中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 4 期: 653 ~ 664
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

基于地震参数的缅甸弧俯冲带处板块间几何接触方式的研究

张浪平①, 邵志刚①*, 马宏生②, 王行舟③, 李志海④

① 中国地震局地震预测研究所地震预测重点实验室, 北京 100036;
② 中国地震局, 北京 100036;
③ 安徽省地震局, 合肥 230031;
④ 新疆维吾尔自治区地震局, 乌鲁木齐 830011
* 联系人, E-mail: shaozg@seis.ac.cn

收稿日期: 2012-09-29; 接受日期: 2012-12-17
国家科技支撑计划项目(编号: 2012BAK19B0104)资助

摘要 从全球板块系统来看, 中国大陆周边板块活动是其地壳运动的主要外部力源, 明确周边板块与中国大陆间较精细的三维几何接触方式对中国大陆动力学研究具有实际意义. 本文首先基于研究区域地震活动参数, 引用 Hayes 等在 2009 和 2010 年提出的 Slab1.0 模型, 对其进行改造以适用于研究缅甸弧俯冲带处欧亚大陆与印度板块接触的几何产状. 其次, 沿缅甸弧俯冲边界带截取了 166 个剖面, 依次考察各剖面的震源深度分布情况, 对其进行线性平面与非线性曲面拟合, 定量地给出了缅甸弧俯冲带东向俯冲的三维几何产状及俯冲范围. 最后, 针对缅甸弧俯冲带上 6 个典型剖面的震源深度分布情况, 并联合震源机制解和地质构造背景讨论并初步给出了该俯冲带可能的动力作用模式. 本文企望为研究中国大陆与周边板块边界几何接触方式提供一个初步方案, 并为板块间的动力作用及相关地球动力学研究提供基础研究资料.

关键词
缅甸弧俯冲带
地震参数
板块边界
几何产状
Slab1.0

大陆动力学是研究大陆组成、结构、行为、动态演化及深部驱动机制的交叉学科, 是地球科学研究的前沿领域和发展方向[1,2]. 板块构造、板缘构造、板内构造与块体边界的地球物理场效应和陆内俯冲是大陆动力学研究主要前沿课题之一[3,4]. 将中国大陆视为一个置于全球板块运动框架下的动力系统, 周边板块作用于边界上的动力作用是其地壳运动的主要外部力源. 众所周知, 中国大陆是欧亚大陆的主要组成部分, 与之接触的板块边界有东部的西北太平洋板块边界、菲律宾海板块边界和西部的印度板块边界[5], 这些板块边界是中国大陆地区与外界系统接触和动力作用的主要地带[6]. 明确中国大陆与周边板块边界的几何接触以及动力作用是研究中国大陆动力学的基础问题之一.

从物理或力学的角度看, 大陆地区地壳应力应变的积累是一个典型的力学过程. 针对力学问题, 通常可以建立控制方程和定解条件等系列方程来描述, 其中控制方程包括本构方程、运动方程和几何方程, 定

中文引用格式: 张浪平, 邵志刚, 马宏生, 等. 基于地震参数的缅甸弧俯冲带处板块间几何接触方式的研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 653–664
英文引用格式: Zhang L P, Shao Z G, Ma H S, et al. The plate contact geometry investigation based on earthquake source parameters at the Burma arc subduction zone. Science China: Earth Sciences, 2013, 56: 806–817, doi: 10.1007/s11430-012-4578-x

解条件包括边界条件, 初始条件等. 因此, 明确了板块边界的几何接触与动力作用就相当于明确了中国大陆作为一个独立系统的边界条件与外部加载状况, 为研究中国大陆动力学问题, 尤其是开展多要素约束下的数值模拟和物理模拟[4,7]提供重要的基础参考资料.

板块俯冲带是地震和岩浆活动带[8,9], 俯冲带处板块间的相互接触和动力作用一直是国内外学者关注的热点. 自 20 世纪 70 年代, 学者们就开始通过考察震源深度分布特征并结合地质构造背景来描述欧亚大陆和印度板块在喜马拉雅弧碰撞接触的几何形态[10~15], 并尝试通过震源机制的空间展布特征来讨论板块接触的动力作用. 在研究两大板块碰撞的过程中, 学者们对喜马拉雅东、西构造, 也即缅甸弧俯冲带[16,17]和兴都库什帕米尔[18~21]两大板块碰撞的动力触角投入了更多的关注. 利用地震参数震源深度的分布特征学者们还对西北太平洋板块边界在日本海沟[22~26]以及菲律宾海板块在台湾[27,28]与欧亚大陆接触的几何形态进行了刻画. 随着地震层析成像技术的发展, 学者们开始从层析成像的角度[29~36]来探讨印度板块在喜马拉雅地区北向俯冲以及俯冲的最大范围等问题, 通过其深部介质的速度结构差异来讨论板块碰撞的几何形态. 同时, 该方法越来越多地应用在描述全球板块接触部位尤其是俯冲带的几何形态中[37~42]. 另外, 从 GPS 观测数据反演结果[43,44]、地震深反射[45~48]以及其他视角[49,50]也开展了很多与板块间相互接触方式有关的研究工作, 积累了对全球俯冲带部位板块相互碰撞的诸多认识.

缅甸弧俯冲带是喜马拉雅碰撞带和安达曼弧的转换地带[51,52], 是典型的陆内俯冲带. Santo[53]最先注意到缅甸弧下面的倾斜地震带, 之后, 国内外众多学者[10~12,14~17,54~61]相继对缅甸弧下的倾斜地震带开展了研究, 以截取剖面的方式考察其震源深度分布特征来刻画印度板块自西向东俯冲的几何特征. 随着研究的不断深入, 发现俯冲角度随深度变化而发生改变[16,60], 且倾角不一定随深度的增加而增大[61]. 除了利用地震参数来勾画缅甸弧俯冲带的几何形态外, 一些学者还利用层析成像技术描述了缅甸弧地区下方介质的速度结构差异[36,39,62,63], 由此讨论两大板块接触的几何结构. 另一方面, 通过考察震源机制的空间分布特征, 对俯冲带的区域应力场和动力环境得到了不断的认识[16,55~59,64,65], 综合认为俯冲带是印度板块在欧亚大陆边缘的俯冲和挤压造成的, 与此同时区域应力场直接反映了印度板块北东向挤压欧亚大陆.

以往研究多数为利用震源深度分布的空间特征、或结合层析成像技术得到的深部介质的速度结构差异定性地勾画板块间的作用方式. 板间地震位错是板块间相互作用的直接表现形式, 随着地震参数的标定精度逐步提高[28,66,67], Hayes 等[68~70]开发了利用地震参数的 Slab1.0 模型, 准定量地给出了全球几处海陆俯冲带板块间相互接触较为精细的三维几何形态及俯冲范围. 本文将基于地震参数, 引用 Hayes 等[68,69]提出的 Slab1.0 模型, 首先对其改造以适用于研究缅甸弧俯冲带处欧亚大陆与印度板块接触的几何产状, 进而给出两大板块在该处相接触的准定量较精细的三维几何产状及俯冲范围; 最后结合震源机制空间分布特征, 初步讨论两大板块在该处的动力作用方式.

1 研究方法与步骤

1.1 基础资料

缅甸弧俯冲带是全球地震最活跃的地区之一, 也是陆内中源地震的集中区. 图 1 给出的是研究区域

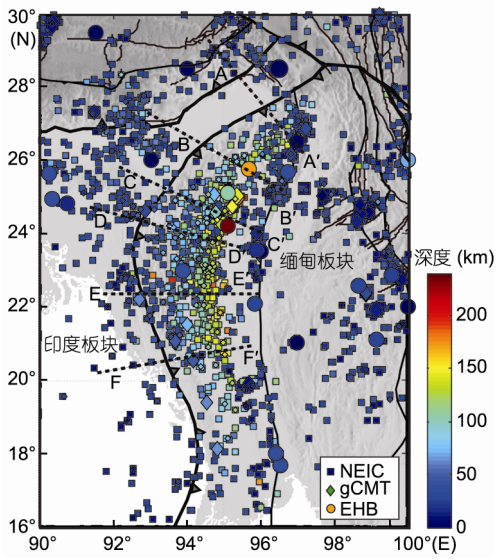

图 1 缅甸弧地区地震震中及震源深度分布情况

黑色粗实线为板块边界(也即一级块体边界, 黑色三角表示板块俯冲方向), 黑线为二级块体边界[71]; 虚线为 Steckler 等[60]所截取的 6 个截面, 为图 5 所示 6 个典型截面的空间位置; 震源深度用不同颜色标记; 圆形为 EHB 目录和 Engdahl 百年目录[66,67] (http://www.isc.ac.uk/EHB/); 菱形表示 Global Centroid Moment Tensor(gCMT)目录(http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html); 方形表示美国国家地震信息中心(NEIC)目录(http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/)

的震中分布图. 历史地震目录来源分别为哈佛大学给出的 1976 年以来 5.5 级以上地震的矩心矩张量解(简称 gCMT 目录), 美国国家地震信息中心给出的 1973 年以来的小震地震目录(简称 NEIC 目录). Engdahl 等[66]采用 ak135 走时模型并利用震相资料, 对 1964~2007 年全球 138394 个事件进行了重新定位, 使地震空间定位精度得到明显改善, 并提供相应的地震目录(简称 EHB 目录). 为了补充 1964 年之前的地震事件, Engdahl 和 Villasefior[67]给出了 1900~1999 年全球地震 7.0 级以上地震目录(简称 Engdahl 百年目录). 从图 1 给出的震源深度分布中可以看出中源地震集中分布于 19°~27°N 的区域, 最大深度超过 200 km. 研究区域地震震源深度分布大致勾勒出了印度板块在缅甸弧地区呈现的自西向东的俯冲特征.

1.2 地震事件筛选原则

首先, 选择板块边界上一点作为参考点, 做参考点处板块边界的切线和与其垂直并指向俯冲一侧的法线, 沿法线等间距选取若干节点(本文取 20 km)(图 2(a)). 以参考点为起点、法线为中心轴, 选取在板块边界俯冲一侧的矩形区域, 该矩形宽度为 200 km, 也即到中心轴距离不大于 100 km 的区域; 其长度为剖面上震源空间分布到参考点处切线的最大距离(图 2(b)浅蓝色区域, 矩形长度根据震源空间分布特征确定). 为了去除上盘地震和参考点下方地震对板块俯冲形态分析的影响, 约束震源与参考点处切线形成的平面与水平面的夹角范围为 5°~60°[68,69], 也即图 2(c)中黄色三棱柱为最终地震事件筛选的有效空间范围, 即地震目录“筛选器”, 该区以外的地震事件将不参与计算. 取一剖面为例(图 2(d)), 以参考点处的水平法线为横轴, 深度为纵轴, 将所有与剖面距离不大于 100 km 的地震震源投影到剖面上. 图 2(d)中彩色标记的震源表示落在图 2(c)所示黄色三棱柱内的地震事件, 灰色标记的为有效区域外的地震事件.

利用图 2(c)中浅黄色区域的地震事件“筛选器”, 对 EHB 目录, NEIC 目录和 gCMT 目录进行筛选, 落在该区域内的地震事件为考察该参考点处板块接触情况的有效目录. 3 套地震目录通过筛选的地震事件存在重叠, 为了保证深度拟合的信度, 应该对重叠的地震目录进行去除, 对于同一个地震事件, 其震源位置只参与一次计算. 据研究经验认识, 地震空间定位的精度依次为 EHB, NEIC 和 gCMT 目录[66,68]. 因此, 对于同一个地震事件, 如果 EHB 目录可用, 则先用 EHB 目录, 其次再是 NEIC 目录, 最后为 gCMT 目录. 实际操作过程中, 由于 NEIC 目录记录的时间范围和震级下限完全覆盖了 gCMT 目录的时间与震级范围, 所有 gCMT 记录的地震事件都会被 NEIC 记录到, 因此记录矩心位置的 gCMT 目录将不被采用. 本文讨论剖面震源深度分布特征的过程中只用到了 EHB 和 NEIC 目录, 同时考虑到 EHB 目录的最小完整性震级为 M_b4.7[66], 因此在操作过程中 1900~1973 年间的地震事件采用 EHB 目录记录的震源位置, 1973~2007 年间 $M\geqslant$5.0 地震采用 EHB 目录提供的震源参数, 期间 $M<$5.0 的地震事件以及 2007 年之后的地震事件采用 NEIC 目录提供的震源参数.

1.3 板块接触面的线性平面拟合

由于定位精度的影响, 目录记录的地震事件的震源位置具有一定的不确定性, 可认为每一个地震事件的空间位置误差均服从正态分布函数. 与板块边界的尺度和震源深度误差相比, 震源的水平误差要小很多, 因此可认为震源的水平位置是已知固定的, 只有震源深度是不确定的, 其取值可以通过概率密度函数来确定, 该概率密度函数是以相关机构报道的震源深度为期望的正态概率密度函数, 并通过标准差来标度报道的震源深度与实际震源深度的偏差. EHB 和 NEIC 地震目录中均已给出了震源深度参数, EHB 目录中附带有震源深度的标准差, 可从目录文件中读取获得, 对于 NEIC 目录震源深度的标准差可取值为常数, 本文取为±18 km[68]. 同时, 针对不同震级的地震事件赋予不同的权重, 震级越大的事件给予更高的权重, 与实际地震事件的破裂尺度[72]相对应.

经过目录筛选之后, 将通过筛选的有效地震事件震中位置投影到参考点处的剖面上, 将根据剖面震源深度分布情况来计算该处板块间俯冲平面的倾角. 假设俯冲倾角δ在 5°~60°之间变化, 采用最大似然的方法来确定可能性最大的俯冲倾角, 具体计算表达式如下[68]:

$$P(\delta)=\prod_{i=1}^{i=n}\left\{\left[\frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{[x_i(\delta)-\mu_i]^2}{2\sigma_i^2}\right\}\right]\omega_i+\omega\right\}, \quad (1)$$

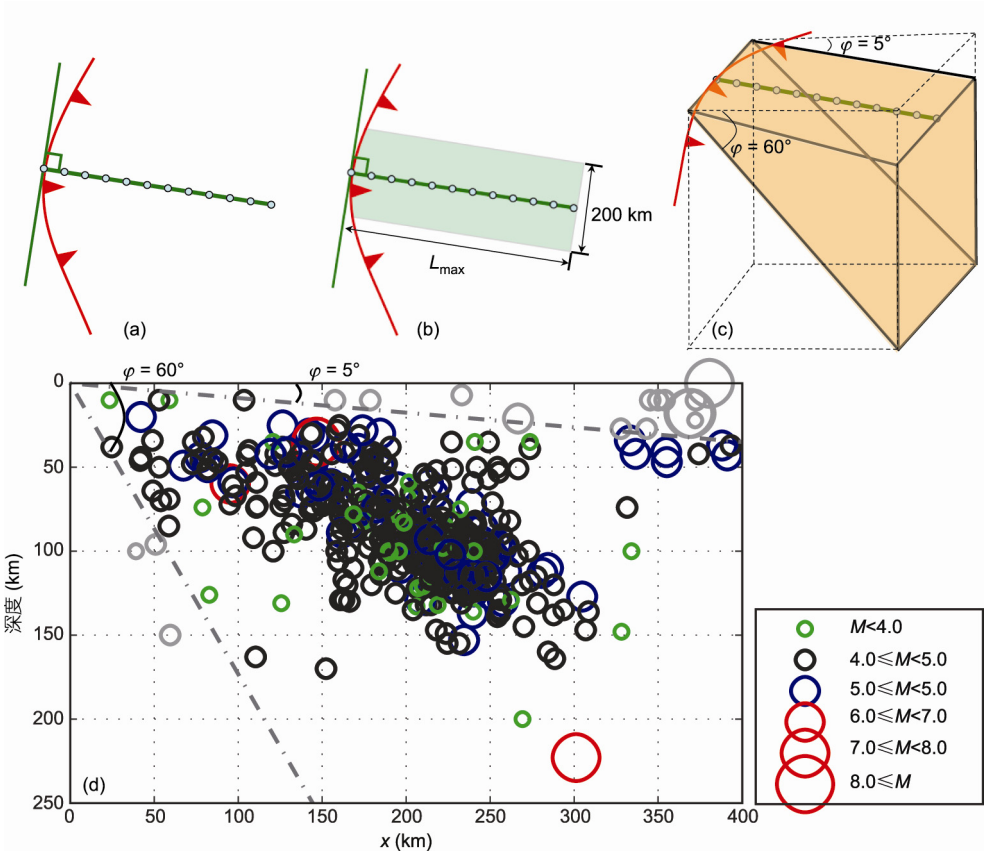

图 2　地震目录筛选过程示意图

(a) 以俯冲板块边界(红线)选取一点, 取其俯冲边界法线为截面的中心线, 并沿中心线等间距取点; (b) 沿中心线选取宽度为 200 km, 以 L_{max} 为长度的矩形区域, L_{max} 由剖面的震源分布特征确定; (c) 与水平面成 5°和 60°夹角的两个平面所围的浅黄色三棱柱为筛选地震目录的空间范围, 即地震目录"筛选器"; (d) 以实际剖面为例, 彩色标记的是通过"筛选器"的地震事件, 灰色标记的是未通过"筛选器"的地震事件

其中, σ_i 为地震事件深度所服从的概率密度函数的方差; $x_i(\delta)$ 为根据俯冲平面的倾角δ与距离板块边界的横向距离所计算出来的理论震源深度; μ_i 为概率密度函数的期望, 取值为报道的震源深度; ω_i 为事件的权重, 取值与地震事件震级相关; ω 是一个用来避免括弧内第一项接近于 0 设置的参数, 通常取值为 0.1. 对式(1)取对数, 可将乘积形式转化为求和形式:

$$P'(\delta)=\sum_{i=1}^{i=n}\log\left\{\left[\frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}}\exp\left\{-\frac{[x_i(\delta)-\mu_i]^2}{2\sigma_i^2}\right\}\right]\omega_i+\omega\right\}. \tag{2}$$

以图 3(a)所示的参考点为例, 首先求板块边界在参考点处法向, 建立地震目录"筛选器", 筛选出符合条件的目录. 图 3(a)所示的红色方框为"筛选器"的空间位置, 图中所示彩色标记的震中为通过"筛选器"的地震事件的空间分布情况. 将其投影到剖面上, 剖面以参考点为原点、剖面中心轴为横轴, 震源深度为纵轴, 见图 3(d). 该处倾角δ从 5°到 60°变化, $\Delta\delta=1°$滑移, 利用式(2)计算出相应的 $P'(\delta)$, 得到 $P'(\delta)$ 随倾角变化的曲线见图 3(b), 发现当倾角取值为 23°时, $P'(\delta)$ 取值最大. 因此, 认为在该参考点处的板块俯冲角度为 23°, 板块间的接触方式为一个倾角为 23°的平面.

为了考证线性平面拟合的可信度, 将对其拟合情况进行残差分析和拟合相关度分析, 计算采用的残差计算公式为

$$RMS(\delta)=\frac{\sum_{i=1}^{i=n}\omega_i(\mu_i-x_i(\delta))^2}{\sum_{i=1}^{i=n}\omega_i}, \tag{3}$$

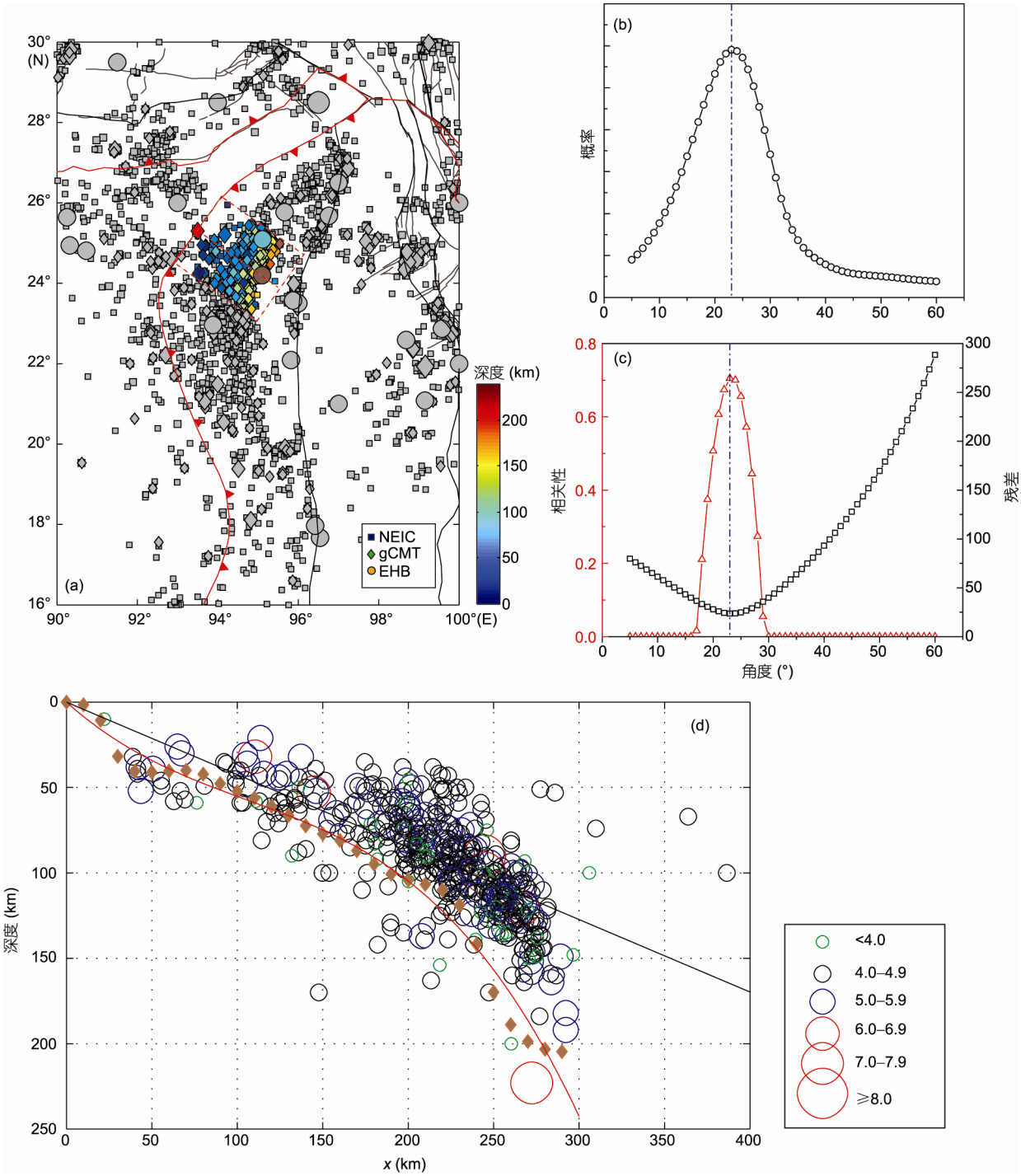

图 3　典型剖面震源深度投影及拟合流程图解

(a) 剖面的空间位置及经筛选后剖面投影地震的震中分布, 其中红色虚线表示该剖面涉及的空间范围, 灰色标记的表示研究区域的地震震中分布, 彩色标记的表示经过筛选后的地震震中分布, 红色菱形块为该参考点的位置; (b) 线性平面拟合的概率取值与倾角的关系曲线, 倾角在 5°~60°变化; (c) 剖面震源深度的线性拟合度、残差与倾角的关系; (d) 剖面震源深度投影及拟合结果, 黑色实线为线性平面拟合的结果, 与横轴的夹角即为该参考点的俯冲平面的倾角, 藏红色菱形块为轴向等间距节点上的特征深度, 红色实线为藏红色菱形块的非线性曲面拟合结果, 反映了参考点处的板块接触的俯冲曲面情况

式中 $RMS(\delta)$ 为对应倾角 δ 的拟合残差. 拟合相关度的计算公式为

$$R^2 = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \omega_i (\mu_i - x_i(\delta))^2}{\sum_{i=1}^{i=n} \omega_i (\mu_i - \overline{\mu})^2}, \tag{4}$$

式中 R 为拟合度, $\overline{\mu}$ 为震源深度的均值. 通常用拟合的残差与拟合度来判定拟合的效果, 残差越小, 拟合效果越好; 拟合度越高, 拟合效果越好. 由剖面震源深度线性平面拟合的残差与拟合度分析结果(图3(c))可以看出, 残差和拟合度在倾角为 23°的时候分别达到最小值与最大值, 且拟合度值达到了 0.7, 这表明线性拟合的结果是可信的.

1.4 板块接触面的非线性曲面拟合

图3(d)中的黑色实线为线性平面拟合的结果, 与横轴的夹角即为该参考点处的俯冲角度. 从线性平面拟合的结果并结合上述的残差分析可以看出, 线性拟合在一定程度上可以反映出板块的俯冲情况, 但实际上板块间的俯冲倾角并不是恒定不变的, 板块间俯冲接触面实为曲面. 已有研究成果[61]表明, 俯冲倾角是随俯冲深度发生变化的, 因此有必要开展非线性曲面拟合的工作, 这一部分将论述开展非线性曲面拟合的步骤.

首先, 从剖面上震源深度分布特征可以看出, 通过"筛选器"的地震目录仍然可能存在上盘地震. 图3(d)中横轴为 300~400 km, 深度为 50 km 左右的几个地震可以较为明显的归属为上盘地震. 因此, 在进行非线性曲面拟合之前, 首先要对通过"筛选器"的上盘地震进行去除. 基于线性平面拟合得到的俯冲角度与剖面震源深度分布特征, 本文所采用的方法是改变约束倾角的取值, 之前"筛选器"所用的最小倾角 $\delta_{\min}$ 将随横轴发生变化, 取值规则如式:

$$\delta_{\min} = \begin{cases} 5^\circ, & x < 150 \text{ km}, \\ (5 + (x - 150)/20)^\circ, & x \geqslant 150 \text{ km}, \end{cases} \tag{5}$$

式中 $\delta_{\min}$ 为倾角取值范围的下限, 也即与板块边界横向距离超过阈值 150 km 时, 倾角取值范围的下限发生改变, 而且取值与其和板块边界的距离相关.

去除完上盘地震的剩余地震进行非线性曲面拟合, 为了便于非线性拟合, 首先将众多地震事件震源深度集中到剖面中心轴的等间距节点上, 之后便用剖面中心轴上各等间距节点的特征深度来代表该剖面的震源深度分布进行非线性曲面拟合. 各节点的特征深度计算如式:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Omega_i(M_i, x_i)\mu_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \Omega_i(M_i, x_i)}, \tag{6}$$

其中 $Z(x)$ 为节点的特征深度, x 为节点的横向坐标; $\Omega_i(M_i, x_i)$ 为第 i 个地震事件震级和空间位置共同作用对计算节点特征深度的影响权重, M_i 表示该事件的震级, μ_i 为地震事件的震源深度. 考虑到震级与破裂面积存在的关系[72]以及地震波能量衰减规律, 权重计算可按下式:

$$\Omega_i(M_i, x_i) = 10^{M_i} \exp\left(-\frac{(x - x_i)^2}{2D}\right), \tag{7}$$

其中 D 为调整空间位置权重影响的参数, 取值为 200 km^2. 从式(7)可以看出, 公式右边的第一项反映的是震级对权重的影响, 第二项反映的则是与节点的横向距离对权重的影响.

依次计算剖面中心轴上节点的特征深度, 如图3(d)中所示的藏红色菱形块, 直到节点的 x 正向不再有地震为止. 在对节点特征深度进行拟合之前, 考虑到 $x = 0$ 处节点、也即参考点, 为板块边界上的点, 可将该处的深度固定为零. 因此, 拟合采用的多项式的常数项取值为零. 文献[69]研究指出采用高阶的多项式拟合容易出现不合理的震荡弯曲, 建议采用2~4阶多项式进行拟合, 图3(d)中红色实线曲线即为3阶多项式的拟合结果.

1.5 缅甸弧俯冲带板块接触的拟合结果

按照上述方法, 沿着缅甸弧俯冲带由南往北依次截取了166个剖面进行非线性曲面拟合, 最后通过各截面的拟合结果就可得到缅甸弧俯冲带板块间接触面的三维几何形状. 图4(a)给出的是166个剖面的空间位置及各剖面的长度, 图4(b)为接触面的三维几何产状, 用颜色表示深度. 由结果可以看出印度板块在缅甸弧俯冲带附近呈现明显的自西向东的俯冲特征, 最大俯冲深度位于 24°N 附近, 并且在该处形成一个半环形的集中深度区, 这表明板块接触面在24°N处以W-E向俯冲为主, 往北逐渐发展为NW-SE向俯冲, 往南逐渐发展为 SW-NE 向俯冲, 这与前人

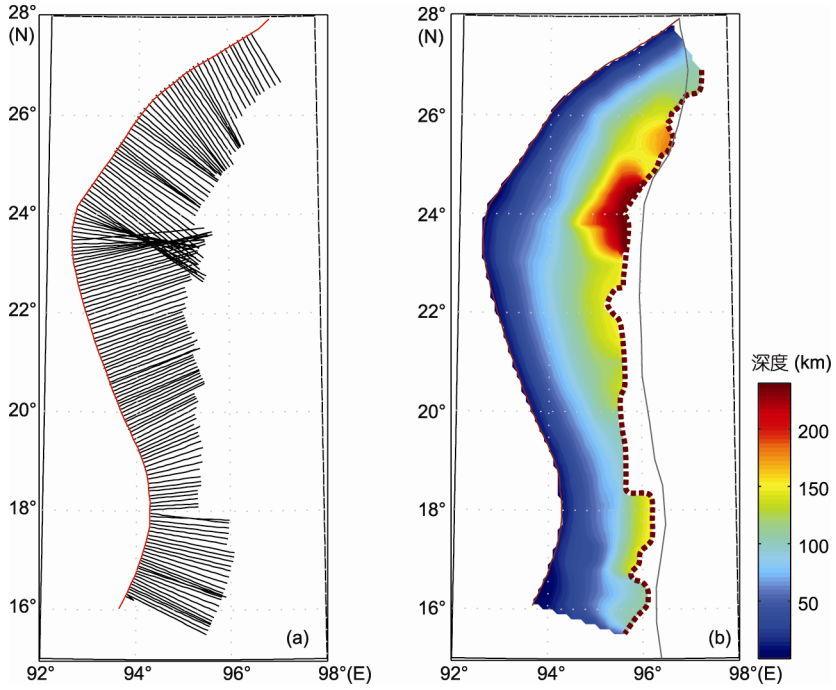

图 4　缅甸弧俯冲带剖面选取与非线性曲面拟合的空间结果

(a) 在缅甸弧地区截面选取的空间位置; (b) 印度板块在缅甸弧俯冲带向东俯冲与欧亚大陆接触的三维几何产状(色带颜色表示深度)以及板块间相互接触的闭锁线, 图中深红色虚线表示, 图中深红色实线为板块边界线、灰色实线为实皆(Sagaing)断裂

的研究结果[12,60]是一致的. 在非线性曲面拟合的过程中, 当剖面中心轴节点的深度方向不再有地震时就终止计算, 因此, 图 4(b)彩色区域的边界线即为两大板块相互接触的闭锁线(locked line)[73], 也就是两大板块间以地震破裂为主要表现形式的最大接触范围, 且闭锁线大部分位于 96°E 以西, 只有 24°N 以北的部分越过了 96°E.

2　讨论与结论

本文引用 Hayes 等[68~70]提出的 Slab1.0 模型, 对其进行改造以适用于研究缅甸弧俯冲带处欧亚大陆与印度板块接触的三维几何产状. 主要思路以板块边界点为参考点截取剖面, 建立地震目录"筛选器", 针对剖面震源深度分布情况依次开展线性平面拟合和非线性曲面拟合, 最后给出参考点处板块间相互接触的方式. 沿着缅甸弧俯冲带从南往北选取了 166 个剖面, 通过考察各剖面震源深度分布的非线性曲面拟合结果, 准定量较精细地给出了印度板块在缅甸弧地区向东俯冲的三维几何形态及两大板块相互接触闭锁线的位置.

在依次对缅甸弧俯冲带若干剖面进行线性平面拟合的过程中发现上盘地震的去除会影响到拟合结果, 上盘地震的存在会导致俯冲平面的倾角偏小. 本文参考 Hayes 和 Wald[68]提出的方法, 去除了$\delta<5°$的地震事件, 以此来确保沿截面一定距离的上盘浅源地震不参与倾角的计算; 去除$\delta>60°$的地震事件, 是基于以往研究结果给出的缅甸弧俯冲带倾角未超过 60°的认识, 以确保参考点下方的地震事件不参与计算. 同样, 上盘地震对非线性曲面拟合的结果也会带来一定的影响. 缅甸弧俯冲带的东侧为实皆断裂, 该断裂附近有较多的浅源地震, 因此非线性曲面拟合之前要充分利用线性拟合得到的俯冲平面倾角的结果, 将距剖面起点(板块边界点)的横轴坐标大于阈值(150 km)且为俯冲平面倾角以上的地震视为上盘地震, 并将其去除. 在分析板块接触三维几何产状的过程中可以考虑手动去除上盘地震[61], 减少自动去除上盘地震对拟合结果的影响.

在以往众多板块接触几何产状的研究中, 学者们大都采用沿板块边界选取剖面考察剖面震源深度分布特征的分析方法, Hayes 等[68~70]开发了基于地震参数研究板块间相互接触的三维几何形状的

Slab1.0 模型, 并应用该方法完成了全球几处俯冲模式相对简单的海陆俯冲带的三维几何产状分析. 该方法相比之前的研究工作更为定量, 给出的几何产状也更为精细, 但由于该文采用的是 Bird[74]所给的板块边界, 认为印度板块与欧亚大陆是以实皆断裂为板块边界, 因此并未对缅甸弧俯冲带开展 Slab1.0 的工作, 倘若针对实皆断裂开展 Slab1.0 的工作将会得出与前人结论相悖的认识. 因此, 本文针对缅甸弧俯冲带开展相关工作不仅可以积累对中国大陆与周边板块接触情况的认识, 同时也是对前人工作的推进与补充.

图 4(b)给出的缅甸弧俯冲带地区印度板块与欧亚大陆接触的三维几何产状, 属于两大板块接触的静态描述, 并未涉及两大板块之间的相互动力作用. 图 1 黑色虚线给出了 6 个剖面的空间位置, 将通过考察这 6 个典型剖面震源机制的深度分布情况来讨论两大板块在缅甸弧地区的相互动力作用. 6 个剖面的具体位置、中心点坐标、垂直剖面的投影范围及走向角度等参数见表 1. 利用 gCMT 目录提供的震源机制解, 将投影范围内的地震事件的震源机制投影到各剖面上, 结果见图 5, 其横轴是以点(18°N, 90°E)为基准的相对纬向距离, 各剖面震源机制类型统计结果见表 1. 6 个剖面上的中源地震事件震源的横轴坐标大都小于 600 km, 这与图 4(b)中闭锁线的大部分没有超过 96°E 的结果是一致的, 而 96°E 正好是实皆断裂的空间位置(对应为图 5 中浅蓝色倒三角标记的位置). 从图 5 中各剖面上震源机制的分布情况可以看出在实皆断裂位置存在大量走滑型浅源地震, 正好与实皆断裂的右旋走滑相对应. 同时, 在横坐标为 800 km 左右的位置, A-A′, B-B′两个剖面兼有正断和走滑两类地震, 这与滇缅块体内的腾冲-龙陵地震带走滑兼拉张的断层性质[75]相对应.

从图 5 可以看出, 剖面 B-B′, C-C′, D-D′和 E-E′的震源机制可以较明显地在横轴为 400 km 左右的位置分成两段, 西段以走滑型地震为主, 存在少量的逆冲型地震, 表明板块间在此部位以走滑运动为主、兼有少量的俯冲且俯冲角度较小; 东段以逆冲为主, 存在少量的走滑型地震, 这表明东段以俯冲为主且俯冲倾角较大, 这与图 4(b)给出的高梯度等值线集中在 24°N 的结论是吻合的, 等值线梯度较小的区域以走滑为主, 等值线梯度较大的区域以逆冲为主; 同时, 从这四个剖面震源机制的分布特征可以看出, 图 4(b)中 24°N 半环形的等值线高梯度区表现出很强的逆冲特征. 因此, 从震源机制空间分布特征的角度证实了该区板块间几何接触方式结果(图 4(b))的可靠性. 结合缅甸弧俯冲带的三维几何接触方式(图 4(b))和震源机制解的分布特征(图 5), 可以看出两大板块在此处的动力作用方式表现为 24°N 处以 W-E 向俯冲为主, 往北发展为 NW-SE 向俯冲, 往南发展为 SW-NE 向俯冲.

缅甸弧俯冲带两大板块间的运动与动力模式历来是地学研究的热点. 近年来, 该问题的研究取得了较大进展, 胡家富等[63]联合地震活动与速度结构分析认为印度板块从 94°E 附近开始俯冲, 并且缝合于实皆断裂. Meade[76]通过块体模型模拟分析了印度与亚洲碰撞区的当前运动模式, 认为在缅甸弧俯冲带地区的运动模式主要表现为逆冲与走滑, 表明印度板块在北北东向运动的同时, 还呈现自西向东的俯冲. Liu 和 Bird[77], Copley 和 McKenzie[78], Copley[79], Maurin 和 Rangin[80]都试图利用大地测量结果、断层滑动速率和区域构造应力场建立青藏高原东南部的运动与动力模式, 研究过程中都只是定性地给出了两大板块在缅甸弧俯冲带接触的三维几何形态, 而本文直接以地震活动参数为基础数据准定量较精细地给出了该区板块间接触的三维几何形态, 可为今后开展类似工作提供可靠的基础研究资料.

表 1　缅甸弧俯冲带 6 个截面的位置、投影范围与走向角以及剖面的震源机制统计

剖面编号	剖面中心坐标		走向角度	投影范围(km)	震源机制类型统计			
	北纬	东经			正断型	逆冲型	走滑型	总数
A-A′	27.788°	95.827°	140°	±100	3	9	12	24
B-B′	26.284°	94.717°	120°	±70	9	9	21	39
C-C′	25.270°	93.380°	115°	±70	0	22	19	41
D-D′	24.180°	93.490°	105°	±100	2	21	23	46
E-E′	22.380°	93.410°	90°	±100	3	11	13	27
F-F′	20.600°	93.660°	80°	±100	7	2	7	16

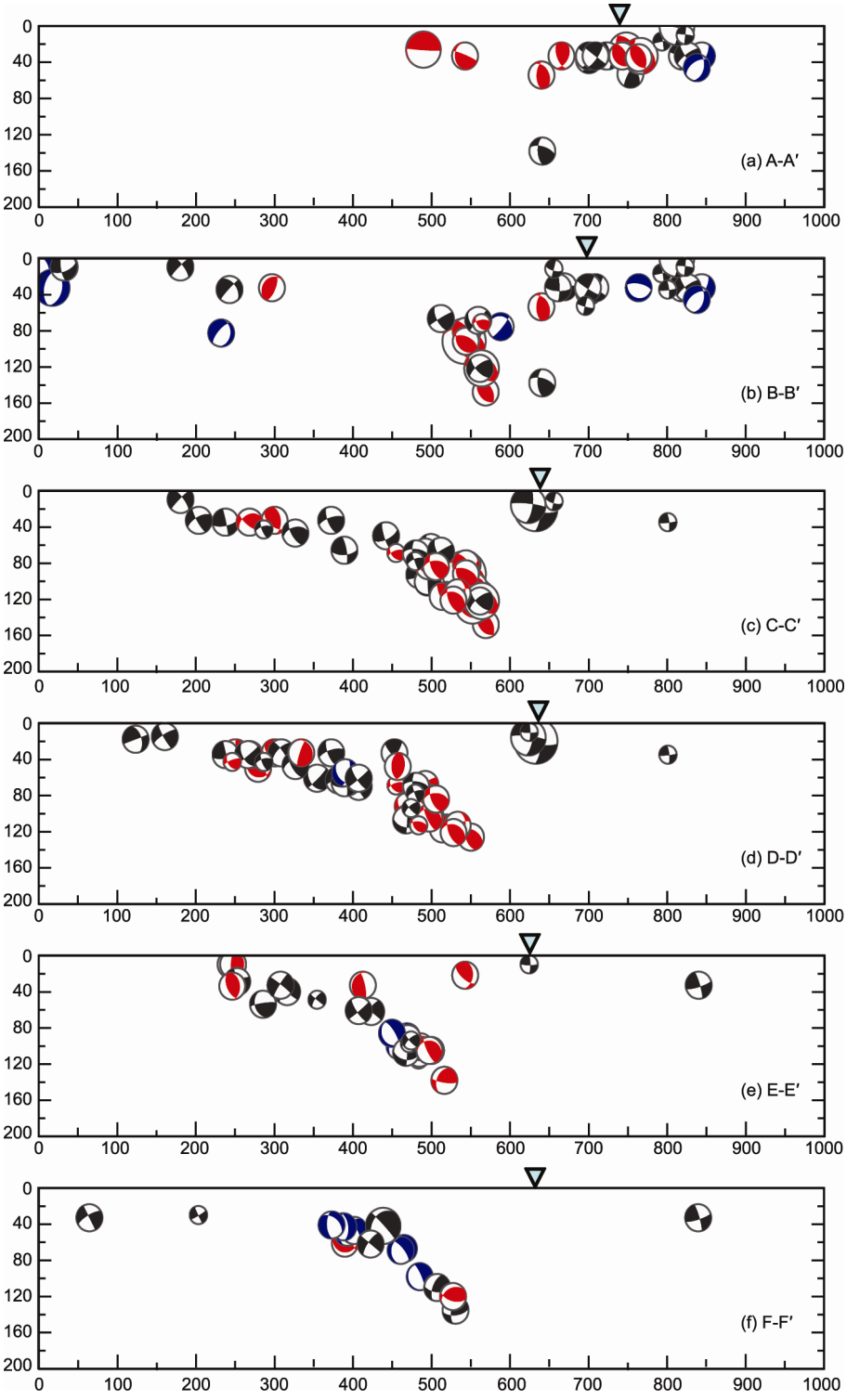

图 5　缅甸弧俯冲带地区 6 个截面的震源深度分布与震源机制情况

6 个截面 A-A′, B-B′, …, F-F′的空间位置见图 1, 分别以距图 1 截面中心线 100, 70, 70, 100, 100 和 100 km 距离为地震投影范围[60]; 纵轴为震源深度, 横轴为以点(18°N, 90°E)为基准的相对纬向距离; 震源机制解蓝色为正断型地震、红色为逆冲型地震、黑色为走滑型地震, 浅蓝色倒三角为该剖面实皆断裂的位置; 所用的震源机制来自哈佛大学提供的 1976 年以来 5.5 级以上地震的矩心矩张量解(gCMT 目录)

本文主要介绍了一种基于地震参数来分析板块间相互接触的三维几何产状的方法, 以及在缅甸弧俯冲带的应用情况. 与中国大陆接触的板块边界有印度板块边界、西北太平洋板块边界和菲律宾海板块边界, 本文开展的工作只涉及了俯冲模式相对简单的缅甸弧俯冲带, 而要建立中国大陆与周边板块间的静态作用方式还需开展大量的工作. 另一方面, 本文讨论的仍为板块间的静态作用方式, 至于板块间接触的相互动力作用, 作用力大小和方向以及闭锁线以下的板块作用方式等问题, 还需充分利用震源机制解、地球物理场观测等资料开展进一步的工作.

致谢 感谢刘桂萍研究员给予的有益指导与讨论, 感谢匿名审稿人对本文的修改和建议.

参考文献

1 许志琴, 杨经绥, 嵇少丞, 等. 中国大陆构造及动力学若干问题的认识. 地质学报, 2010, 84: 1–29
2 许志琴, 李廷栋, 杨经绥, 等. 大陆动力学的过去、现在和未来——理论与应用. 岩石学报, 2008, 24: 1433–1444
3 滕吉文, 白武明, 张中杰, 等. 中国大陆动力学研究导向和思考. 地球物理学进展, 2009, 24: 1913–1936, doi: 10.3060/j.issn.1004-2903/06.001
4 滕吉文. 中国地球物理学研究面临的机遇、发展空间和时代的挑战. 地球物理学进展, 2007, 22: 1101–1112
5 张国民, 李献智, 耿鲁明. 印度板块北边界地震活动和中国大陆地震. 地震, 1994, 14: 1–9
6 傅征祥, 姜立新. 中国大陆及邻区大尺度浅源强震空间分布的不均匀性和板块耦合的力学机制. 中国地震, 1997, 13: 1–9
7 刘启元, 吴建春. 论地震数值预报——关于我国地震预报研究发展战略的思考. 地学前缘, 2003, 10(增刊): 217–224
8 Hacker B R, Simon M P, Geoffrey A A, et al. Subduction factory: 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions? J Geophys Res, 2003, 108(B1), doi: 101029/2001JB001129
9 Peacock D C. Scaling of transfer zones in the British Isles. J Struct Geol, 2003, 25: 1561–1567
10 时振梁, 环文林, 武宦英, 等. 我国强震活动和板块构造. 地质科学, 1973, 4: 281–292
11 Shi Z L, Huan W L, Wu H Y, et al. On the intensive seismic activity in China and relation to plate tectonics. Am J Sci, 1975, 275-A: 239–259
12 叶洪, 梁以山, 沈丽琪, 等. 喜马拉雅弧形山系及其邻近地区现代构造应力分析. 地质科学, 1975, 1: 32–49
13 环文林, 汪素云, 时振梁, 等. 青藏高原震源分布与板块运动. 地球物理学报, 1980, 23: 269–280
14 滕吉文, 王绍舟, 姚振兴, 等. 青藏高原及其邻近地区的地球物理场特征与大陆板块构造. 地球物理学报, 1980, 23: 254–268
15 Teng J W, Wei S Y, Sun K Z, et al. The characteristics of the seismic activity in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau of China. Tectonophysics, 1987, 134: 129–144
16 章杰, 臧绍先. 中、缅、印交界地区的地震分布特征及震源机制解的研究. 地震学报, 1986, 8: 240–253
17 臧绍先. 缅甸山弧地区 Benioff 带的形态及其应力状态. 地球物理学报, 1987, 2: 144–158
18 Chatelain J L, Roecker S W, Hatzfeld D, et al. Microearthquake seismicity and fault plane solutions in the HinduKush region and their tectonic implications. J Geophys Res, 1980, 85: 1365–1387
19 宁杰远, 臧绍先. 帕米尔-兴都库什地区地震空间分布特征及应力场特征. 地球物理学报, 1990, 33: 657–669
20 Fan G, Ni J F, Wallace T C. Active tectonics of the Pamirs and Karakorum. J Geophys Res, 1994, 99: 7131–7160
21 孙文斌, 和跃时, 常征, 等. 帕米尔-兴都库什地区板块俯冲及其应力状态. 地震地质, 2009, 31: 207–217
22 孙文斌, 和跃时, 李英波. 日本海区板块与华北地震. 地震学报, 1985, 7: 33–44
23 宁杰远, 臧绍先. 日本海及中国东北地震的深度分布及其应力状态. 地震地质, 1987, 9: 49–61
24 臧绍先, 宁杰远. 西太平洋俯冲带的研究及其动力学意义. 地球物理学报, 1996, 39: 188–202
25 孙文斌, 和跃时. 西太平洋 Benioff 带的形态及其应力状态. 地球物理学报, 2004, 47: 433–440
26 孙文斌, 和跃时. 中国东北地区地震活动特征及其与日本海板块俯冲的关系. 地震地质, 2004, 26: 122–132
27 Lacombe O, Mouthereau F, Angelier J, et al. Structural, geodetic and seismological evidence for tectonic escape in SW Taiwan. Tectonophysics, 2001, 333: 323–345
28 Wu Y M, Chang C H, Zhao L, et al. A comprehensive relocation of earthquakes in Taiwan from 1991 to 2005. Bull Seismol Soc Amer, 2008, 98: 1471–1481
29 吕庆田, 姜枚, 许志琴, 等. 印度板块俯冲仅到特提斯喜马拉雅之下的地震层析证据. 科学通报, 1998, 43: 1308–1311
30 周华伟, Michael A M, 林清良. 西藏及其周围地区地壳、地幔地震层析成像——印度板块大规模俯冲于西藏高原之下的证据. 地学

前缘, 2002, 9: 285–292
31 Tilmann F, Ni J, INDEPTH Seismic Team. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet. Science, 2003, 300: 1424–1427
32 薛光琦, 宿和平, 钱辉, 等. 地震层析对印度板块向北俯冲的认识. 地质学报, 2006, 80: 1156–1160
33 郑洪伟, 李廷栋, 高锐, 等. 印度板块岩石圈地幔向北俯冲到羌塘块体之下的远震 P 波层析成像证据. 地球物理学报, 2007, 50: 1418–1426
34 Oreshin S, Kiselev S, Vinnik L, et al. Crust and mantle beneath western Himalaya, Ladakh and western Tibet from integrated seismic data. Earth Planet Sci Lett, 2008, 271: 75–87
35 Negredo A M, Replumaz A, Villaseñor A, et al. Modeling the evolution of continental subduction processes in the Pamir Hindu Kush region. Earth Planet Sci Lett, 2007, 259: 212–225
36 Li C, Hilst van der R D, Meltzer A S, et al. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan plateau and Burma. Earth Planet Sci Lett, 2008, 274: 157–168
37 Hilst van der R D, Widiyantoro S, Engdahl E R. Evidence for deep mantle circulation from global tomography. Nature, 1997, 386: 578–584
38 Huang J, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J Geophys Res, 2006, 111: B09305, doi: 10.1029/2005JB004066
39 Zhao D P. Seismic images under 60 hotspots: Search for mantle plumes. Gondwana Res, 2007, 12: 335–355
40 Miller M S, Kennett B L N. Evolution of mantle structure beneath the northwest Pacific evidence from seismic tomography and paleogeographic reconstructions. Tectonics, 2006, 25: TC4002, doi: 10.1029/2005TC001909
41 Kim K H, Chiu J M, Pujol J, et al. Three-dimensional V_P and V_S structural models associated with the active subduction and collision tectonics in the Taiwan region. Geophys J Int, 2005, 162: 204–220, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02657.x
42 Lallemand S, Font Y, Bijwaard H, et al. New insights on 3-D plates interaction near Taiwan from tomography and tectonic implications. Tectonophysics, 2001, 335: 229–253
43 王勇, 许厚泽. 青藏高原印度板块向欧亚大陆俯冲速率的研究——GPS 观测资料的反演结果. 地球物理学报, 2003, 46: 185–190
44 Sahu V K, Gahalaut V K, Rajput S, et al. Crustal deformation in the Indo-Burmese arc region: Implications from the Myanmar and Southeast Asia GPS measurements. Curr Sci, 2006, 90: 1688–1693
45 赵文津, Nelson K D. 印度板块俯冲到藏南之下的深反射证据. 地球学报, 1996, 17: 131–137
46 Zhao W, Nelson K D, The Project INDEPTH Team. Deep seismic-reflection evidence for continental underthrusting beneath Southern Tibet. Nature, 1993, 366: 557–559
47 Kosarev G, Kind R, Sobolev S V, et al. Seismic evidence for a detached Indian lithospheric mantle beneath Tibet. Science, 1999, 283: 1306–1309
48 Olsen K B, Stephenson W J, Geisselmeyer A. 3D crustal structure and long-period ground motions from a *M*9.0 megathrust earthquake in the Pacific Northwest region. J Seismol, 2008, 12: 145–159, doi: 10.1007/s10950-007-9082-y
49 臧绍先, 宋惠珍, 宁杰远. 日本海俯冲带的热结构及热源的影响. 地球物理学报, 1993, 36: 164–173
50 Manning C E. The chemistry of subduction-zone fluids. Earth Planet Sci Lett, 2004, 223: 1–16
51 Holt W E, Ni J F, Wallace T C, et al. The active tectonics of the eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions. J Geophys Res, 1991, 96: 14595–14632
52 张进江, 季建清, 钟大赉, 等. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33: 373–383
53 Santo T. On the characteristic seismicity in south Asia from Hindukush to Burma. Bull Inter Inst Seism Earth Eng, 1969, 6: 81–93
54 Fitch T J. Earthquake mechanisms in the Himalayan, Burmese, and Andaman regions and continental tectonics in Central Asia. J Geophys Res, 1970, 75: 2699–2709
55 Chandra U. Seismicity, earthquake mechanisms and tectonics of Burma, 20°–28°N. Geophys J Roy Astrono Soc, 1975, 40: 367–381
56 Chandra U. Seismicity, earthquake mechanisms and tectonics along the Himalayan mountain range and vicinity. Phys Earth Planet Inter, 1978, 16: 109–131
57 Verma R K, Mukhopadhyay M, Ahluwalia M S. Seismicity, gravity and tectonics of northeast India and northern Burma. Bull Seism Soc Amer, 1976, 66: 1683–1694
58 Verma R K, Mukhopadhyay M, Nag A K. Seismicity and tectonics in south China and Burma. Tectonophysics, 1980, 64: 85–96
59 刘建中. 缅甸弧的俯冲作用及川滇断块的地震地质特征. 中国地震, 1992, 8: 68–75
60 Steckler M S, Akhter S H, Seeber L. Collision of the Ganges-Brahmaputra Delta with the Burma Arc: Implications for earthquake hazard. Earth Planet Sci Lett, 2008, 273: 367–378

61 Khan P K. Variation in dip-angle of the Indian plate subducting beneath the Burma plate and its tectonic implications. Geosciences J, 2005, 9: 227–234
62 Rangin C, Spakman W, Pubellier M, et al. Tomographic and geological constraints on subduction along the eastern Sundaland continental margin (South-East Asia). Bull Geol Soc France, 1999, 170: 775–788
63 胡家富, 胡毅力, 夏静瑜, 等. 缅甸弧及邻区的壳幔 S 波速度结构与动力学过程. 地球物理学报, 2008, 51: 140–148
64 李鸿吉, 秦建业. 缅甸弧及其周围地区的震源机制和现代应力场. 地震学报, 1994, 16: 463–471
65 Angelier J, Baruah S. Seismotectonics in Northeast India: A stress analysis of focal mechanism solutions of earthquakes and its kinematic implications. Geophys J Int 2009, 178: 303–326, doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04107.x
66 Engdahl E R, Hilst van der R D, Buland R. Global teleseismic earthquake relocationwith improved travel times and procedures for depth determination. Bull Seism Soc Am, 1998, 88: 722–743
67 Engdahl E R, Villasefior A. Global Seismicity: 1900–1999. In: Lee W H K, Kanamori H, Jennings P C, eds. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology. San Diego: Academic Press, 2002. 665–690
68 Hayes G P, Wald D J. Developing framework to constrain the geometry of the seismic rupture plane on subduction interfaces a priori—A probabilistic approach. Geophys J Int, 2009, 176: 951–964, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.04035.x
69 Hayes G P, Wald D J, Keranen K. Advancing techniques to constrain the geometry of the seismic rupture plane on the subduction interfaces a priori: Higher-order functional fits. Geochem Geophys Geosyst, 2010, 10, doi: 10.1029/2009GC002633
70 Hayes G P, Wald D J, Johnson R L. Slab1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries. J Geophys Res, 2012, 117: B01302, doi: 10.1029/2011JB008524
71 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(增刊): 12–20
72 Wells D L, Coppersmith K L. New empirical relationships among magnitude, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull Seism Soc Am, 1994, 84: 974–1002
73 Bilham R, Gaur V K, Molnar P. Himalayan seismic harzard. Science, 2001, 293: 1442–1444
74 Bird P. An updated digital model of plate boundaries. Geochem Geophys Geosyst, 2003, 4: 1027, doi: 10.1029/2001GC00252
75 虢顺民, 向宏发, 徐锡伟, 等. 滇西南龙陵-澜沧第四纪新生断裂带特征和形成机制研究. 地震地质, 2000, 22: 277–284
76 Meade B J. Present-day kinematics at the India-Asia collision zone. Geology, 2007, 35: 81–84, doi: 10.1130/G22924A.1
77 Liu Z, Bird P. Kinematic modeling of neotectonics in the Persia-Tibet-Burma orogen. Geophys J Int, 2008, 172: 779–797
78 Copley A, McKenzie D. Models of crustal flow in the India-Asia collision zone. Geophys J Int, 2007, 169: 683–698
79 Copley A. Kinematics and dynamics of the southeastern margin of the Tibetan Plateau. Geophys J Int, 2008, 174: 1081–1100
80 Maurin T, Rangin C. Structure and kinematics of the Indo-Burmese Wedge: Recent and fast growth of the outer wedge. Tectonics, 2009, 28: TC2010, doi: 10.1029/2008TC002276