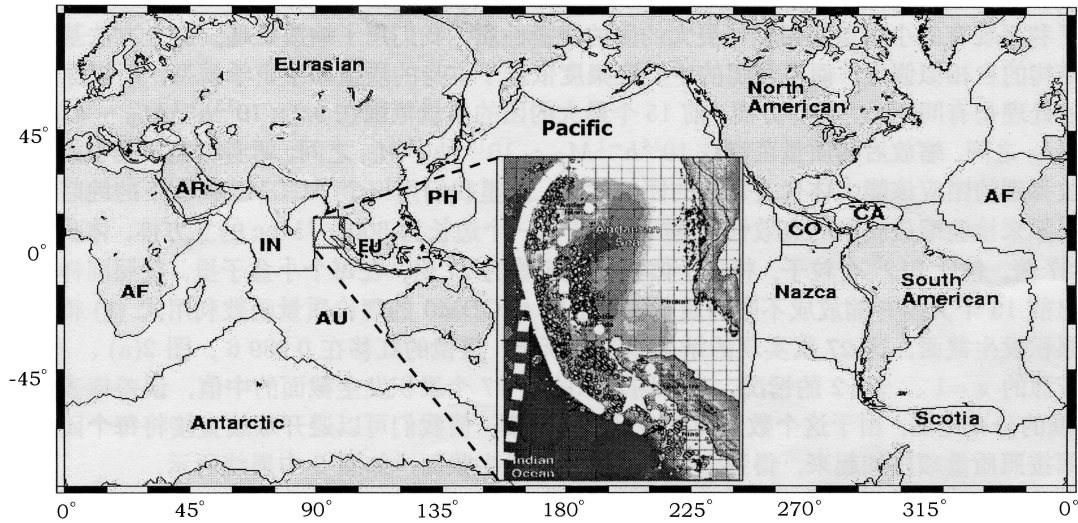


图 1 NUVEL-1A 板块运动模型的全球主要板块边界分布 [16]

IN、AU 和 EU 分别表示 INDI、AUST 和 EURA 板块，3 个板块交界处的小方框为 INDI、AUST 和 SE EURA 3 个板块的部分边界的交界位置，它对应图中中央放大的图示结果 [11]，图示结果表示 2004 年苏门答腊 - 安达曼岛地震区域，区域中实线表示地震引起的沿整个苏门答腊 - 安达曼岛 1 200~1 500 km 长的地壳破裂，它与小圆点线围成的区域为 Burma 微板块 [8]，其中微板块南端的星点是 2004 年印度洋主震位置；上述图示结果近南北向的方块点线表示根据 NUVEL-1A 模型所附加的 INDI 与 AUST 板块的边界，表明点线的右下方深色区域属于 AUST 板块的最西北部分

进一步基于 NUVEL-1A 模型中 INDI、AUST 和 EURA 板块运动欧拉参数，可分别估计得到位于尼科巴群岛的南端和北端位置，以及位于安达曼群岛的南端和北端位置处的板块间聚敛率，结果见表 3。

表 3 尼科巴群岛和安达曼群岛的近南北两端位置各点的板块间聚敛率大小

板 块	地 点	纬度 / (°)	聚敛率 / $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$
NDI 与 Burma	安达曼群岛	N 14.0	10.4
		N 10.5	11.3
AUST 与 Burma / SE EURA	尼科巴群岛 / 北苏门答腊	N 9.0 N 3.0	31.0 37.6

上述估计表明，在尼科巴 - 安达曼群岛的断层带，板块间的聚敛率大致是由南向北递减的。在南北两个不同的断层带内也表现为相同的递减趋势。上述估计或许为解释观测得到的尼科巴 - 安达曼群岛板块间耦合力可能是由南向北递减，以及地震引起的最大板块间位移位于 N 3° ~ 6° 的近尼科巴群岛破裂带内的结论 [2-4] 提供了测地学依据；上述观测结论也被 McCloskey 等人 (2005) [8] 所证实，在苏门答腊 - 安达曼群岛破裂带位移的分布有很大的差异，最大的位移达到近 20 m，并且强位移的主要分布集中在破裂带最南端约 500 km 的范围内，这与我们上述板块间聚敛率分布的估计结果是符合的。

历史上近 200 年来沿苏门答腊 - 安达曼群岛断层带有记录的 10 余次大地震 [11,12]，包

括 1941 (M_s 7.7), 1847 (M_w 7.5 ~ 7.9), 1881 (M_w 7.0, 7.9), 1861 (M 8.5), 1833 (M 9.0), 1907 (M 7.8), 1797 (M 8.4), 1935 (M_w 7.7), 2000 (M_w 7.9) 以及 2002 (M_w 7.3) 等, 其中除 1941 (M_s 7.7) 和 1881 (M_w 7.0) 地震是发生在位于 INDI 板块与 Burma 微板块交界的安达曼群岛断层带附近外, 其余约 80% 的地震, 包括 1881 (M_w 7.9) 地震^[20], 都发生在沿 AUST 板块与 Burma/SE EURA 板块交界的近尼科巴群岛至苏门答腊巽他海沟的断层带附近, 这或许可以由上述 3.3 节的讨论和板块间的聚敛率结果提供较好的测地学佐证, 表明沿苏门答腊 - 安达曼群岛断层带, 很可能是 AUST 板块的运动在主宰着这地区地震的发生与发展。我们可以得到一个基本的结论: 2004 年印度洋地震主要就是以 AUST 板块运动为主的并与 INDI 板块的运动共同作用的结果。

4 地壳破裂的可能测地学原因讨论

观测资料显示, 在 2004 年印度洋主震发生后, 从西北苏门答腊岛到安达曼群岛的沿岛断层带在 8 ~ 10 min 的时间内发生了长达 1 200 ~ 1 500 km 的地壳破裂。整个破裂分为两段: 第一段起始于北苏门答腊岛的班答亚齐省的西部沿海, 向北延伸约 800 km, 其破裂速度为 2 ~ 3 km/s; 经短暂停顿后, 第二阶段的地壳破裂开始并继续北延数百公里, 破裂速度降为约 1.5 km/s^[1,2,21-23]。Lay 等人 (2005)^[11] 根据地壳破裂过程特征, 将整个破裂分为 3 部分: 分别为苏门答腊部分 (420 km)、尼科巴部分 (325 km) 和安达曼部分 (570 km); 其中前两部分的总长度为 745 km, 结束于尼科巴群岛的北端。根据 Ammon 等人 (2005)^[4] 对地壳破裂模型的研究, 证实由破裂产生的俯冲位移在 $N 9^\circ \sim 10^\circ$ 位置开始递减。

根据图 1 测地学板块运动模型中 AUST 板块西北边界位置的分布, 我们发现 AUST 板块西北顶端的位置与许多作者给出的第一阶段地壳破裂终止的位置一致, 约位于 $N 9.0^\circ \sim 9.5^\circ$ 之间。在第一阶段和第二阶段地壳破裂的短暂停顿间隔的位置可能正好位于 INDI、AUST 板块和 Burma 微板块三者的交界处。根据美国国家地震信息中心 (NEIC) 提供的 2004 年印度洋地震后 17 天内及 13 周内所发生的震级为 $M5.0 \sim 7.3$ 余震资料的分布, 证实位于尼科巴群岛和安达曼群岛之间沿 INDI/AUST 板块与 Burma 微板块之间的破裂带右侧存在一个 $N 9.08^\circ \sim 10.34^\circ$ 的余震空缺带, 结果见图 1 中央图示结果中的余震分布以及文献 [24] 的图 1。这表明 AUST 板块西北顶端位置很可能位于 $N 9.1^\circ$ 附近, 也就是第一阶段地壳破裂的结束位置, 表明第一阶段地壳破裂引起的余震分布与 AUST 板块西北边界的走向一致; 而第二阶段的地壳破裂可能起始于近 $N 10.34^\circ$ 的位置, 向 NE 一直延伸到约 $N 14^\circ \sim 15^\circ$ 。可以认为, 本次地震的地壳破裂也进一步验证了在 NUVEL-1A 模型下 AUST 板块西北边界带地质分布的可靠性。

根据上述板块间聚敛率的测地学估计, 第一阶段地壳破裂的形成机制可直接归因于两方面的触发因素: 一是 2004 年印度洋主震的直接触发; 二是位于 AUST 板块与 Burma/SE EURA 板块间的强聚敛作用。前者的直接触发引起 AUST 板块俯冲插入 Burma/SE EURA 板块, 在被逆冲锁定上百年后得到突然的应力释放, 导致由于上覆板块的逆冲作用使 AUST 板块进一步俯冲插入 Burma/SE EURA 板块, 引起苏门答腊 - 尼科巴群岛断层带的地壳破裂。而后者因素可能是引起 2 ~ 3 km/s 的破裂速度和大的俯冲位移的关键。第二阶段地壳破裂也可归因

于两方面：一是第一阶段地壳破裂的完成，引起 AUST 板块西北端南北向边界相对于 INDI 板块长期阻挡应力的瞬间释放；二是 INDI 板块与 Burma 微板块间 $10 \sim 11 \text{ mm/a}$ 的弱聚敛作用，使 INDI 板块能俯冲插入 Burma 微板块，并引起 Burma 微板块的逆冲位移，这或许是引起约 1.5 km/s 的地壳破裂速度和不到 7 m 的俯冲位移的测地学原因。

对地震观测资料的分析结果表明：在第一阶段地壳破裂发生后，破裂继续向北延伸，在约 $N10.34^\circ$ 开始的第二阶段地壳破裂速度明显变慢，降为约 1.5 km/s ，地壳破裂引起的俯冲位移也降至不到 7 m [4,11]；位于 INDI 板块东部边界和安达曼群岛的地球表面大约经历了 30 多分钟才位移了 $7 \sim 20 \text{ m}$ [25]。Chlieh 等人 (2007) [26] 基于 GPS 和遥感观测资料，由同震模型的结果表明：在沿整个苏门答腊 - 尼科巴 - 安达曼岛的地壳破裂带，出现 3 个地壳破裂能量释放的峰值位置，分别位于 $N 4^\circ$ 、 7° 、 9° 。这表明本次地震引起的地壳破裂能量主要集中在第一阶段地壳破裂带内，它的终点位置位于大约 $N 9^\circ$ ，接近于 AUST 板块西北端位置，第二阶段地壳破裂带内没有大的破裂能量峰值产生。这些观测结果可用本文 3.3 节中估计的板块间的聚敛率的纬度分布得到较好的测地学解释；同时，也说明了 INDI 板块的运动对第二阶段地壳破裂的形成和发生所起到的作用，但如果没有第一阶段地壳破裂的发生，可能不会有我们所看到的第二阶段地壳破裂的形成，根据本文的分析与讨论，两者可能存在一定的因果关系。

5 结论和讨论

基于 GPS 资料和 NUVEL-1A 地球板块运动模型，我们得到 INDI 板块和 AUST 板块分别与 Burma 和 Burma/SE EURA 板块聚敛率为 $9 \sim 11 \text{ mm/a}$ 和 $28 \sim 34 \text{ mm/a}$ ，还得到表 3 的结果，其中 $9 \sim 11 \text{ mm/a}$ 结果与 2004 年印度洋地震前位于安达曼群岛上 GPS 观测得到的 14 mm/a 的聚敛率结果 [27] 是一致的。对 INDI 板块与 AUST 板块间相对运动速度的估计结果表明，在沿 PCFC 板块运动的逆方向上，INDI-AUST 板块间存在约 $(20.8 \pm 5.3) \text{ mm/a}$ 的相对运动速度，这个相对速度主要是由 INDI 板块运动引起的，表明 AUST 板块在沿 PCFC 板块运动的逆方向上可能受到一个由 INDI 板块运动引起的长期压应力作用。第一阶段的地壳破裂，可能使这个长期压应力得到释放或部分释放，从而在 INDI 板块与 Burma 微板块边界间聚敛率的作用下，触发产生第二阶段的地壳破裂。

由 NUVEL-1A 板块运动模型和本文的讨论，2004 年印度洋主震主要应由 AUST 板块相对于 Burma/SE EURA 板块的 $NE 30^\circ \sim 35^\circ$ 方向的运动引起，而不是由 INDI 板块或 INDI-AUST 板块的运动所致，这可在 NUVEL-1A 板块运动模型的背景下由 2004 年印度洋主震发生的位置，AUST 板块西北边界及其区域性的板块间聚敛率的分布得到测地学解释。INDI 和 AUST 板块的共同作用形成了 2004 年印度洋地震的时间和空间分布特征。

沿苏门答腊 - 尼科巴 - 安达曼群岛整个板块边界带近 200 年的地震资料表明，类似于 2004 年印度洋地震或震级在 $M7.0$ 以上的大地震更容易发生在沿苏门答腊 - 尼科巴岛的板块边界带附近，这可能与 INDI 板块与 Burma 微板块间、AUST 板块与 Burma/SE EURA 板块间的板块聚敛速度的不同密切相关，未来在这一地区的大地震可能更容易发生在沿 AUST 板块的西北至东北部的边界带 [28]。利用本文估计的聚敛率，可以从测地学角度较好地解释观测

得到的 1 200 ~ 1 500 km 长的破裂带上板块间耦合力由南向北递减的结论^[4]。

位于 N 6° ~ 9° 的 AUST 板块西北与尼科巴群岛的 Burma 微板块的交界部分, 已接近 AUST 板块的边界位置 (见图 1), 由于这部分块体的可能形变, 它与 Burma 微板块间实际的聚敛率会小于用板块模型估计得到的数值。因此, 观测得到的第一阶段地壳破裂的特征显示其主要形变与最大板块间位移位于约 N 3° ~ 6° 的近尼科巴岛破裂带内, 或者说集中在破裂带最南端的 200 ~ 500 km 范围内^[8,29,30], 而不是分布在 N 3° ~ 9.1° 整个近 800 km 长的第一阶段的地壳破裂带内。

根据 McCaffrey(2007)^[31] 得到的结论: 一定震级地震发生的频次与板块间的聚敛率大小是成正比的, 板块间的聚敛率能影响大地震的发生。目前我们还远不能做到预测沿苏门答腊 - 安达曼岛断层带的下一次特大地震的发生, 因为 2004 年的 $M_W = 9.3$ 级特大地震是发生在令许多地球科学家完全没有预料到的地点, 科学家们还需要有足够的时间去研究这次大地震, 或许需要数百年的时间和更多的地震样本, 才能给出答案。本文的讨论将有助于进一步从地质学上真正弄清 2004 年苏门答腊 - 安达曼岛地震的形成原因。

致谢 本项工作得到中国科学院上海天文台天文地球动力学中心和中国科学院武汉动力大地测量重点实验室经费资助。感谢两位审稿专家和叶叔华院士对本文初稿提出了很好的修改意见。沈志强研究员对本项工作的发展提出了很好的建议, 韩延本研究员和王炜研究员就本项工作中的有关内容与作者进行了有益的交流, 方鹏博士为本文提供了 GPS 数据, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] Sieh K. Nature, 2005, 434: 573-574
- [2] Park J, Song T-R.A, Tromp J, et al. Science, 2005, 308: 1139-1144
- [3] Bilham R R, Engdahl E R, Feldl N, et al. Seismol. Res. Lett., 2005, 76(3): 299-311
- [4] Ammon C J, Ji C, Thio H-K, et al. Science, 2005, 308: 1133-1139
- [5] Wang M, Zhank P Z, SHEN Z K, et al. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(14): 1771-1775
- [6] 薛艳, 邓志辉, 刘德富, 等. 2004 年印度尼西亚苏门答腊 8.7 级大地震及其对中国大陆地区的影响. 北京: 地震出版社, 2005: 69-88
- [7] 刘杰, 李纲, 薛艳. 2004 年印度尼西亚苏门答腊 8.7 级大地震及其对中国大陆地区的影响. 北京: 地震出版社, 2005: 3-15
- [8] McCloskey J, Nalbant S S, Steacy S. Nature, 2005, 434: 291
- [9] 李纲, 刘杰, 郭铁栓. 地震, 2005, 25(4): 49-57
- [10] Perkins S. Science NeSW, 2005, 167(2): 19
- [11] Lay T, Kanamori H, Ammon C J, et al. Science, 2005, 308: 1127-1133
- [12] Briggs R W, Sieh K, Meltzner A J, et al. Science, 2006, 311: 1897-1901
- [13] Sinadinovski C. Bulletin of Earthquake Engineering, 2006, 4(2): 131-139
- [14] Singh S K, Ortiz M, Gupta H K, et al. Geophys. Res. Lett., 2006, 33: L03313
- [15] Scripps Orbit and Permonent Array Center (SOPAC), <http://sopac.ucsd.edu/dataArchive/>, 2007
- [16] DeMets C, Gordon R, Argus D, et al. Geophys. Res. Lett., 1994, 21: 2191-2194
- [17] McCarthy D D. IERS Conventions (1996), IERS Technical Note 21. Paris: Observatoire de Paris, 1996: 10-17
- [18] McCarthy D D. IERS TECHNICAL NOTE 13, IERS Standards (1992), Observatories de Paris, 1992: 20-24

- [19] Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. GPS Time Series, <http://sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/series.html>, 2006
- [20] Ortiz M, Bilham R J. *Geophys. Res.*, 2003, 108 (B4): 2215
- [21] Catherine D, De Groot-Hedlin. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32: L11303
- [22] Lomax A. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, 32: L10314
- [23] Lambotte S, Rivera L, Hinderer J. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33: L03307
- [24] Ishii M, Shearer P M, Houston H, et al. *Nature*, 2005, 435: 933-936
- [25] Bilham R. *Science*, 2005, 308: 1126-1127
- [26] Chlieh M, Avouac J-P, Hjorleifsdottir V, et al. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(1A): S152-S173
- [27] Paul J, Burgmann R, Gaur V K, et al. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28 (4): 647-651
- [28] Yang Z. *Geodynamics and Natural Hazards. Proceedings of the APSG Symposium, Hong Kong.* 2005: 234-242
- [29] Vigny C, Simons W J F, Abu S, et al. *Nature*, 2005, 436: 201-206
- [30] Subarya C, Chlieh M, Prawirodirdjo L, et al. *Nature*, 2006, 440: 46-51
- [31] McCaffrey R. *Science*, 2007, 315: 1675-1676

Discussions on Possible Geodetic Mechanism for the 2004 Sumatra-Andaman Islands Earthquake

YANG Zhi-gen^{1,2}

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*)

Abstract: The 2004 Sumatra-Andaman earthquake with moment magnitude 9.3 on December 26, 2004 was the second largest earthquake in the instrumental record and the first giant earthquake to have occurred since the advent of modern space geodesy. In this work, we report estimates and results by using GPS measurements and basing on the boundary distributions of the Indian plate and Australia plates in NUVEL-1A plate motion model, the convergence rates between Indian and Burma plates and between Australian and Burma plates, as well as the relative motion between Indian and Australian plates are respectively estimated. Results indicate that the two phases of ruptures that occurred along respectively the Sumatra-Nicobar Islands and the Andaman Islands in Indian Ocean were probably related with triggering of different plate interactions. The reduction between megathrust coupling as a function of distance northward from epicenter can be kinematically interpreted by distribution of the estimated convergence rates. The 2004 Sumatra-Andaman main-shock should be induced by the Australia plate motion, which is towards $NE33^\circ - 35^\circ$ with a velocity of about 60 mm/a relative to Burma/southeast Eurasian plate. The geological distribution of the northwestern most part of the AUST plate in NUVEL-1A may be further confirmed by this earthquake.

Key words: space geodesy; 2004 Sumatra-Andaman islands earthquake; NUVEL-1A plate motion model; GPS measurements; convergence rates between plates; geodetic interpretation for crustal ruptures