

2015年智利8.3级地震构造背景及对俯冲带地震的启示

杨宏峰^{①*}, LIN Jian^{②③}, 尹九洵^{④①}, 姚华建^{④⑤}

① 香港中文大学地球系统科学课程, 香港;

② Department of Geology and Geophysics, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, USA;

③ 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301;

④ 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

⑤ 蒙城地球物理野外观测研究站, 蒙城 233500

* 联系人, E-mail: hyang@cuhk.edu.hk

2015-10-07 收稿, 2015-11-18 接受, 2015-12-01 网络版发表

香港中文大学 Direct Grant for Research (4053114)、香港研究资助局项目(2191093)、国家自然科学基金(41374055)、中央高校基本科研业务费专项(WK208000053)和中国科学院南海海洋研究所“马里亚纳海沟计划”资助

摘要 2015年发生在智利Coquimbo的 M_w 8.3级地震是一个典型的俯冲带地震,其大小、破裂滑移分布与利用震间期GPS观测得到的智利南部俯冲带闭锁模型一致. 利用反投影方法得到的破裂过程初步解显示,这次地震的破裂由震中(约25 km深)向浅部传播,并且这次地震破裂的能量辐射与频率明显相关,与2010年发生在Coquimbo地震破裂南部约50 km的 M_w 8.8级地震的观测结果一致,表明这部分俯冲带的断层性质随深度存在着系统变化. 这次2015年8.3级地震的震前及同震观测资料将对地震破裂动力学的数值模拟提供一个难得的模型约束信息.

关键词

智利
俯冲带
俯冲带地震
海啸

2015年9月17日,智利中部靠近Coquimbo发生 M_w 8.3地震,造成了严重破坏,并引发了海啸,在Coquimbo附近的海啸波达到了4.5 m. 震中距离智利首都圣地亚哥229 km. 快速有限断层解显示这次地震沿海沟破裂约100 km长,为典型的逆冲型地震. 破裂由~25 km深度开始向浅部传播,持续时间约140 s,断层面上最大滑移量约6 m(http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/Coquimbo_Educational_Slides.pdf). 截至9月25日,已发生180次大于4级的余震. 本文就这次地震以及周边历史地震来讨论智利地震的构造背景及俯冲带地震的特点.

1 构造背景与地震触发

由于纳斯卡板块向美洲板块每年以6.5~7 cm的速度俯冲,南美洲的西海岸一直是地震多发地带,近

百年来几乎整个南美洲西海岸都发生过大地震^[1,2]. 智利是大地震频发的国家,迄今为止,人类有史以来记录到的最大地震就是1960年在智利南部Valdivia发生的 M_w 9.5级强震,其破裂沿海沟向南延展~900 km,最大滑移超过40 m^[3]. 2010年,在9.5级地震的北缘靠近Maule发生了 M_w 8.8级地震,其破裂长度约400 km^[4]. 尽管距离1960年的Valdivia M_w 9.5级地震发生的时间已有50年,9.5级地震的震后滑移通过软流圈回馈到2010年Maule地震的断层面上,库伦应力在南端增加了1.3 MPa^[5],很可能对2010年的地震起到了触发作用. 2015年 M_w 8.3级Coquimbo地震发生在2010年Maule地震的北缘,中间约有50 km的空区,1985年曾发生过7.8级地震(图1). 1960年 M_w 9.5级、2010年 M_w 8.8级、2015年 M_w 8.3级的智利大地震从南到北逐渐发生(图1),属于俯冲带地震静态应力触发的典型例子^[5,8],

引用格式: 杨宏峰, Lin J, 尹九洵, 等. 2015年智利8.3级地震构造背景及对俯冲带地震的启示. 科学通报, 2015, 60: 3549-3556

Yang H F, Lin J, Yin J X, et al. Tectonic settings of the 2015 M_w 8.3 Coquimbo, Chile earthquake and its implications on megathrust earthquakes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 3549-3556, doi: 10.1360/N972015-01110

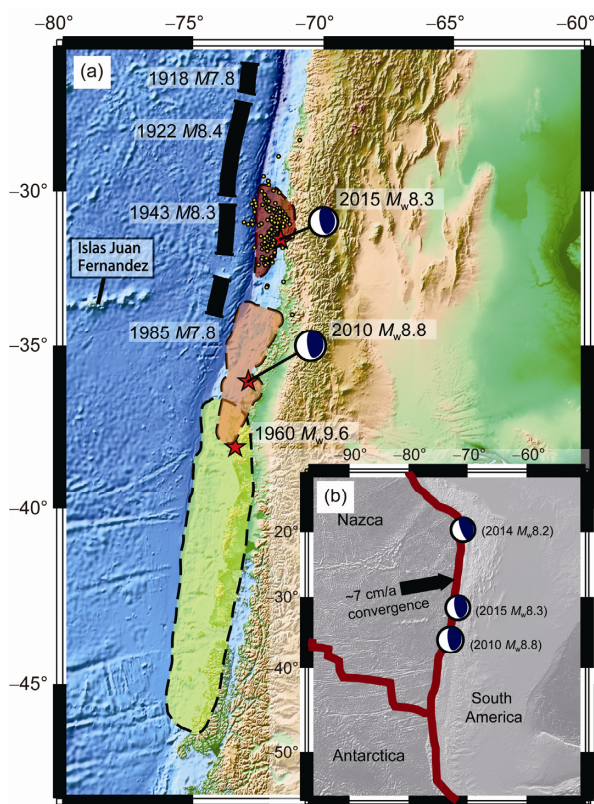


图1 2015年智利8.3级地震(红色区域, 来自 USGS: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a#scientific_finitefault)及 1960年9.5级地震(黄色区域, 来自 Moreno 等人^[6])、2010年8.8级地震的震中位置和破裂区域(橙色区域, 来自 Delouis 等人^[7])。历史地震的破裂长度为黑色线段表示。2015年地震的余震为金色的圆圈(震级大于4级, 时间截至2015年9月22日, 来自 USGS)。 (b) 当地的构造背景, 震源球(来自 GCMT 震源机制解)表示过去5年内的智利超过8级的地震

Figure 1 Rupture areas of the 2015 M_w 8.3 (red, http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20003k7a#scientific_finitefault), the 1960 M_w 9.5 (yellow, after Moreno et al.^[6]), the 2010 M_w 8.8 earthquakes (orange, after Delouis et al.^[7]). Black lines show historical ruptures in the region. Gold dots denote aftershocks of the 2015 event (magnitudes larger than 4 since September 22, 2015). (b) Tectonic settings of the Chile subduction zone. Beach balls show GCMT solutions of focal mechanisms for earthquakes with magnitudes larger than 8 in the past 5 years

其地震触发特性与发生在苏门答腊俯冲带上的2004年 M_w 9.2级、2005年 M_w 8.6级、2007年 M_w 8.5级大地震序列^[9,10]有类同之处。对智利以及日本大地震的研究表明, 俯冲带上大地震产生的应力变化对周边地壳的小地震的发生也有直接影响^[8,11,12]。

2 地震震间与同震滑移

近些年随着大地测量的发展与在地震学上的大量应用(如GPS, InSAR), 对了解俯冲带地震的周期以

及震间期的断层形变有了长足的进展。通过对GPS数据的长期连续观测, 对地震震间的板块汇聚及能量积累可以定量计算, 并推测出板块之间的耦合程度以及具体的闭锁(locking)位置和滑移亏损^[13]。这种通过大地测量得到的闭锁模型常被用来定性的评估某一断层的地震危险性。

在2010年智利Maule地震之后, Moreno等人^[2]利用1996~2008年所观测的GPS数据得到了俯冲板片上的耦合强度模型。结果表明, 在智利南部(30°~42°S)俯冲带大部分地区几乎处于完全闭锁状态, 耦合强度很大。2010年Maule 8.8级地震发生在靠近36°S的完全闭锁带附近, 破裂延展尺度和同震滑移模型, 与通过GPS测量推测的震前闭锁模型高度吻合^[2]。利用当地的俯冲速率和之前发生过的大地震的时间, 可以估算出在2010年地震之前的该区域滑移亏损, 结果与2010年8.8级地震的同震滑移基本一致, 因此2010年8.8级地震被认为是填补该地震空区的特征地震^[2]。

与2010年8.8级地震的破裂区域相比, 2015年 M_w 8.3地震区域的闭锁程度略低, 且南部有一自由滑移区域, 直径约100 km^[2]。这次地震位于自由滑移到闭锁的边界, 快速同震滑移初步结果与此闭锁模型一致(http://earthquake.usgs.gov/learn/topics/Coquimbo_Educational_Slides.pdf)。而本文利用反投影得到的地震破裂初步解显示, 这次地震的破裂传播主要沿俯冲界面由深向浅传播, 这也与闭锁分布一致(图2)。

在2015年 M_w 8.3级地震的破裂区域, 1943年曾发生过8.3级地震(图1)。根据该地区的耦合强度模型及2次地震之间的时间间隔, 可以推断该区域的滑移亏损约为3.8 m(假设俯冲速率7 cm/a, 闭锁程度为0.75)。若此滑移亏损在下次地震中全部释放, 我们即可定量估计未来地震的同震释放能量。借助岩石摩擦实验得到的结果, 通过地震破裂动力学数值模拟, 即可以利用震间闭锁模型得到的滑移亏损来定量评估未来大地震的破裂动力学过程。Yang等人^[14]利用上述手段对北美西部Cascadia俯冲带的可能强震进行了评估, 结果表明同震滑移不仅与滑移亏损的分布有关, 也与破裂开始的位置密切相关。若智利俯冲带的性质与Cascadia俯冲带类似, 2015年智利地震的同震滑移可能也与震中位置相关。

3 俯冲带地震与海啸

俯冲带强震有时会触发致命的海啸, 比如2004

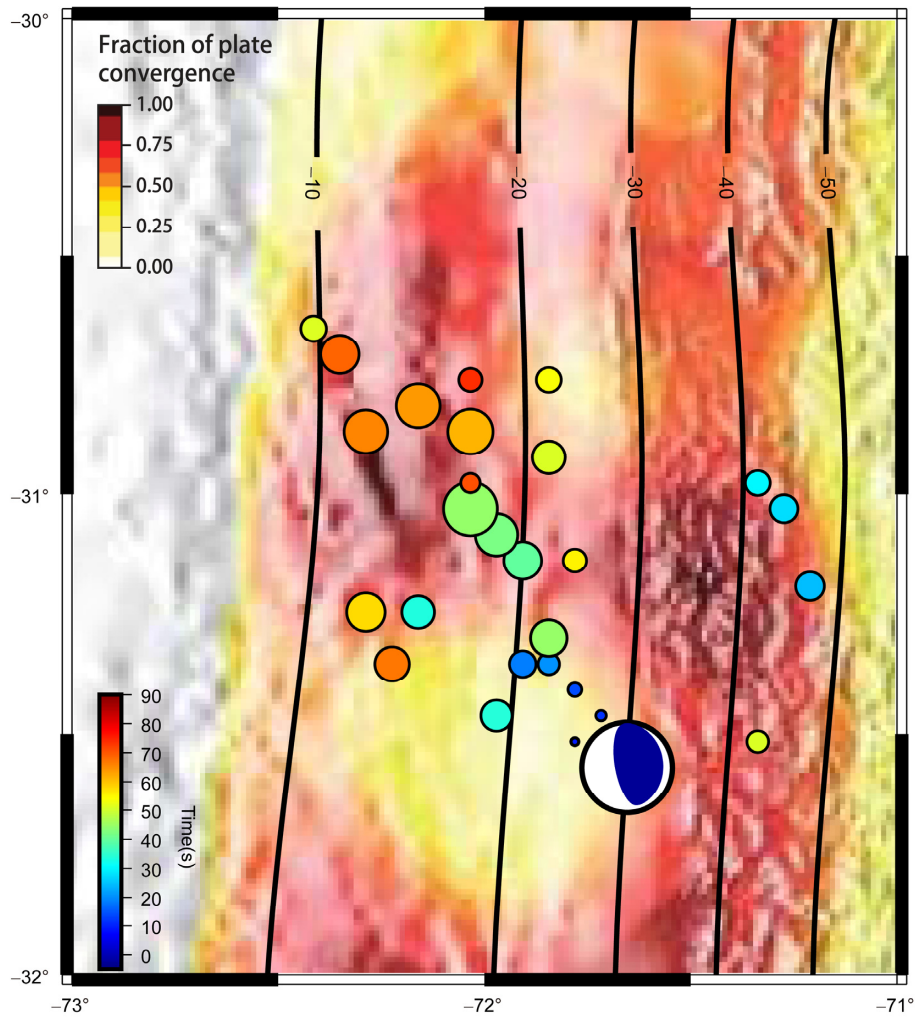


图2 2015年智利8.3级地震区域震间耦合强度^[2]。1, 完全闭锁; 0, 自由滑移。圆点代表用频率域反投影方法获得的2015年8.3级地震破裂低频(0.05~0.5 Hz)能量辐射时空分布的初步结果, 颜色表示能量释放的时间, 大小表示相对辐射能量。黑线表示俯冲板片深度

Figure 2 Interseismic locking model (1 completed locked; 0 free sliding) in the region of the 2015 Chile M_w 8.3 earthquake^[2]. Color dots denote the frequency domain back-projection results of the low frequency (0.05–0.5 Hz) coseismic radiation of the 2015 M_w 8.3 earthquake. Colors show the time of energy radiation. Sizes denote the relative radiation power. Depths of slab interface are shown in black lines

年的苏门答腊9.2级和2011年日本东北9.0级强震。1960年智利Valdivia 9.5级强震引起的海啸到达日本北部引起了高达5 m的大浪, 导致139人丧生。这次Coquimbo 8.3级地震引起了海啸, 在Coquimbo附近的海啸波达到了4.5 m。而海啸波也在约1天之后经过了整个太平洋, 到达了日本东部海岸, 部分地区的海啸波高达80 cm(<http://www.weather.com/news/news/chile-major-earthquake-tsunami-warning>)。

俯冲带地震引起海啸有如下几种可能。(1) 地震破裂延伸至海沟, 在海底引起巨大的位移。比如2011年日本东北9.0级地震, 震后的海底观测表明, 海沟近大陆一侧的海底垂直位移超过10 m^[15]。(2) 高角度

次生(splay)断层, 使地震滑移由主断层面转移到次生断层, 从而引起海底位移导致海啸, 如1964年9.2级阿拉斯加地震^[16]。(3) 累加垂直位移。尽管海沟处的地震滑移量与海沟附近的位移较小, 但由于沉积物的作用, 导致海底累积垂直位移很大, 从而导致海啸。这类地震的代表是2010年智利Maule 8.8级地震。对2011年日本东北大地震造成的海啸的详细模拟研究表明, 在一个特定海岸线地区的海啸波振幅除了与海底地震位移大小有关外, 还直接受控于当地的海岸线的复杂地形以及海啸发生时的海况^[17,18]。

由于海啸波的速度远小于地震波的传播速度, 在俯冲带大地震发生后, 可以迅速作出海啸预警, 从

而让海岸居民做好准备. 这次2015年Coquimbo 8.3级地震之后, 太平洋海岸和众多岛屿都收到了海啸警报.

4 俯冲带地震与慢速滑移事件

自2002年以来, 世界上很多俯冲带都发现了慢速滑移现象(slow slip events), 有时还伴有非火山型震颤(non volcanic tremor)^[19]. 这种慢速滑移事件释放的能量等同于一个6~7.5级地震, 只是慢速滑移事件会持续几周到几年, 在地震仪上无法观测, 只能在GPS上观测到. 慢速滑移和非火山型震颤大多发生在35~40 km深处, 是通常大地震锁闭区的下缘^[19]. 相对于大地震几十到上百年的复发周期而言, 慢速滑移的复发周期要短得多, 几个月至几年. 数值模拟和地震观测表明, 慢速滑移及非火山型震颤发生在发生有效正应力极小(2~3 MPa)的区域^[20], 对应着高孔隙流体压力. 流体的存在是产生慢速滑移和非火山型震颤的必要条件, 可并非充分条件^[21].

在慢速滑移事件被发现之后, 有关俯冲带地震与慢速滑移事件之间的关联开展了大量研究. 尤其引起大家兴趣的是: 1) 大地震的破裂是否会向下延伸至慢速滑移区域? 2) 慢速滑移是否可能诱发大地震? 目前这两个问题仍在积极探讨之中. 第二个问题也可引申为, 在大地震之前是否有慢速滑移现象? 2011年3月11日的日本东北9级地震之后, 有学者利用重复地震推断在日本东北地震之前有慢速滑移现象^[22]. 此外, 利用海底侧压和陆地应变仪也观测在日本东北地震前的慢速滑移事件, 最近的一次在2011年2月^[23]. 无独有偶, 其他俯冲带地震之前也发现这类慢速滑移事件, 如2014年智利北部Iquique M_w 8.2级地震^[24,25]. 通过对全球俯冲带地震目录中前震的分析, Bouchon等人^[26]提出在俯冲带大地震之前可能普遍存在这种慢速滑移事件. 到底俯冲带大地震之前是否普遍存在慢速滑移现象, 不仅需要更好的陆地GPS网络观测, 也要有足够的海底测地系统观测. 目前海底测地系统在美国和日本已经研发并投入应用, 在中国也正在紧密研发中^[27].

值得注意的是, 慢速滑移事件在不同的俯冲带中类周期性发生, 即使在某次地震之前观测到慢速滑移事件, 这个事件与其他众多慢速滑移事件是否有本质区别? 是否还有其他可以甄别的前兆特征, 比如慢速滑移事件的周期减短、滑移量或者滑移速度增加、非火山型震颤活动愈加明显? 基于状态速率摩

擦准则的数值模拟结果显示, 慢速滑移事件在滑动弱化区域频繁发生, 使浅部闭锁区的应力缓慢增加, 长期积累的能量以及孔隙流体的热压弱化效应可能会使浅部闭锁区产生大地震^[28]. 但是, 在大地震发生之前的慢速滑移事件与其他慢速滑移事件没有任何区别^[28]. 此外, 若流体的膨胀强化作用很强, 大地震破裂则难以进入慢速滑移区域^[29]. 更加深入地了解慢速滑移事件与俯冲带大地震之间的关系需要更多的数值模拟和观测工作.

5 讨论

近些年随着全球大地震的发生, 利用反投影方法来推断大地震破裂的传播过程显示, 俯冲带逆冲大地震破裂辐射的能量频率与深度相关. 2015年Coquimbo 8.3级地震的破裂结果也显示出辐射能量频率与深度相关. 低频能量主要来自俯冲带断层浅部(图2), 能量辐射区域主要对应于断层滑移量较大的地区, 而高频能量则主要来自深部^[30,31]. 这些结果表明俯冲板块表面的物理性质(例如摩擦性质)随深度增加存在系统性变化, 从而导致俯冲带逆冲大地震的破裂模式和能量辐射特征随深度增加也存在显著变化. 俯冲带浅部通常处于稳定滑移状态(stable sliding), 一般认为不会产生大地震. 但在特定条件, 俯冲带浅部会处于有条件稳定的状态(conditionally stable), 在某些情况下可以失稳发生大地震, 例如海啸地震, 往往伴随着较大的同震破裂滑移、较慢的破裂速度和较低频的能量辐射^[32,33]. 俯冲带断层中部通常被认为是发生大地震的孕震区域, 在震间期呈现闭锁状态, 积累的能量在大地震中迅速释放. 在俯冲带较深部, 尤其是30~45 km深度范围区域, 是大地震破裂高频能量释放的主要区域, 在地震中断层滑动量一般较小. 这可能是由于这个深度范围的介质整体处在较为塑性的形变环境中, 但在俯冲板块表面可能仍然存在数量众多但尺度较小的速度弱化区域, 在大地震发生时这些速度弱化区域可能会被触发进而发生破裂并释放出大量的高频能量^[30,31]. 值得注意的是, 这部分释放高频能量的区域与部分俯冲带(比如北美西海岸Cascadia俯冲带, 日本Nankai俯冲带)发现非火山型震颤的区域在深度上重叠. 可目前由于数据的缺乏, 尚不清楚两者之间的关联. 而在智利及南美俯冲带, 目前为止尚未发现有大量的非火山型震颤和慢速滑移事件.

2015年Coquimbo 8.3级地震破裂区域南缘与Juan Fernandez洋脊重合,说明已俯冲的部分洋脊有可能阻止了这次地震的破裂。而且该地区的几次历史地震的破裂都有可能被Juan Fernandez洋脊所阻止,如1906年8.4级地震、1943年7.9级地震、1985年7.8级地震^[2]。尽管随大洋板块俯冲的洋脊或者海山对应的应力状态及如何影响俯冲带耦合强度还存在争议^[34],但普遍认为俯冲的洋脊或海山会阻止大地震破裂的传播^[35,36]。数值模拟的结果证明,由于地形几何的影响,即使在海山对应的有效正应力低于周围断层时,地震破裂也可能被海山所阻止^[36]。俯冲海山与地震之间的关系还存在一个争议:俯冲的海山是否会导致地震的发生^[37]。在2010年Maule 8.8级地震之后,利用余震对震源区进行的地震成像结果显示, Maule地震的震中位于一个俯冲海山的下缘^[38],说明俯冲海山可能会成为地震的成核区,这也与对俯冲带长期地震序列的数值模拟结果一致^[35]。但是在苏门答腊俯冲带的地幔楔中发现了俯冲海山,因为其所在位置超出了浅部的板间地震带,海山附近发生的地震远少于周边地区^[39]。

自2004年开始,全球大地震渐多,截至2015年智

利 M_w 8.3级地震,目前已经发生了18个8级以上的大地震,其中有12个发生在俯冲带地区(表1)。Ammon等人^[40]发现2001~2010年7.5级以上地震的平均数目是1900~2010年期间最多的,并且从2004年以来,大地震所释放的累积地震矩增长极为陡峭^[41]。尽管目前的观测还无法确定这些大地震数目的增加在全球范围内是相互关联还是偶然的,在某些俯冲带地区,例如苏门答腊、千岛(Kuril)、汤加及智利,大地震的区域性成簇(clustering)现象是十分明显的^[41]。Sieh等人^[42]发现苏门答腊俯冲带区域在过去的700年存在着地震事件的超级周期,即一个超级周期内包括着多个类似的地震周期,每个地震周期之间的平均间隔约200年,而每个地震周期内都有一系列的大地震。与此对比,北美西部的Cascadia俯冲带中也在频繁发生大地震,但是并没有发现这样的超级地震周期。根据对浊流岩的分析,在过去的10000年里Cascadia俯冲带至少发生过39次大地震,其中半数地震的破裂贯穿了整个Cascadia俯冲带,超过1000 km,被认为是9级左右的强震^[43]。最近的一次发生在1700年^[44],目前难以推测下一次Cascadia强震的具体发生时间,需进一步加强研究。

表1 2004年~2015年9月16日以来全球发生的大地震^{a)}

Table 1 Great earthquakes from 2004 to September 16, 2015

地区	发震日期	纬度(°)	经度(°)	深度(km)	矩震级(M_w)
*Chile	2015-09-16	-31.5705	-71.6703	20.67	8.3
*Chile	2014-04-01	-19.6097	-70.7691	25	8.2
Okhotsk	2013-05-24	54.892	153.221	598.1	8.3
*Solomon	2013-02-06	-10.799	165.114	24	8
Sumatra	2012-04-11	0.802	92.463	25.1	8.2
Sumatra	2012-04-11	2.327	93.063	20	8.6
*Tohoku	2011-03-11	38.297	142.373	29	9
*Chile	2010-02-27	-36.122	-72.898	22.9	8.8
Samoa	2009-09-29	-15.489	-172.095	18	8.1
*Sumatra	2007-09-12	-4.438	101.367	34	8.5
*Peru	2007-08-15	-13.386	-76.603	39	8
*Solomon	2007-04-01	-8.466	157.043	24	8.1
Kuril	2007-01-13	46.243	154.524	10	8.1
*Kuril	2006-11-15	46.592	153.266	10	8.3
*Tonga	2006-05-03	-20.187	-174.123	55	8
*Sumatra	2005-03-28	2.085	97.108	30	8.6
*Sumatra	2004-12-26	3.295	95.982	30	9.1
Macquarie	2004-12-23	-49.312	161.345	10	8.1

a) *, 表示发生在俯冲带的大地震

根据俯冲带弧后地区应力状态等因素,全球俯冲带可分为两种类型,而智利和马里亚纳俯冲带则是这两种类型的典型代表^[45].智利型俯冲带弧后地区处于挤压状态,年龄较轻、温度较高、俯冲角度较小.马里亚纳型俯冲带弧后盆地处于拉张状态,俯冲板片年龄较老,温度较低,俯冲角度较大^[46].尽管俯冲带地震的大小受到众多因素影响,全球最大地震发生在俯冲板片年龄较轻与俯冲速率较大的区域,而俯冲板片较老且俯冲较慢的区域则不易产生大地震(图3)^[47].与大地震频发的智利俯冲带相比,人们对马里亚纳俯冲带的观测与了解都很有有限,部分源自与大陆之间遥远的距离和世界上最深海洋的限制,也源自板间大地震($M>7.5$)的缺乏.若要全面了解俯冲带地震的特性,需要我们对各种俯冲带都进行充分的研究,包括马里亚纳俯冲带.自2016年起,由中国科学院南海海洋研究所牵头,将对马里亚纳海沟开展一系列的科研考察,重点就是研究马里亚纳海沟的地震特性,其结果将拓展我们对俯冲带地震的了解.

身处纳斯卡板块和美洲板块快速汇聚的地区,智利发生2015年 M_w 8.3级地震并非出人意料.并且从震间闭锁程度的结果来看,这次地震的大小也在意料之中.我们也可以对智利将要发生地震的地区及可能的震级进行估计.比如2010年8.8级和2015年8.3级两次地震破裂之间有一个长约50 km的区域,处于几乎完全闭锁状态^[2],上一次破裂是1985年7.8级地震,更早之前是1906年8.4级地震,据估算的平均滑移分别为1.6和3 m^[2].几十年的能量积累,加之可能受到周边2010和2015年地震的应力加载,使得该区域很可能成为下一个发生8级以上地震的地方.虽然目前尚且无法知道某一地区下次地震的确切时间,

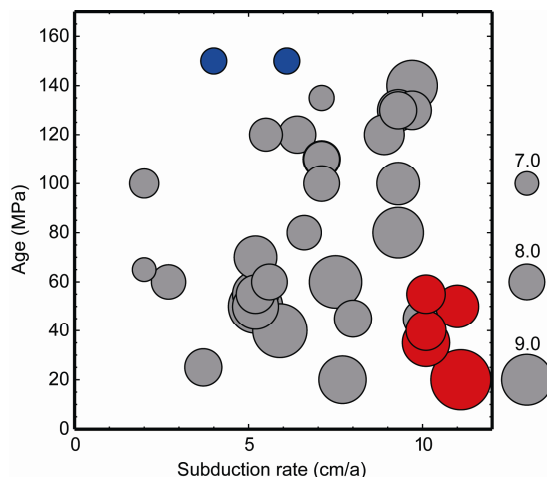


图3 1906~2015年期间全球发生的俯冲带大地震(震源深度范围0~40 km)与俯冲板片年龄和速率的关系.在Ruff和Kanamori^[47]所选取的事件基础上增加了自2000年以来发生的俯冲带大地震.红色代表智利地震,蓝色代表马里亚纳俯冲带地震

Figure 3 Ages and convergence rates of subducting slabs for megathrust earthquakes from 1906 to 2015 with focal depths of 0–40 km. Megathrust earthquakes since 2000 are added into the list in Ruff and Kanamori^[47]. Red and blue show megathrust earthquakes in the Chile and the Mariana subduction zones, respectively

但关于地震危险性的研究无论如何是有助于人类防震减灾的.地震的灾害主要来源于地面的强震动和对建筑物的损坏,而准确预测地震引起的地面强震动是众多地震科学家正在开展的有价值的工作,这需要我们更加深入地理解地震物理,如地震的破裂动力学过程、断层上的应力状态等等,以及地球介质属性.任何模式预测都需要大量数据和实例来验证,而如智利2015年 M_w 8.3级这样的地震,则可以为利用震间耦合强度和计算机数值模拟来准确预报同震滑移及地面强震动提供难得的实验素材.

致谢 感谢Georgia Institute of Technology彭志刚教授、MIT Kevin Chao博士、McGill University刘亚静教授提供的有关慢速滑移和非火山震颤的数据资料;感谢副主编和两位评审人提出的宝贵修改建议.

参考文献

- 1 Loveless J P, Pritchard M E, Kukowski N. Testing mechanisms of subduction zone segmentation and seismogenesis with slip distributions from recent Andean earthquakes. *Tectonophysics*, 2010, 495: 15–33
- 2 Moreno M, Rosenau M, Oncken O. 2010 Maule earthquake slip correlates with pre-seismic locking of Andean subduction zone. *Nature*, 2010, 467: 198–202
- 3 Barrientos S E, Ward S N. The 1960 Chile earthquake: Inversion for slip distribution from surface deformation. *Geophys J Int*, 1990, 103: 589–598

- 4 Tong X, Sandwell D, Luttrell K, et al. The 2010 Maule, Chile earthquake: Downdip rupture limit revealed by space geodesy. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, doi: 10.1029/2010GL045805
- 5 Ding M, Lin J. Post-seismic viscoelastic deformation and stress transfer after the 1960 $M_{9.5}$ Valdivia, Chile earthquake: Effects on the 2010 $M_{8.8}$ Maule, Chile earthquake. *Geophys J Int*, 2014, 197: 697–704
- 6 Moreno M S, Bolte J, Klotz J, et al. Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: Application to the 1960 Chile earthquake. *Geophys Res Lett*, 2009, 36, doi: 10.1029/2009GL039276
- 7 Delouis B, Nocquet J-M, Vallée M. Slip distribution of the February 27, 2010 $M_w=8.8$ Maule earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, doi: 10.1029/2010GL043899
- 8 Lin J, Stein R S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults. *J Geophys Res*, 2004, 109, doi: 10.1029/2003JB002607
- 9 McCloskey J, Nalbant S S, Steacy S. Indonesian earthquake: Earthquake risk from co-seismic stress. *Nature*, 2005, 434: 291
- 10 Delescluse M, Chamot-Rooke N, Cattin R, et al. April 2012 intra-oceanic seismicity off Sumatra boosted by the Banda-Aceh megathrust. *Nature*, 2012, 490: 240–244
- 11 Toda S, Lin J, Stein R S. Using the 2011 M_w 9.0 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake to test the Coulomb stress triggering hypothesis and to calculate faults brought closer to failure. *Earth Planet Space*, 2011, 63: 725–730
- 12 Toda S, Stein R S, Lin J. Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 $M=9.0$ Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer. *Geophys Res Lett*, 2011, 38, doi: 10.1029/2011GL047834
- 13 McCaffrey R, Qamar A I, King R W, et al. Fault locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific Northwest. *Geophys J Int*, 2007, 169: 1315–1340
- 14 Yang H, Liu Y, Mcguire J J. Modeling rupture segmentations on the Cascadia megathrust. In: AGU Fall Meeting Abstracts, 2012, 1: 2503
- 15 Fujiwara T, Kodaira S, No T, et al. The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis. *Science*, 2011, 334: 1240–1240
- 16 Moore G F, Bangs N L, Taira A, et al. Three-dimensional splay fault geometry and implications for tsunami generation. *Science*, 2007, 318: 1128–1131
- 17 Lai Z, Chen C, Beardsley R C, et al. Initial spread of ^{137}Cs from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant over the Japan continental shelf: A study using a high-resolution, global-coastal nested ocean model. *Biogeosciences*, 2013, 10: 5439–5449
- 18 Chen C, Lai Z, Beardsley R C, et al. The March 11, 2011 Tohoku $M_{9.0}$ earthquake-induced tsunami and coastal inundation along the Japanese coast: A model assessment. *Prog Oceanogr*, 2014, 123: 84–104
- 19 Peng Z, Gomberg J. An integrated perspective of the continuum between earthquakes and slow-slip phenomena. *Nature Geosci*, 2010, 3: 599–607
- 20 Liu Y, Rice J R. Aseismic slip transients emerge spontaneously in three-dimensional rate and state modeling of subduction earthquake sequences. *J Geophys Res*, 2005, 110, doi: 10.1029/2004JB003424
- 21 Yang H, Peng Z. Lack of additional triggered tectonic tremor around the Simi Valley and the San Gabriel Mountain in southern California. *Bull Seismol Soc Amer*, 2013, 103: 3372–3378
- 22 Kato A, Obara K, Igarashi T, et al. Propagation of slow slip leading up to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, 2012, 335: 705–708
- 23 Ito Y, Hino R, Kido M, et al. Episodic slow slip events in the Japan subduction zone before the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Tectonophysics*, 2013, 600: 14–26
- 24 Ruiz S, Metois M, Fuenzalida A, et al. Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique M_w 8.1 earthquake. *Science*, 2014, 345: 1165–1169
- 25 Yang H, Meng X, Peng Z, et al. Imaging and understanding foreshock and aftershock behavior around the 2014 Iquique, Northern Chile, Earthquake. In: AGU Fall Meeting Abstracts, 2014, 1: 4496
- 26 Bouchon M, Durand V, Marsan D, et al. The long precursory phase of most large interplate earthquakes. *Nat Geosci*, 2013, 6: 299–302
- 27 Sun,Z, Lin J, Sun Z, et al. Development of high-resolution relative geodetic positioning system (GPS) on the seafloor (in Chinese). 2015 Annual Report, 2015 [孙珍, 林间, 孙兆华, 等. 高精度海底相对测地系统(海底GPS)核心技术研发. 2015年度进展报告, 2015]
- 28 Segall P, Bradley A M. Slow-slip evolves into megathrust earthquakes in 2D numerical simulations. *Geophys Res Lett*, 2012, 39, doi: 10.1029/2012GL052811
- 29 Liu Y. Numerical simulations on megathrust rupture stabilized under strong dilatancy strengthening in slow slip region. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 1311–1316
- 30 Lay T, Kanamori H, Ammon C J, et al. Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults. *J Geophys Res*, 2012, 117, doi: 10.1029/2011JB009133

- 31 Yao H, Shearer P M, Gerstoft P. Compressive sensing of frequency-dependent seismic radiation from subduction zone megathrust ruptures. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2013, 110: 4512–4517
- 32 Kanamori H, Kikuchi M. The 1992 Nicaragua earthquake: A slow tsunami earthquake associated with subducted sediments. *Nature*, 1993, 361: 714–716
- 33 Bilek S L, Lay T. Tsunami earthquakes possibly widespread manifestations of frictional conditional stability. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 181–184
- 34 Wang K, Bilek S L. Invited review paper: Fault creep caused by subduction of rough seafloor relief. *Tectonophysics*, 2014, 610: 1–24
- 35 Yang H, Liu Y, Lin J. Effects of subducted seamounts on megathrust earthquake nucleation and rupture propagation. *Geophys Res Lett*, 2012, 39, doi: 10.1029/2012GL053892
- 36 Yang H, Liu Y, Lin J. Geometrical effects of a subducted seamount on stopping megathrust ruptures. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 2011–2016
- 37 Wang K, Bilek S L. Do subducting seamounts generate or stop large earthquakes? *Geology*, 2011, 39: 819–822
- 38 Hicks S P, Rietbrock A, Haberland C A, et al. The 2010 M_w 8.8 Maule, Chile earthquake: Nucleation and rupture propagation controlled by a subducted topographic high. *Geophys Res Lett*, 2012, 39, doi: 10.1029/2012GL053184
- 39 Singh S C, Hananto N, Mukti M, et al. Aseismic zone and earthquake segmentation associated with a deep subducted seamount in Sumatra. *Nat Geosci*, 2011, 4: 308–311
- 40 Ammon C J, Lay T, Simpson D W. Great earthquakes and global seismic networks. *Seismol Res Lett*, 2010, 81: 965–971
- 41 Lay T. The surge of great earthquakes from 2004 to 2014. *Earth Planet Sci Lett*, 2015, 409: 133–146
- 42 Sieh K, Natawidjaja D H, Meltzner A J, et al. Earthquake supercycles inferred from sea-level changes recorded in the corals of west Sumatra. *Science*, 2008, 322: 1674–1678
- 43 Goldfinger C. Submarine paleoseismology based on turbidite records. *Annu Rev Marine Sci*, 2011, 3: 35–66
- 44 Yamaguchi D K, Atwater B F, Bunker D E, et al. Tree-ring dating the 1700 Cascadia earthquake. *Nature*, 1997, 389: 922–923
- 45 Uyeda S, Kanamori H. Back-arc opening and the mode of subduction. *J Geophys Res*, 1979, 84: 1049–1061
- 46 Stern R J, Fouch M J, Klempner S L. An overview of the Izu-Bonin-Mariana subduction factory. *Geophys Monogr-Am Geophys Union*, 2003, 138: 175–222
- 47 Ruff L, Kanamori H. Seismicity and the subduction process. *Phys Earth Planet Inter*, 1980, 23: 240–252

Tectonic settings of the 2015 M_w 8.3 Coquimbo, Chile earthquake and its implications on megathrust earthquakes

YANG HongFeng¹, LIN Jian^{2,3}, YIN JiuXun^{4,1} & YAO HuaJian^{4,5}

¹Earth System Science Programme, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China;

²Department of Geology and Geophysics, Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA 02543, USA;

³South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510301, China;

⁴School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

⁵Mengcheng Geophysical Observatory, Mengcheng 233500, China

The 2015 M_w 8.3 Coquimbo, Chile earthquake is a typical megathrust earthquake, whose size and coseismic slip distribution are consistent with the interseismic locking model that was derived from GPS measurements. Our preliminary back-projection results show that the rupture of the M_w 8.3 Coquimbo earthquake propagates updip from the hypocenter (~25 km in depth). Furthermore, we find frequency-dependent behavior of the radiation power of the rupture, similar to those observed during the 2010 M_w 8.8 Maule earthquake, which occurred ~50 km to the south of the 2015 earthquake rupture area. These observations indicate that there is a systematic downdip variation of properties on the megathrust in southern Chile. The rich observations of the coseismic slip distributions of the 2015 M_w 8.3 earthquake provide an excellent opportunity to validate numerical simulations of rupture process based on interseismic locking distributions.

Chile, subduction zone, megathrust earthquake, tsunami

doi: 10.1360/N972015-01110