

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

王 勇 许厚泽

中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077

摘 要 利用近年来中外几个研究单位在青藏高原的 GPS 观测结果, 根据印度板块向欧亚大陆俯冲模型, 采用二层弹性自重半空间内断层运动的位错模型, 对印度板块向欧亚大陆俯冲的速率进行了反演, 给出了在大地测量观测结果约束下的现今印度板块向欧亚大陆俯冲的速率. 反演结果表明, 现今印度板块约以 8.1° 的倾角, 21.8 mm/a 的速率向欧亚大陆俯冲. 本文结果与从地质推断的在过去 2~3Ma 时期内, 印度板块向欧亚大陆俯冲速率平均为 18mm/a, 有较好的一致性, 表明在较长时间内, 印度板块向欧亚大陆俯冲的速率仍然是稳定的.

关键词 板块俯冲 GPS 弹性位错 大地测量反演 青藏高原

文章编号 0001-5733(2003)02-0185-06 中图分类号 P542 收稿日期 2001-10-27, 2002-10-28 收修定稿

A STUDY ON CONVERGENCE RATE OF THE INDIA PLATE TO EURASIA SUBDUCTION BENEATH QINGHAI-XIZANG PLATEAU ——INVERSION RESULTS FROM GPS OBSERVATIONAL DATA

WANG YONG XU HOUZE

Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract The Convergence rate of the India plate to Eurasia subduction beneath Qinghai-Xizang Plateau is inversed on the basis of the GPS data observed by Chinese and abroad Institutes using the model of the India plate to Eurasia subduction and dislocation in two layered self-gravitational elastic half space. Present convergence rate of the India plate is obtained under the geodetic data constrains. The results show that the present convergence rate of the India plate is 21.8 mm/a with a dipping 8.1° to the north. This is in good agreement with various geologic predictions of 18mm/a in past 2~3 million year implying a stable convergence rate of the India plate in a very long duration.

Key words Plate subduction, GPS, Elastic dislocation, Geodetic inversion Qinghai-Xizang Plateau.

1 引 言

近十年来, GPS 相对测量精度已能达到 10^{-9} , 因此可以通过高精度大地测量手段检测地球的动力学过程, 包括从板块到特定的断层上精确测定其现代运动速率. 近年来多项大地测量观测计划相继在青藏高原实施, 如在青藏高原进行的多项 GPS 监测计划^[1-5], 建立了多个 GPS 区域监测网, 并进行了多期

的 GPS 重复观测. 使青藏高原大地测量观测资料质量大为提高, 为进一步研究高原深部结构和动力学演化过程提供了重要的基础观测资料. 大地测量数据本身反映了高原构造运动的特征, 尤其是贯穿青藏高原、跨断层、跨构造块体的大地测量网的建立和连续观测, 提供高原整体和各块体间相互运动的基本特征; 地表的大地测量数据又为研究高原深部结构和动力学过程提供了重要的定量数值边界条件.

目前, 对于青藏高原构造演化的一些基本问题

基金项目 中国科学院知识创新项目 (KZCX2-106)、国家自然科学基金资助项目 (40274020).

作者简介 王 勇, 男, 研究员, 1964 年生, 1985 年毕业于武汉测绘科技大学, 1995 年获博士学位, 主要从事地球重力场和绝对重力观测及大地测量资料的反演等研究工作. E-mail: ywang@asch.whigg.ac.cn

存在许多争议,如印度板块对欧亚大陆的碰撞及持续的北向漂移是否由于青藏高原内部各块体地壳增厚和南北向缩短所吸收?青藏高原的走滑断层和物质侧向流动与高原地壳缩短、增厚相比,哪个过程占主导地位?等等,对这些问题的回答需要来自地球科学各领域的研究成果和证据.地质和地震学的研究表明,在喜马拉雅地区存在着巨大的冲断层带,在这里印度板块向欧亚大陆俯冲.了解现今印度板块向欧亚大陆俯冲的速率,不但对于认识青藏高原形变场特征.现今地壳运动及动力学机制具有重要意义,而且也有助于上述许多争议问题的解决.因此,许多学者通过对地质、地震资料的分析,研究了印度板块对欧亚大陆碰撞与俯冲的问题^[5~10]. Bilham^[5]、Jackson等^[11,12]利用沿尼泊尔喜马拉雅弧两侧的GPS和水准测量观测结果分析了印度板块与欧亚大陆的会聚和俯冲速率.随着近年来青藏高原GPS观测资料的积累,尤其是喜马拉雅弧北侧GPS观测资料的大量增加,利用GPS观测资料作约束,更加精确地反演青藏高原印度板块向欧亚大陆俯冲速率成为可能.

2 GPS 观测结果

近年来在青藏地区开展的一系列重要的GPS观测计划,主要包括:(1)国际GPS服务网站(IGS).这是全球48个核心站组成的连续GPS观测网,分布在世界各地.其中在青藏高原及其邻近地区的有拉萨、班加罗(印度)、吉塔布(乌兹别克斯坦)、伊尔库茨克(俄罗斯)等,这些站的数据提供了青藏高原构造运动的全球地壳运动构造框架.(2)国家攀登计划“中国地壳运动及动力学观测与研究”,先后在

1992、1994和1996年进行了3次共23个点的GPS测量,这些联测点包括了青藏地区的拉萨、温泉、格尔木3个站,并有3期观测资料.为了在处理中维持一个自洽的地球参考架,选取了国际地球参考架ITRF的GPS站作为基准站与联测资料一并用GAMIT软件处理.(3)青海—西藏区域网.1993~1997年武汉测绘科技大学在青藏地区布设了GPS监测网,该网北至格尔木,南至聂拉木,沿青藏公路布成锁网状,由14点组成,全网长约1470km,宽约60km,贯穿青藏高原各个块体,利用Turbo Rogue接收机施测,GAMIT软件处理.其中,1995和1997年数据采用了IGS星历,并在统一的ITRF97坐标框架下进行了整体平差和位移参数解算.(4)跨喜马拉雅弧的尼泊尔及西藏南部网.1991~1997年,由中、美、尼等国合作,在尼泊尔及西藏南部沿喜马拉雅弧两侧进行了24个点的重复测量,同时还包含了一些区域外围的IGS.其中1991年首次观测质量较差,定位精度为10~15mm,1995及1997年的成果因卫星定轨精度及接收机质量改善,平均定位精度提高到5~6mm,观测结果用美国JPL研制的GIPSY软件处理并归化到统一历元的全球参考基准ITRF系统上.(5)西藏南部网.1992及1996年中国科学院测量与地球物理研究所西藏南部横跨雅鲁藏布江缝合带布设了连接喜马拉雅和冈底斯(拉萨)地块的GPS监测网,获得了6个点两期的观测数据,利用GAMIT软件及精密星历进行估算并归算至ITRF参考基准.

对上述部分观测结果统一归算到相对于欧亚板块的运动速率,图1是用GPS观测的青藏高原各点相对于欧亚板块的运动速率^[1~5],以及地质推断的青藏高原及邻区块体运动和断裂滑动速率^[6~10].为

表1 青藏高原GPS观测结果一致性的比较

Table 1 The comparison of GPS observational result consistency in Tibetan Plateau

点名	纬度		经度		相对于欧亚板块速率		结果来源 (文献号)
	(°)	(')	(°)	(')	东向(mm/a)	北向(mm/a)	
拉萨	29	39	91	06	19.3 ±2.8	23.2 ±2.5	[5]
	29	39	91	06	21.5 ±1.2	20.7 ±1.0	[2]
	29	39	91	06	21.5 ±0.9	24.7 ±0.3	[1]
温泉	33	06	91	53	27.7 ±6.4	16.4 ±3.5	[4]
	33	03	91	52	23.8 ±2.4	17.1 ±1.8	[1]
格尔木	36	26	94	52	15.8 ±8.4	12.3 ±4.5	[2]
	36	15	94	52	11.9 ±2.2	14.2 ±1.5	[1]
江孜	28	55	89	36	19.1 ±4.5	26.7 ±2.5	[2]
					17.4 ±1.8	28.2 ±1.7	[4]
聂拉木	28	18	86	01	16.9 ±5.4	30.0 ±3.1	[2]
					14.5 ±2.3	44.3 ±2.0	[4]

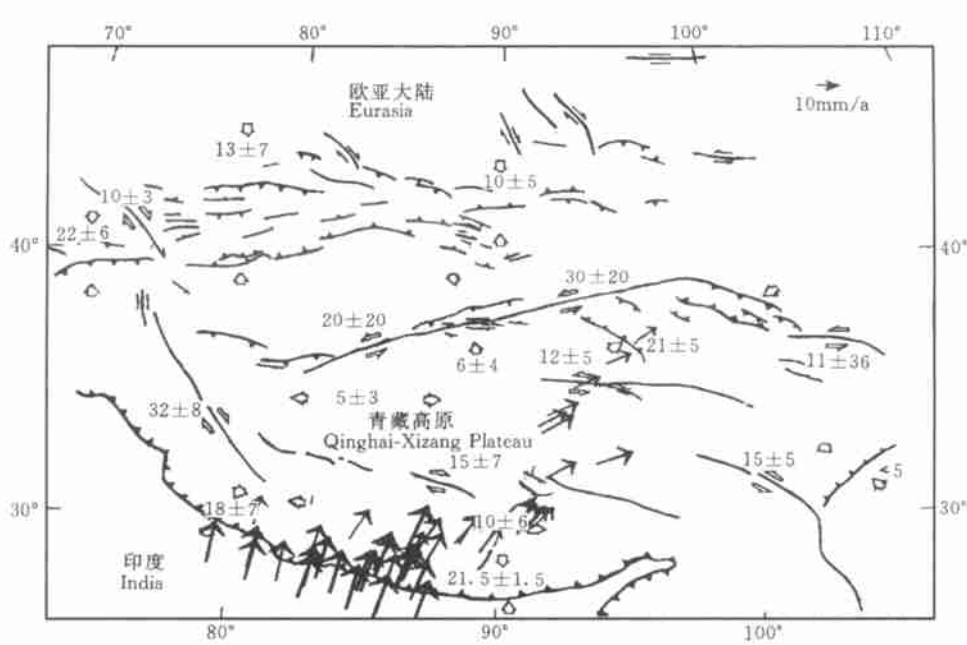


图 1 青藏高原 GPS 观测点相对于欧亚板块的运动矢量

空心箭头为地质推断的块体运动和断裂滑动速率^[6-10],实箭头为 GPS 观测的运动速率^[1-5]
 Fig.1 The movement vectors of GPS observational points in Qinghai-Xizang Plateau relative to Eurasia plate . Open arrow show the velocity of plate and fault determined from a variety of geologic data^[6-10] , solid arrow show the movement velocity determined from GPS observation^[1-5]

了验证各不同观测组所得结果的一致性,对不同观测组在一些相同或相近点上获得的 GPS 观测结果进行了比较,列于表 1. 由表 1 结果可见,尽管各观测组所用仪器设备、处理软件与方法均有不同,但所得结果的一致性还是相当令人满意的. 因此,图 1 所示的 49 个点的 GPS 观测结果为反演印度板块向欧亚大陆俯冲的速率提供约束条件.

3 反演模型与方法

图 2 所示的是由地震反射剖面 INDEPTH 给出

的一个印度板块向欧亚大陆俯冲的模型^[13],本文将利用图 1 所示的 GPS 观测结果做约束,反演图 2 所示模型的俯冲速率. 通常反演图 2 所示的断层面的滑移速率可采用均匀半空间的位错模型^[12],然而,对于印度板块向欧亚大陆俯冲这样如此巨大的断层模型,并且印度板块可能俯冲到欧亚大陆较深的地方,在计算板块俯冲引起的形变场时,应尽可能考虑地球分层和自重的影响. 因此,本文采用了图 3 所示的一个二层(弹性层+均匀半空间)自重半空间内断层滑动的位错模型. 该模型需要在一定的边界条件下解算以下的平衡方程^[14]

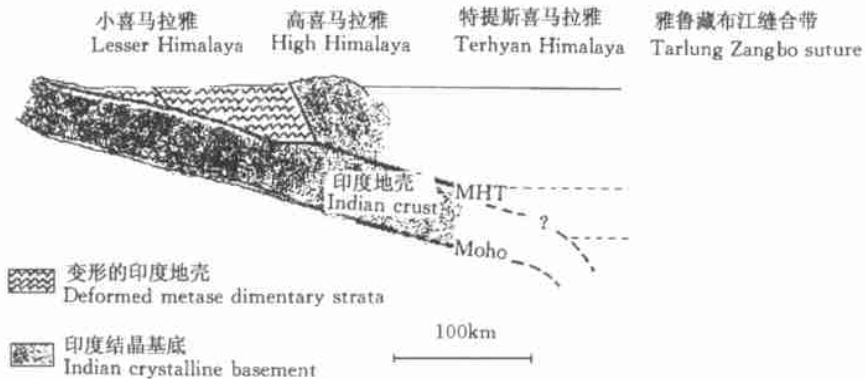


图 2 印度板块向欧亚大陆俯冲的一种模型^[13]

Fig.2 A model of India to Eurasia subduction^[13]

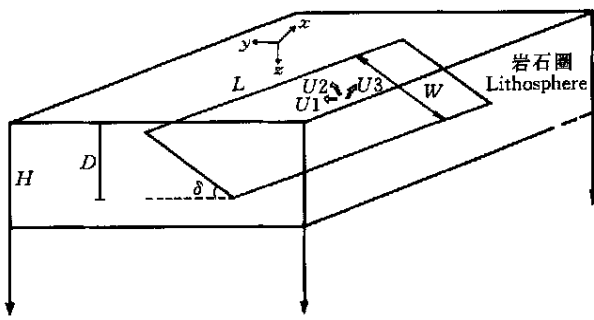


图 3 二层弹性自重半空间位错模型

Fig. 3 Dislocation model of two layered self-gravitational elastic half space

$$\nabla^2 u + \frac{1}{1-2\nu} \nabla(\nabla \cdot u) + \frac{g}{\mu} \nabla(\nabla \cdot e_z) \quad (1)$$

$$-\frac{1}{\mu} \nabla \phi - \frac{g}{\mu} \nabla(\nabla \cdot e_z) \cdot u = 0, \quad \nabla^2 \phi = -4\pi G \rho \cdot u, \quad (2)$$

式中, u 是在柱坐标 (r, θ, z) 下地球表面的扰动位移, ϕ 是扰动重力位, e_z 是 z 方向的单位矢量, G 是引力常数, ρ, ν, μ 分别是密度、泊松比和剪切模量, g 是地球表面平均重力加速度. 对方程(1)和(2)的求解需采用数值解. 在本研究中采用了传播矩阵的方法, 具体解算方法见文献[15, 16].

当给定待反演的 j 个断裂几何和断层面滑动参数 m_j 的初始值时, 由(1)和(2)式可计算出第 i 个点相对于某一个参考点 (x_0, y_0) 的位移变化, 即

$$S_i(m_j) = \sqrt{(u_{y_i} - u_{y_0})^2 + (u_{x_i} - u_{x_0})^2} = \sqrt{u_{y_i}^2 + u_{x_i}^2}, \quad (3)$$

反演计算的目标函数为

$$f(m_j) = \sqrt{\sum_i (u_{y_i} - u_{y_i}^0)^2 + (u_{x_i} - u_{x_i}^0)^2} / (N - j), \quad (4)$$

上式中, $u_{y_i}^0, u_{x_i}^0$ 为 GPS 观测的位移变化, N 为观测点数. 如果根据先验信息知道待反演参数 m_j 的上下界, 可对参数 m_j 作以下约束

$$a_j \leq m_j \leq b_j, \quad (5)$$

本文反演问题便可归结于在约束条件(5)下, 求解使目标函数(4)达到最小的最优化参数 m_j .

4 结果与讨论

对于图 3 所示的位错模型, 一般需要反演 10 个参数, 即断裂长度 L 、宽度 W 、深度 D 、倾角 δ 、走向

、断裂面的滑动速率 U_1, U_2, U_3 , 以及断裂中心位置 ϕ_0, ϕ_0 . 本文不考虑张性位错 U_3 , 仅反演其他 9 个参数. 用非线性优化算法——模拟退火算法^[17], 在目标函数(4)和约束条件(5)下求解最优化参数.

为了提高二层弹性自重半空间内三维断层位错模型的反演计算速度和收敛速度, 首先利用 Okada^[18] 给出的均匀半无限空间位错模型引起的形变场的解析计算公式计算(3)式的位移变化矢量, 进行反演计算, 然后将均匀半无限空间的位错模型反演结果作为二层弹性自重半空间位错模型反演计算的初始值. 实际上, 均匀半无限空间的位错模型引起的形变场的解可视为是二层弹性自重半空间内断层位错模型解的一级近似. 计算中二层弹性自重半空间断层模型的介质参数为: 第一层的深度 H 为 90km, Lamé 参数 λ_1, μ_1 均为 $3.0 \times 10^{11} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 密度 ρ_1 为 $3.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 第二层均匀半空间的 Lamé 参数 λ_2, μ_2 均为 $3.5 \times 10^{11} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 密度 ρ_2 为 $3.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

考虑到图 1 中的远离碰撞与俯冲带的各点 GPS 观测的速度矢量, 可能不是主要受到印度板块向欧亚大陆的碰撞与俯冲的影响, 而是受到高原内部一些大的走滑断裂, 如昆仑、阿尔金走滑断层的影响. 因此, 首先通过正演计算确定印度板块向欧亚大陆的碰撞与俯冲引起的高原形变场在目前的大地测量观测精度下可以检测的范围, 以便从图 1 所示的 GPS 观测点中选取适当区域的站点的资料, 使得计算时具有较多观测点作约束, 同时考虑作约束的观测站尽量靠近俯冲地带. 根据地震反射剖面 INDEPTH 的结果^[13], 以及地质推断喜马拉雅弧形构造带上以 $18 \pm 7 \text{ mm/a}$ 速率缩短^[6, 7], 正演计算选取以下的极限参数, 即断裂长度 $L = 1500 \text{ km}$, 宽度 $W = 500 \text{ km}$, 深度 $D = 50 \text{ km}$, 滑动速率 $U_2 = 30 \text{ mm/a}$. 图 4 是正演计算的高原各点位移矢量分布. 从图 4 的结果可以看出, 在纬度 32° 以北的地区, 印度板块向欧亚大陆的俯冲引起的形变场小于 2 mm/a . 因此, 选取纬度 32° 以南的 42 个 GPS 观测点资料作为约束.

在实际反演计算中, 考虑到反演的稳定性, 在计算目标函数时, 选取加德满都的一个观测点作为局部相对参考固定点来计算(3)式中的 $S_i(m_j)$. 表 2 给出了反演所用的初始参数, 以及用均匀弹性半空间位错模型, 两层弹性自重半空间位错模型的反演结果, Larson 等^[12] 用均匀半空间位错模型的反演结果也示于表 2. 图 5 和图 6 分别给出了根据表 2 的

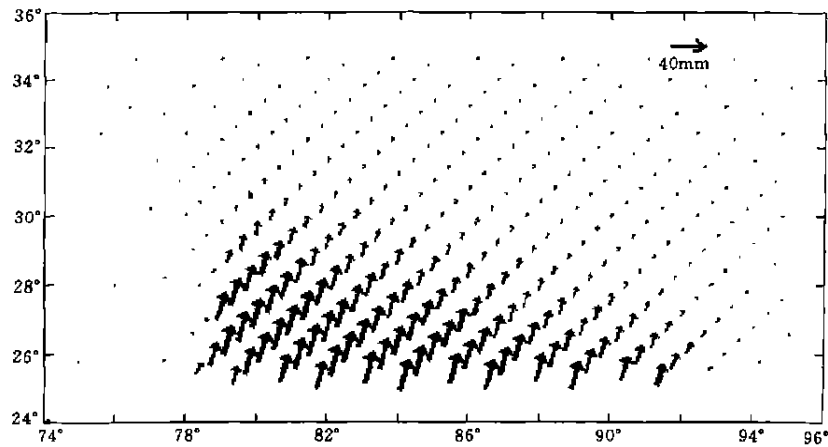


图 4 正演模拟计算的印度板块向欧亚大陆俯冲引起的青藏高原位移矢量分布
 Fig. 4 The displacement vector of modeling computation in Qinghai-Xizang Plateau due to the India to Eurasia subduction

表 2 反演所用参数和结果

Table 2 The parameters and results of inversion

断层参数	L	W	D	θ	ϕ	U_1	U_2	α	ϕ_0	f
	(km)	(km)	(km)	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	(mm/a)	(mm/a)	($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	(mm)
初始值	1400	400	25	10	105N	10	- 10	86	28	
下 界	1300	300	10	- 180	- 180	- 30	- 30	85	27	
上 界	1500	500	80	180	180	30	30	87	29	
结果(1)	1452	485	20.5	8.5	104.3N	3.87	- 20.2	86.2	27.7	6.36
结果(2)	1496	492	19.8	8.1	106.5N	3.53	- 21.8	85.9	27.9	4.24
结果(3)			22.0	9.7	104.4N	3.50	- 20.1			

结果(1) 本文用均匀弹性半空间模型得到的反演结果, 结果(2) 两层弹性自重半空间模型反演结果, 结果(3) 文献[12]的反演结果.

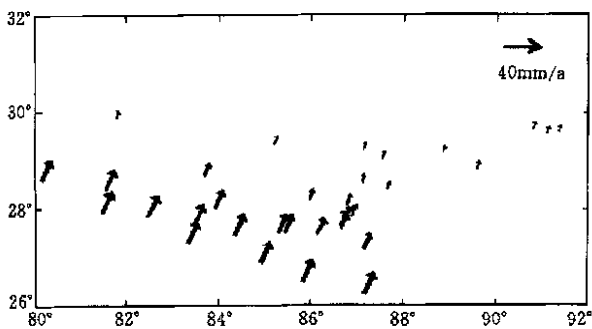


图 5 根据反演结果计算的印度板块向欧亚大陆俯冲引起的青藏高原位移矢量分布

Fig. 5 The displacement vector computed of Tibet Plateau due to the subduction of India to Eurasia plat from the inversed model parameters

反演结果计算的 GPS 各观测点的水平位移矢量分布及与 GPS 各点实测的位移矢量的残差量大小分布示意图.

从表 2 结果可以看到, 用均匀半空间模型的反

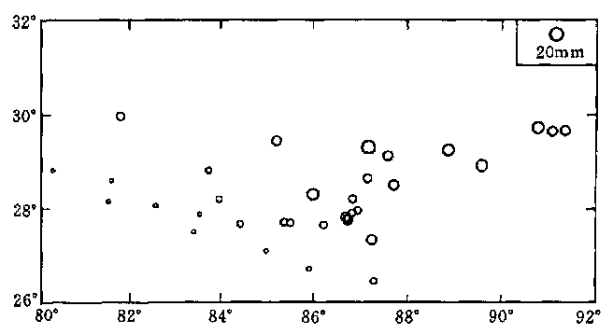


图 6 计算的位移矢量与 GPS 观测结果的残差

Fig. 6 The residual distribution of the computed displacements with GPS observational results

演结果与 Larson 等^[12]的结果是一致的, 从目标函数 f 的数值, 二层弹性自重半空间位错模型反演结果对均匀半空间位错模型的反演结果有所改善. 从图 5 可以看到, 根据反演结果计算的 GPS 各观测点的位移矢量分布和 GPS 各点实测的位移矢量分布(图 1)是非常一致的, 从残差(图 6)的大小和分布来看,

大部分残差小于 10mm,表明反演结果令人满意,离碰撞和俯冲带较远地区点的残差较大。

表 2 结果给出的本文反演得到的印度板块向欧亚大陆俯冲的倾角为 8.1° ,走向 106.5° ,这个结果与 INDEPTH^[13]的结果较一致。反演得到的印度板块向欧亚大陆俯冲速率是 21.8mm/a 。这个结果比从地质和地震学所推断的 18mm/a ^[6,7]的汇聚速率略大,但也比较接近。这意味着在较长时间内,印度板块向欧亚大陆俯冲的速率仍然是很稳定的。需要指出的是,本文反演得到的断层深度仅为 19.8km ,比从地震学研究得到的结果^[18,19]要小。按照反演得到的断层的宽度和俯冲倾角计算,断层深度大约为 70km 。我们也曾试图将断层深度限定在 $60\sim 80\text{km}$ 的范围内,但反演计算未能得到相应合理的滑动速率等参数。一种可能是由于大陆中下地壳内具有明显的塑性,而在青藏高原的南部地壳的弹-塑性转换深度可能是在约 20km 左右, 20km 以下的属于一种非弹性变形,目前的弹性模型并不能很好的模拟 20km 以下的非弹性变形。另一种可能是由于中下地壳内的断裂滑动被锁或滑动量很小^[12],因此对表面形变影响较小,有关该问题还有待进一步的探讨和研究。

参考文献

- [1] 朱文耀,程宗颐,熊永清等. 利用 GPS 监测青藏高原地壳运动的初步结果. 中国科学, D 辑, 1997, 27(5): 385 ~ 389
ZHU Wenyao, CHENG Zongyi, XIONG Yongqing, et al. Preliminary results in the monitoring of earth crust motion in Qinghai-Xizang Plateau using GPS technology. *Science in China*, D, 1997, 27(5): 385 ~ 389
- [2] LIU Jingnan, XU Caijun, SUN Chenghua, et al. Using repeated precise GPS campaigns for research of present-day crustal movement and strain in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 48(8): 694 ~ 698
- [3] 王琪,游新兆,王文颖等. 跨喜马拉雅的 GPS 观测与现代地壳运动. 地壳形变与地震, 1998, 18(3): 43 ~ 50
WANG Qi, YOU Xinzha, WANG Wenyong, et al. GPS measurement and current crustal movement across the Himalaya. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1998, 18(3): 43 ~ 50
- [4] 张赤军,许大欣. 高喜马拉雅中段近期的地壳运动. 地壳形变与地震, 1998, 18(2): 36 ~ 42
ZHANG Chijun, XU Daxin. Recent crust movement in middle section of the high Himalaya. *Crustal Deformation and Earthquake* (in Chinese), 1998, 18(2): 36 ~ 42
- [5] Bilham R, Larson K, Freymueller J, et al. GPS measurements of present day convergence rates in the Nepal Himalaya. *Nature*, 1997, 336: 61 ~ 64
- [6] Aarnijo R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 1986, 91: 13803 ~ 13872
- [7] Molnar P, Deng Q. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in central and eastern Asia. *J. Geophys. Res.*, 1984, 89: 6203 ~ 6228
- [8] Molnar P, Lyoncaen H. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins. *Geophys. J. Int.*, 1989, 99: 123 ~ 153
- [9] Molnar P, Burchfiel B C, Kuangyi L, et al. Geomorphic evidence for active faulting in the Altyn Tagh and northern Tibet and qualitative estimates of its contribution to the convergence of India and Eurasia. *Geology*, 1987, 15: 249 ~ 253
- [10] England P C, Molnar P. The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip on faults. *Geophys. J. Int.*, 1997, 130: 551 ~ 582
- [11] Jackson M, Bilham R. Constraints on Himalayan deformation inferred from vertical velocity fields in Nepal and Tibet. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 13897 ~ 13912
- [12] Larson K, Burgmann R, Bilham R, et al. Kinematics of the India-Eurasia collision zone from GPS measurements. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104: 1077 ~ 1093
- [13] Zhao W, Nelson K D, INDEPTH Project Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 1993, 366: 557 ~ 559
- [14] Rundle J B. Static elastic-gravitational deformation of a layered half-space by point couple sources. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 5355 ~ 5363
- [15] Wang Yong. Theoretical modeling of local gravity changes and deformation caused by dilatancy with magma intrusion. In: Segawa Y et al. eds. *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1997, 289 ~ 296
- [16] Wang Yong, Xu Houze. Surface deformation and gravity changes caused by dilatancy in a layered elastic-viscoelastic half space. *Acta Seismologica Sinica*, 1997, 19(4): 501 ~ 506
- [17] 邢文训,谢金星. 现代优化计算方法. 北京: 清华大学出版社, 1999. 90 ~ 129
XING Wenxun, XIE Jinxing. *Modern Optimization Algorithm*. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 90 ~ 129
- [18] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space. *Bull. Seism. Soc. America*, 1985, 75(4): 1135 ~ 1154
- [19] 曾融生,丁志峰,吴庆举等. 喜马拉雅及南藏的地壳俯冲带—地震学证据. 地球物理学报, 2000, 43(6): 780 ~ 797
ZENG Rongsheng, DING Zhifeng, WU Qingju, et al. Seismological evidences for the multiple incomplete crustal subductions in Himalaya and southern Tibet. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(6): 780 ~ 797