

青藏高原的地震构造与地震活动*

陈立军

(湖南省地震局, 湖南 长沙, 410004)

摘要: 根据地震地热说原理和中国西部的大地构造资料, 讨论了青藏高原的地震构造活动模式及地震活动特征, 认为兴都库什地震柱和缅甸地震柱是控制青藏高原构造运动和地震活动的主因, 青藏高原深达 70 km 的巨厚地壳是内陆地区壳内强震频发的有利构造条件, 利用 35 km 以下青藏高原的下地壳地震和周边地区的壳下地震活动动态, 参考历史震例, 可以为研究区内的壳内强震活动与火山活动提供可能的活动强度、活动地点及大致活动时段等前兆性指标, 并取得了初步成效。利用地震柱概念对青藏高原地震构造活动模式的解释似乎更加贴近青藏高原的地震活动特征, 可以更加合理地解释壳内强震或者火山发生的成因, 也可以预测未来几年内地震柱及其影响区的活动趋势。

关键词: 地震地热说; 地震柱; 地震构造模式; 地震预测; 青藏高原

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)01-0123-09

0 前言

青藏高原是中国地震活动的主体地区之一, 地震活动频度高、强度大, 是地震工作者最为关注的地区之一。现有的地震预测理论和方法, 多震源于板块之说, 利用“碰撞”、“俯冲”或者“活动地块”的概念来解释青藏高原的地震构造和地震活动。

作者提出了地震地热说的原理(陈立军, 2000, 2012), 建立了地震柱的概念(陈立军, 2013), 并根据全球 100 km 深度以下地震活动的三维分布立体图像, 定义了全球 24 个地震柱, 提出了一套预测地震柱活动性的工作方法。作者在 20 世纪 90 年代提出了兴都库什的旋扭构造^①, 认为兴都库什地区的逆时针旋扭运动是生成周边五大山系和五大平原(含高原)的动力源。基于这些观念, 本文侧重讨论青藏高原的地震构造与地震活动特征。

1 研究区范围及其地震活动分布特征

本文研究范围取 ($20^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{N}$, $70^{\circ} \sim 108^{\circ} \text{E}$),

包括中国西部及其周边地区。地震资料取自 <http://www.ncedc.org/> 网页的 ANSS 地震目录, 火山资料取自 <http://www.volcano.si.edu/> 网页的 GVP 火山月报, GPS 资料取自 <http://side-show.jpl.nasa.gov> 网页。研究区地震活动的平面分布见图 1, 三维立体分布见图 2, 地震震源深度的分层分布见图 3。

由图 1 可见, 青藏高原及周边地区的总体地震活动呈现 4 大特点。一是分布面广, 图 1 的地震活动区明显多于空白区, 并伴有少量火山活动; 二是地震活动强度高, 研究区内近 50 年来 7 级以上地震多达 40 余个, 历史最高震级达 8.5 级(1950 年察隅地震); 三是地震密集发生在青藏高原和天山两大特殊构造区, 壳内强震活动基本位于地壳厚度大于 35 km 的地区; 四是有两个中深源的地震活动中心, 分别是帕米尔—兴都库什地区和缅甸地区, 最大震源深度 383 km。总体来看, 在本研究区内, 中深源地震活动区是最主要的积极因素, 地壳厚度大于 35 km 的地区是壳内强震活动的重要场所。中国东部, 除台湾地区以外, 浅源地震活动较多, 但壳内强震活动相对较少, 正是因为缺少这两个重要的因素。

* 收稿日期: 2012-09-24.

基金项目: 中国地震局 2012 年度老专家科研基金课题(201229) 和湖南省地震局 2012 年度科研课题(201201) 联合资助。

① <http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-445020.html>.

图 2 为研究区内地震活动的三维立体分布图像。由图 2a 可见，喜马拉雅山脉的东西两端各有一个中深源地震活动中心。笔者定义东端的活动

中心为 17 号缅甸地震柱，西端的为 18 号兴都库什地震柱。这两个地震柱在纬向上相距约 10°，直线距离约 1 100 km（图 2b），在经向上相距约 20°，

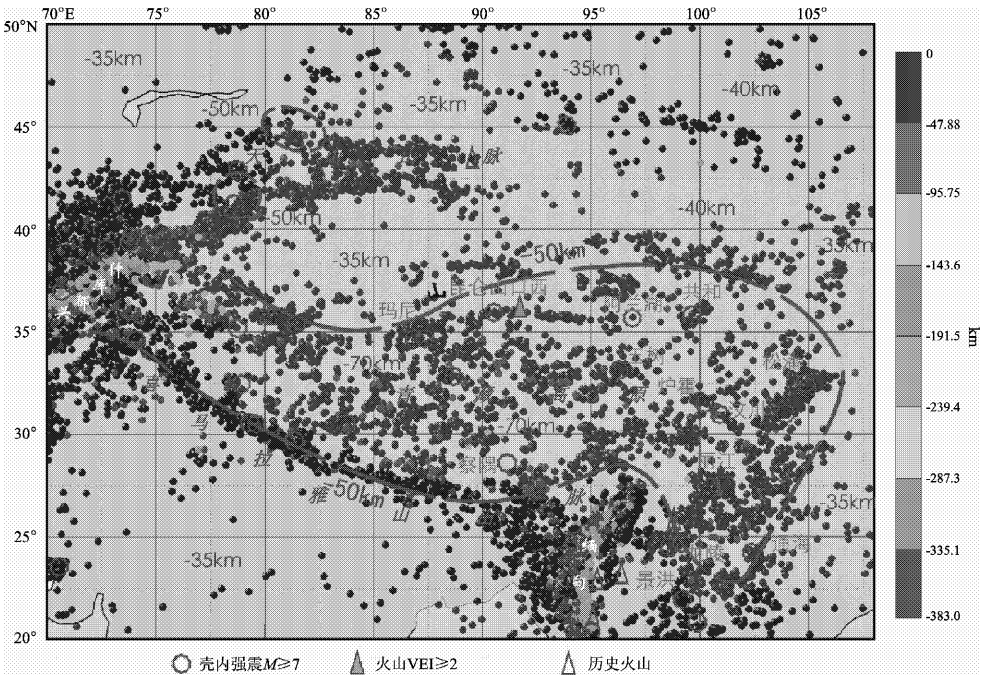


图 1 青藏高原及邻区地震活动的平面分布

（地震据 ANSS 目录，1963 年至 2012-09-15， $M \geq 4$ ；地壳厚度 -50 km 等值线示意图据段虎荣等（2010）编绘）

Fig. 1 Horizontal distribution of seismic activity in the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas

（ $M \geq 4$ earthquakes are based on ANSS catalogue from 1963 to Sep. 15, 2012; sketch map of crustal thickness contour of -50 km is compiled from Duan *et al* (2010)）

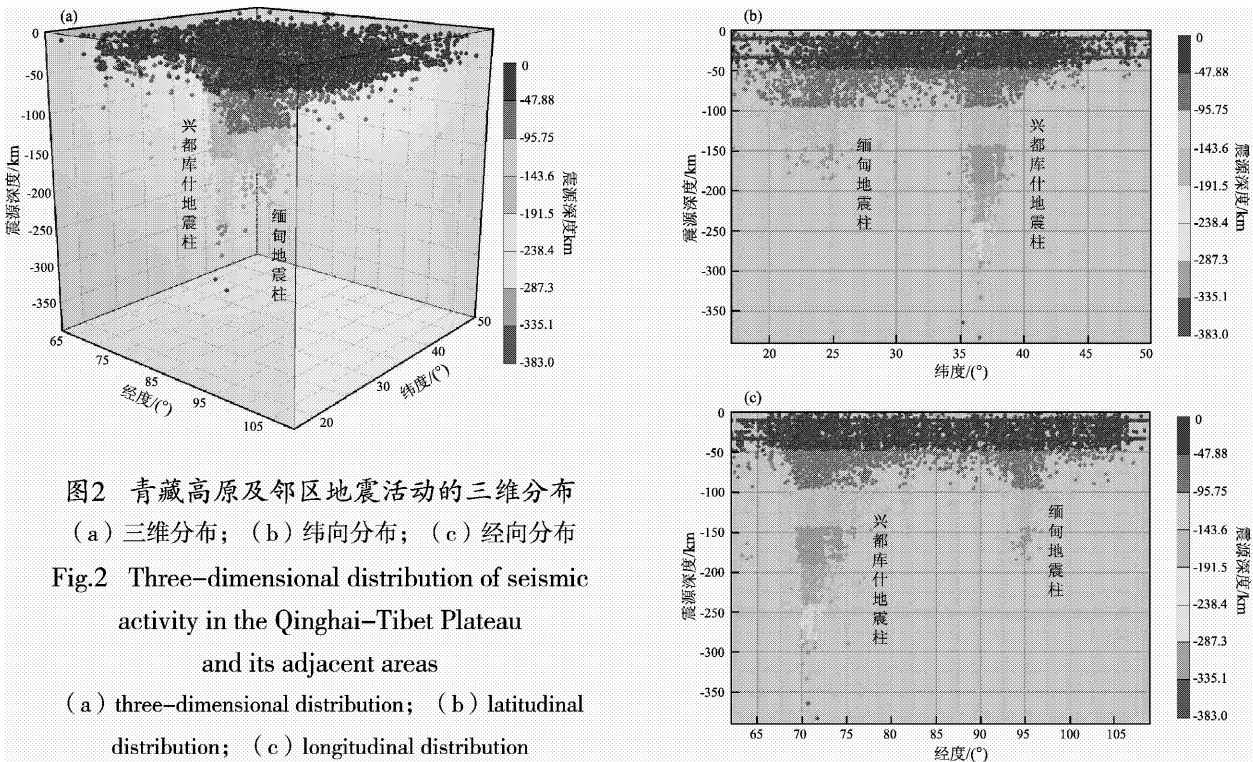


图2 青藏高原及邻区地震活动的三维分布

（a）三维分布；（b）纬向分布；（c）经向分布

Fig.2 Three-dimensional distribution of seismic activity in the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas

（a）three-dimensional distribution；（b）latitudinal distribution；（c）longitudinal distribution

直线距离约 2 200 km（图 2c）。

所谓地震柱是指在三维空间中由中、深源地震震源体密集形成的、顶点向下的、圆锥形的柱状地质体，是中、深源地震活动、壳内地震活动和活火山活动的集合，是地幔深部或上地幔与地表能量交换的通道，具有可视性、唯一性、独立性和稳定性。本文地震柱概念区别于传统的地幔柱概念（Davies，2005）。

图 3 按地震的震源深度将青藏高原及邻区地震活动分为 3 层：图 3a 为 0 ~ 34 km，即青藏高原的上地壳地震和周边地区的壳内地震；图 3b 为 35 ~ 74 km，即青藏高原的下地壳地震和周边地区的壳下地震；图 3c 为 75 km 以下的地震，即青藏高原的壳下地震。由图可见，0 ~ 34 km 地震活动分布面较广，35 ~ 74 km 地震活动紧缩在青藏高原和天山的深部，75 km 以下除了兴都库什和缅甸两个地震柱之外，其它地区只有极少的地震活动，而且深度只在 100 km 以内。

由于地震地热说里所定义的本尼奥夫剖面（陈立军，2013）必须通过地震柱的轴心，因而它只能出现在兴都库什地震柱和缅甸地震柱之内，不能向柱外伸展，两地震柱之内的本尼奥夫剖面也无法沟通。因此，沿喜马拉雅山脉约 1 600 km 长的中段山脉地区是基本上找不到“本尼奥夫带”或者说找不到“俯冲带”。

由图 3b 还可看出，青藏高原区内 7 级以上壳内强震的活动与 -50 km 地壳厚度等值线（段虎荣等，2010）存在着十分密切的关系。青藏高原 -50 km 地壳厚度等值线处在研究区内地壳厚度由 35 km 深度过渡到 70 km 深度的斜坡带上。强震的分布显示这个斜坡带是最利于应力集中之处，也显示这个斜坡带是长期处于受力状态的。

2 研究区的地表构造运动

由国家地震局地质研究所（1981）编著的亚欧地震构造图和李春昱等（1982）所编著的亚洲大地构造图均包含了本文的研究区。这两张构造图内容基本一致，作者据此编制了研究区的地震构造图，包括主要的大地构造单元和主要断层的力学性质，如图 4 所示，图 5 为研究区地表构造活动模式图。

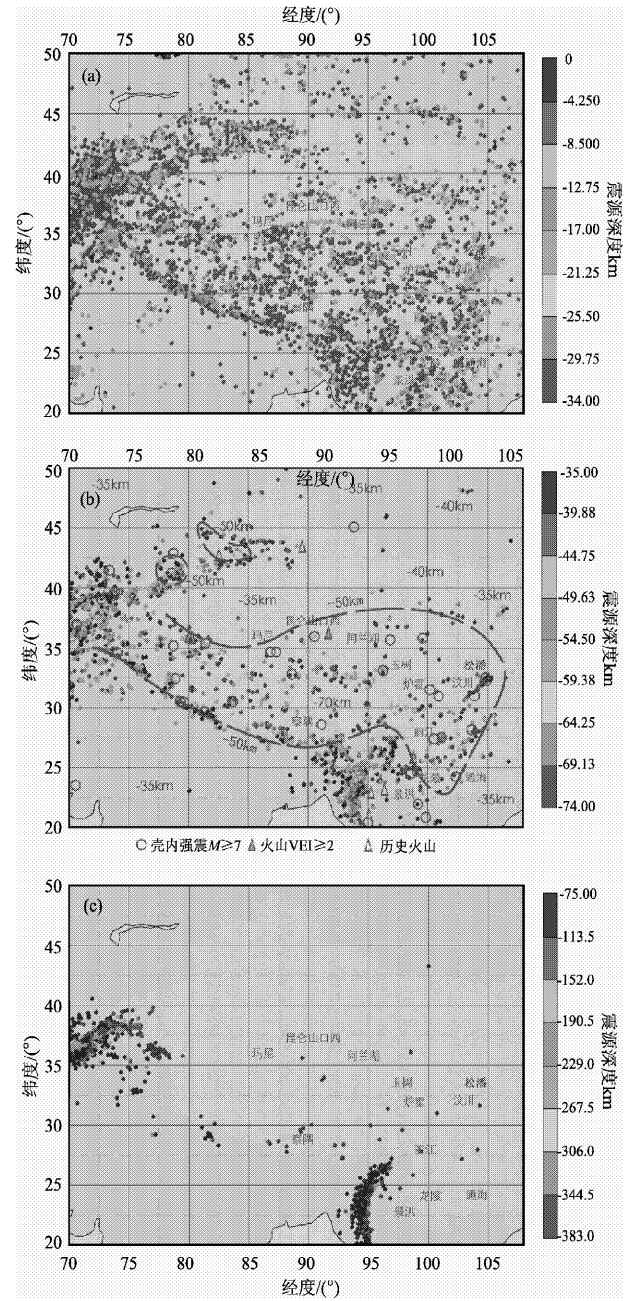


图 3 青藏高原及邻区地震活动的深度层分布
(地震资料据 ANSS 目录，1963-01-01 ~ 2012-09-15， $M \geq 4$ ；地壳厚度 -50 km 等值线示意图据段虎荣等（2010）编绘）
(a) 0 ~ 34 km；(b) 35 ~ 74 km；(c) 75 km 以下
Fig. 3 Deep level distribution of seismic activity in the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas ($M \geq 4$; earthquakes are based on ANSS catalog from Jan. 1, 1963 to Sep. 15, 2012; sketch map of crustal thickness line of -50 km is compiled from Duan *et al* (2010))
(a) depth 0 ~ 34 km; (b) depth 35 ~ 74 km; (c) under depth 75 km

由图 5 可见，帕米尔—兴都库什汇聚了 5 座大的山系：喜马拉雅山脉，昆仑山脉，天山山脉，苏莱曼山脉和帕尔帕米斯山脉。5 大山系相间 5 个平原或者高原：青藏高原，塔里木盆地，土兰平原，赫尔曼德河平原和印度河平原。5 座大山汇聚于一点，即帕米尔—兴都库什地区。同时，相间的 5 个平原（或高原）也尖灭于此处。

图 5 中依据图 4 给出了一些主干断裂的构造运动性质，显示了各山脉和各平原的活动方式。从图中可看出，地震构造模式恰如伸出左手抓起一坨泥巴逆时针地缓慢旋扭所形成的大地地貌。按照李四光（1976）的泥巴实验模式，可以设计一

套实验装置来模拟这个旋扭过程。于是，青藏高原和赫尔曼德河平原被挤了出去，印度河平原被拉了进来，塔里木盆地（图 6，顺时针旋扭，据牛之俊等（2007）、杨少敏等（2008）和笔者与郭良迁的私人通信^①）与土兰平原由于天山山脉受旋扭运动影响较小则在原地扭动着。如果把苏莱曼山脉和喜马拉雅山脉的原始地貌假定为单一的纬向构造，把昆仑山脉和帕尔帕米斯山脉的原始地貌也假定为单一的纬向构造，天山山脉则基本保留纬向构造的态势，于是旋扭运动及其影响就更加形象化了。这种旋扭运动的动力就在兴都库什地震柱。

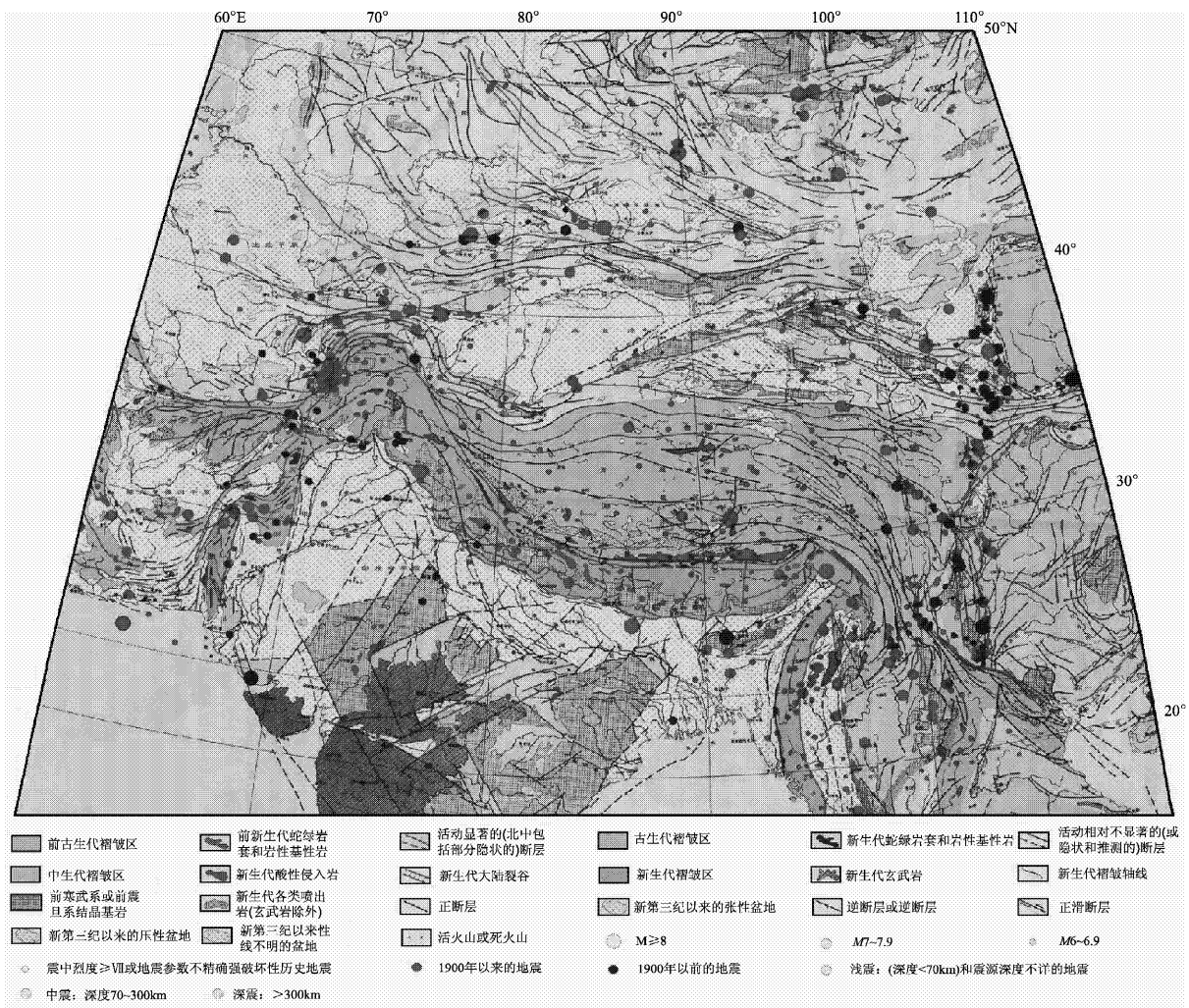


图 4 青藏高原及邻区地震构造图^②

Fig. 4 Seismotectonic map of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas

① http://blog.sina.com.cn/s/blog_41478bf40100nkyb.html.

② 据国家地震局地质研究所（1981）、李春昱等（1982）等改编。

缅甸地震柱也有类似的情形。李四光（1976）定义为滇川歹字型构造，缅甸地震柱正是其枢纽位置所在。

笔者发现了两个旋扭中心，恰如两只转轮。但是，比较而言，似乎兴都库什地震柱是一个主动轮，而缅甸地震柱则只是一个从动轮，是被青藏高原向东南方向挤出（歹字型构造的翼部）所

带动的。

由于地震柱内部的中深源地震活动在时间序列上呈自下而上逐层驱动之势，两个旋扭中心的能量显然都来源于深部（陈立军，2013），因此它们不会像汽车一样开走的，只是近地表部分会因被带动而变形，造山、造平原，改变着大地地貌。

因此，青藏高原的地震活动，就与这两个旋

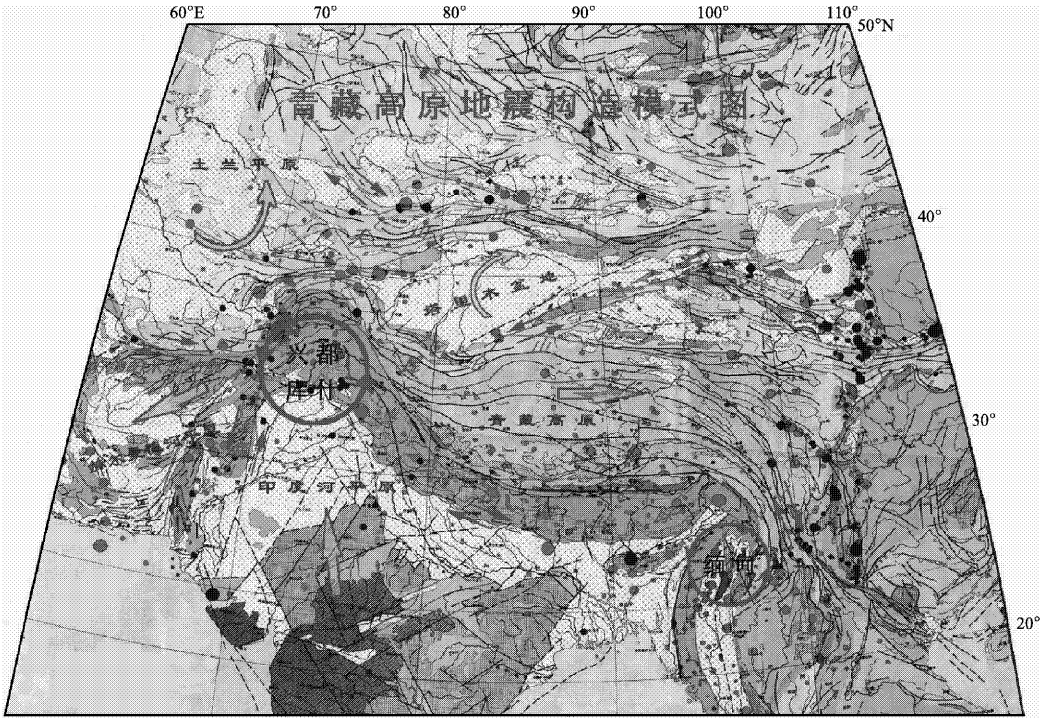


图 5 青藏高原及其邻区地震构造模式图

Fig. 5 Seismotectonic pattern map of the Qinghai-Tibet Plateau and its adjacent areas

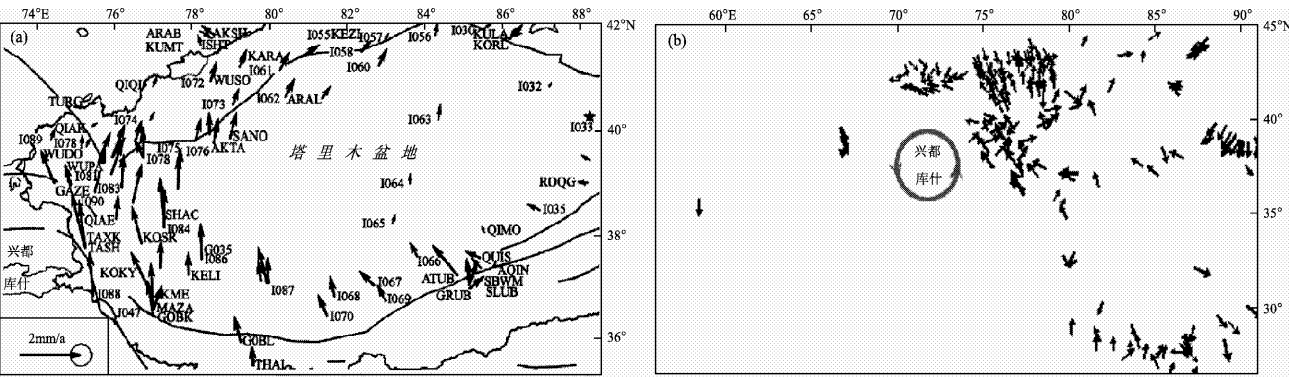


图 6 塔里木盆地绕东部 I033 点顺时针旋转的运动速率图和 55°~91°E、25°~48°N 区域的 GPS 测站年速率位移矢量图

(a) 据牛之俊等（2007）；(b) 以本区的整体位移为基准计算得出，据郭良迁（2002）

Fig. 6 Movement rate in clockwise rotation of Tarim Basin related to I033 point in eastern and annual rate displacement vector of GPS measuring stations in the area of 55 ~ 91°E and 25 ~ 48°N

(a) from Niu *et al* (2007) ; (b) calculated by the overall displacement as the reference based on Guo (2002))

扭中心不无关系了。青藏高原的地壳犹如一个勺状构造，正是由于兴都库什地震柱的旋扭运动所造就，必然对青藏高原的南北两侧构成挤压和（或）剪切，缅甸地震柱的旋扭对青藏高原向东南方向挤出构成阻碍，便在勺状构造的底部边缘部位，即勺底的斜坡带上，造成应力积累，屡发强震。图 3b 清楚地说明这一点。

青藏高原地壳深部的这种勺状构造，靠碰撞和俯冲是不能生成的，因为从力学的角度，在两个地块相互碰撞或者俯冲的界面上，应该是大致均匀变形的。或者说，青藏高原地壳深部的这种

勺状构造，只能靠某种旋扭型的构造运动才能建造。白登海等（2011）认为大地电磁观测揭示青藏高原东部存在两条中下地壳物质流。勺状构造的形态显示可能与某种旋扭型构造运动的牵引下所形成的青藏高原下地壳物质流的运动有关。

3 研究区地震构造的 GPS 资料解释

图 7 为全球 GPS 年度成果图及地表运动模式示意图。作者收集到 1999 ~ 2010 年部分 GPS 年度成果图皆基本一致，说明这个图像是相对稳定的。

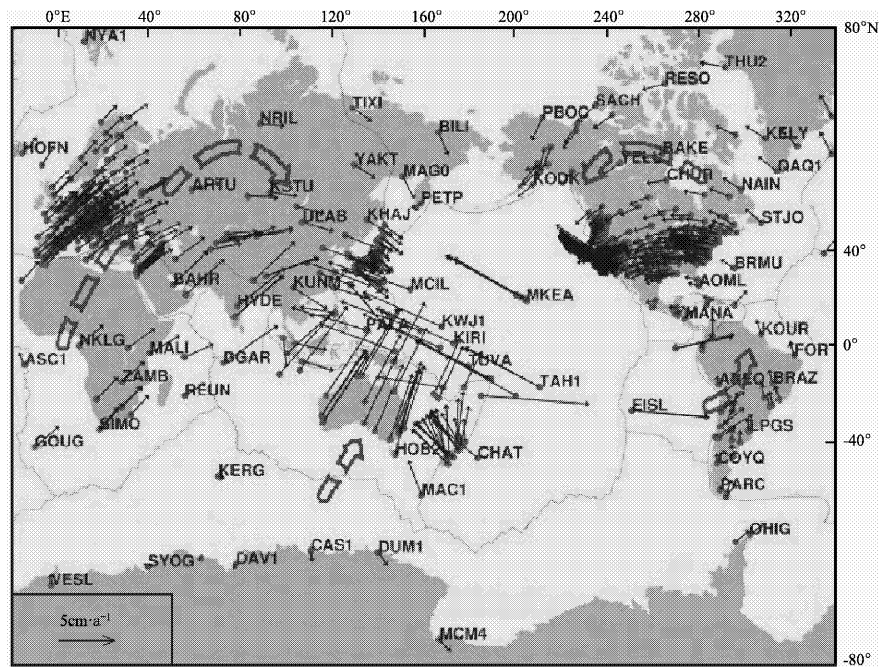


图 7 全球 GPS 年度成果图及地表运动模式示意图^①

Fig. 7 Global annual GPS maps and sketch map of surface motion model

由图 7 可见，当今全球地表的构造运动表现为：东半球整体呈顺时针旋转，西半球整体呈逆时针旋转，优势速率 2 ~ 7 cm/a，共同分裂大西洋，压迫太平洋。这是一种典型的大陆漂移现象。在图 7 中，无论是地中海到喜马拉雅，还是环太平洋的周边，都看不出会有发生地块“碰撞”的可能。尽管太平洋东南部在大洋中脊的两侧出现海底扩张的趋势，但其速率不超过 10 cm/a，单靠大洋底板构造变形就足以消减，并不具备驱动太平

洋地块与欧亚大陆“碰撞”的能力。在印度地块与欧亚大陆结合部，更是连续的趋势性右旋，似乎也并无“碰撞”的可能。

对青藏高原局部的 GPS 观测成果，笔者缺少有力资料。但图 6a 的左侧已经显示了兴都库什地区的某种左旋运动趋势。从图 6b（郭良迁等，2002）可以清楚地看到，兴都库什地区的确存在某种左旋运动的趋势。由于兴都库什以西、以南地区缺少 GPS 观测资料，还需作进一步研究。

^① 据 <http://sideshow.jpl.nasa.gov> 网页（2011）改编。

4 青藏高原的地震预测及地震监测工作的建议

4.1 青藏高原的地震预测

作者于 2012 年 1 月 5 日在美国西部的地震预测试验中发现，地震柱内的壳下地震活动可以作为壳内强震活动的前兆^① (<http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-525866.html>)。作者的预测区域 4 月 12 日发生加利福尼亚湾 6.2 和 6.9 级地震，得到验证。

基于本文的研究，根据地震地热说原理与地震和火山活动的预测方法，作者于 2012 年 4 月 19 日向地震主管部门提交了全球主要地震柱壳内强震与火山活动强度和活动地点的中期预测卡片（以下简称 0419 卡片），包括《全球主要地震柱未来 3 年活动趋势》和《全球主要地震柱未来 3 年活动地点》两个附件。0419 卡片的预测区域已有部分证实，包

括土耳其地震、菲律宾地震、危地马拉周边地震，甚至 2012 年 7 月 31 日危地马拉的火山喷发也发生在 0419 卡片的“可能火山区”附近。当然，目前的地点预测并不很准确，只能指出哪个地震柱、哪个地区将会发生壳内强震或者火山活动。地点和时间预测的准确性还有赖于当地的地震学方法与前兆方法预测的补充（陈立军等，2000；陆明勇等，2009；刘翔等，2010；付虹等，2011）。

0419 卡片附件 2 中对中国境内共画了 7 个“可能地震区”，其中 5 个在中国西部，2 个在台湾。截止当前，7 个“可能地震区”中已有 3 个出现了 6 级以上的壳内强震活动（图 8）。

0419 卡片所圈定的中国西部 5 个“可能地震区”中，4 个针对兴都库什地震柱，1 个针对缅甸地震柱，除 2 个已有强震活动外，尚有 3 个等待验证（图略）。

4.2 关于青藏高原地震监测工作的建议

鉴于青藏高原地震活动夹在兴都库什地震柱

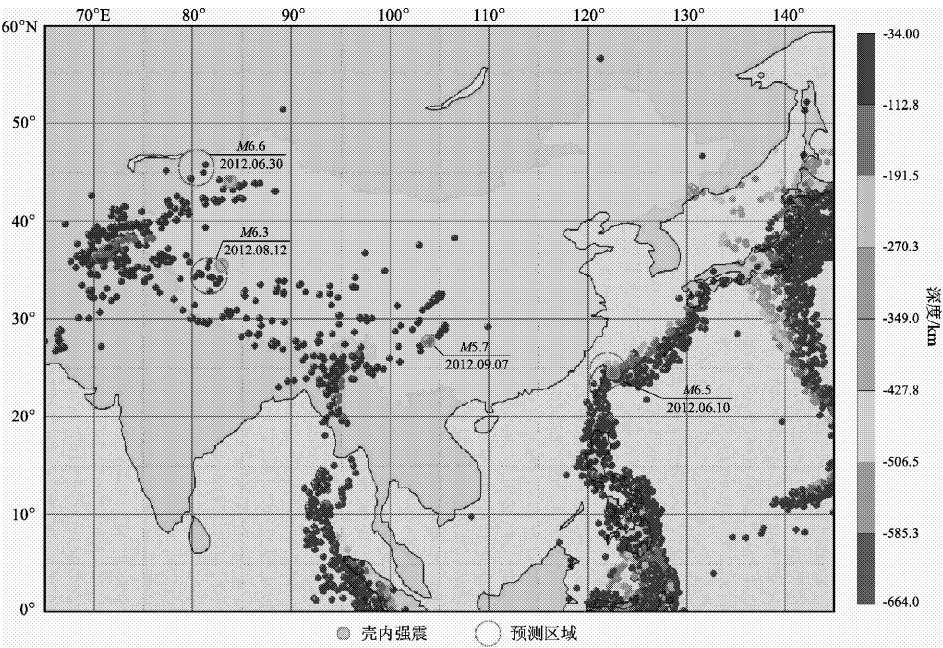


图 8 中国境内 2012 年 5 月以来 6 级左右壳内强震活动地点预测效果图

（据陈立军地震预测卡片，2012-04-19；图中虚线圆圈为 0419 卡片圈定的预测区；背景地震资料据 ANSS 目录。2009-01-01~2012-09-15， $M \geq 4$ ，震源深度 $h > 34$ km）

Fig. 8 Location prediction effect map of within-crust $M6$ strong earthquakes activities in China since May, 2012 (basing on Chen’s prediction card, 2012-4-19; dotted circles are prediction area delineated on 0419 card and $M \geq 4$ background earthquakes are from ANSS catalog, 2009-01-01~2012-09-15, focal depth $h > 34$ km)

① 陈立军，陈晓逢．2012．美国西海岸地震预测方法初探．湖南地震（内刊）．

和缅甸地震柱之间,必然与地震柱的活动有关,因此对青藏高原的地震监测工作提出如下建议:

(1) 青藏高原地震研究不能局限在中国国界以内,拟联系周边国家,组成一个如地中海的地震观测系统(EMSC)。目标区域至少针对本文的研究区。

(2) 拟对2级以上地震有效监控并确定4个参数:时间、地点、震级、震源深度并公开发布。

(3) 鉴于青藏高原人烟稀少,建议开发卫星观测系统,即用直升机在山顶安装拾振器,将信号发送到资源卫星,由地面站接收信号并入国家地震台网中心统一处理。

系统的地震监测资料,从获得到能用于地震预测研究,至少需要10年以上,因此是需要积极推进的。

5 结论与讨论

笔者根据地震地热说原理和中国西部的大地构造资料,讨论了青藏高原的地震构造活动模式及其地震活动特征,指出兴都库什地震柱和缅甸地震柱是控制青藏高原构造运动和地震活动的主因,青藏高原深达70 km的巨厚地壳是内陆地区壳内强震频发的有利构造条件,利用35 km以下青藏高原的下地壳地震和周边地区的壳下地震活动动态,参考历史震例,可以为研究区内的壳内强震活动与火山活动提供可能的活动强度、可能的活动地点与大致活动时段等前兆性指标,并取得了初步成效。本文的研究区别于“碰撞”和“俯冲”之说,也区别于“地块”之说。最大的区别在于,按照本文的观念可以预测未来几年内地震柱的活动趋势,而地块说和碰撞说只能在震后做出一些解释,却无法预测未来事件(地震与火山)发生的可能性。因此,地震地热说的原理与工作方法,至少在地震活动与火山活动的预测中是可以借鉴的。为此,笔者对青藏高原地区的地震监测工作提出若干建议,以利于为地震预测研究积累更加丰富的基础资料。

笔者所采用的ANSS地震目录没有统一的震级标度,只是不同标度的4级以上地震。好在笔者现阶段的研究只取一定深度以下的地震个数,未来如果需要讨论地震的强度关系或者能量关系,将

采取统计的方法转换为统一的震级标度来处理。

关于震源深度的精度问题,作者在科学网的博文中做了专题研究。研究结果表明,ANSS地震目录与中国地震台网的CSN地震目录对中国地区的震源深度测定结果大体一致。详见<http://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=552558&do=blog&id=611306>。

关于兴都库什地震柱旋扭运动的动力学机制问题,目前尚无明确的解释。由于地震柱内部的中深源地震活动呈自下而上逐层驱动之势,笔者推测,在同一个活动期内,该地震柱内的中深源地震活动有可能具有螺旋上升的势头。这需要结合地震活动的时序、三维空间分布以及地震的震源机制解加以综合分析。如果明确了兴都库什地震柱的动力学机制,缅甸地震柱的情形也就迎刃而解了。

参考文献:

- 白登海,腾吉文,马晓冰,等. 2011. 大地电磁观测揭示青藏高原东部存在两条地壳物质流[J]. 中国基础科学·研究进展,(1):7-10.
- 陈立军,周霞,陈晓逢. 2000. 南北地震带中南段地震学异常度的研究[J]. 地震研究,23(1):83-89.
- 陈立军. 2000. 中国地震震源深度与强震活动状态研究[J]. 地震地质,22(4):360-370.
- 陈立军. 2012. 地震地热说原理与应用[J]. 内陆地震,26(2):108-122.
- 陈立军. 2013. 地震柱的概念及其基本特征[J]. 华南地震,33(1):1-14.
- 段虎荣,张永志,刘锋,等. 2010. 利用卫星重力数据研究中国及邻域地壳厚度[J]. 地球物理学进展,25(2):494-499.
- 付虹,王绍晋,李丽,等. 2011. 滇中地区震源机制一致性参数时空分布与强震活动[J]. 地震研究,34(2):113-118.
- 国家地震局地质研究所. 1981. 亚欧地震构造图说明书[M]. 北京:地图出版社.
- 李春昱,王荃,刘雪亚,等. 1982. 亚洲大地构造图说明书[M]. 北京:地图出版社.
- 李四光. 1976. 地质力学方法[M]. 北京:科学出版社.
- 刘翔,吴国华,付虹,等. 2010. 滇西北强震活动特征及短期震兆研究[J]. 地震研究,33(1):7-13.
- 陆明勇,刘耀炜,范雪芳,等. 2009. 地下流体长趋势异常变化与强震预测的初步研究[J]. 地震研究,32(4):323-332.
- 牛之俊,游新兆,杨少敏. 2007. 利用GPS分析天山现今地壳形变特征[J]. 大地测量与地球动力学,27(2):1-9.
- 杨少敏,李杰,王琪. 2008. GPS研究天山现今变形与断层活动[J]. 中国科学D辑:地球科学,38(7):872-880.
- Davies G F. 2005. 地幔柱存在的依据[J]. 科学通报,50(17):1 801-1 813.

Seismotectonic and Seismic Activity of Qinghai-Tibet Plateau

CHEN Li-jun

(*Earthquake Administration of Hunan Province, Changsha 410004, Hunan, China*)

Abstract

Based on hypothesis of seismo-geothermics and geotectonic data in Western China, we discuss the seismotectonic activity pattern and seismic activity features of the Qinghai-Tibet Plateau, and pointed out that the Hingdu Kush and Myanmar seismic cylinders are the main reason of controlling the tectonic movement and seismic activity of Qinghai-Tibet Plateau, and the thick crust with 70 km in Tibetan Plateau is the favorable structural condition to induce within-crust strong earthquakes occurred frequently in inland regions. Then referring to historical earthquake case, we use activity dynamic of earthquake occurred in the lower crust with below 35 km in Tibetan Plateau and its surrounding areas. It could provide precursory indicators of possible activity intensity, activity locations and generally activity periods etc. for the within-crust strong earthquake activities and volcano activities in study area, and achieved primary effect. The seismotectonic activity pattern of Tibetan Plateau explained by the seismic cylinder theory seems closer to the seismic activity characteristics of Tibetan plateau. It not only can be more reasonable to explain the cause of within-crust earthquake or volcano occurrence, but also can predict activity trend of the cylinders and its influence area in the next few years.

Key words: hypothesis of seismo-geothermics; seismic cylinder; seismotectonic pattern; earthquake prediction; Qinghai-Tibet Plateau