

# 论珠穆朗玛峰地区地壳运动\*

陈俊勇<sup>①</sup> 王泽民<sup>②</sup> 庞尚益<sup>①</sup> 张 骥<sup>①</sup> 张全德<sup>①\*\*</sup>

(<sup>①</sup>国家测绘局, 北京 100830; <sup>②</sup>武汉测绘科技大学, 武汉 430079)

**摘要** 珠穆朗玛峰位于欧亚板块和印度板块边缘的碰撞地带, 地壳运动活跃, 30 余年来, 共进行 35 次大规模的大地测量. 根据这些大地测量成果对该地区的地壳运动进行了研究和探讨, 认为珠峰地区地壳垂直运动在时间和空间上都可能存在非平稳性, 并发现在时间上的非平稳性与地震学家提出的地震活跃幕似有一定相关性; 在空间上的非平稳性可能和地壳介质的非均匀性及地应力的非均匀吸收有关; 珠峰地区的地壳水平运动以每年 6 ~ 7 cm 速度向北东东方向运动, 印度板块和青藏块体在碰撞边缘呈现明显的走滑运动趋势.

**关键词** 珠穆朗玛峰 地壳运动 地球动力学

珠穆朗玛峰(以下简称珠峰)为世界第一高峰, 位于中国和尼泊尔边境, 也处于欧亚板块和印度板块边缘的碰撞挤压带, 因此珠峰及其北坡毗邻地区(以下简称珠峰地区)的地壳运动至今仍然非常活跃. 作为青藏高原地学研究的一部分, 近 30 余年来我国曾单独或与国外合作分别在 1966, 1975, 1992, 1998, 1999 年, 在这两大板块的碰撞边缘地区进行了 5 次大规模的大地测量和相应的研究工作, 其中包括天文、重力、平面、高程和大气折射等测量项目, 既采用了常规测量技术, 也从 1992 年起采用了 GPS 测量技术. 根据历次测量成果, 对该地区有关的地壳运动进行了研究<sup>[1~5]</sup>.

## 1 珠峰地区的地面垂直运动

珠峰地区在历次的精密水准测量中, 都是由珠峰北约 70 余 km 处的国家 I 等或 II 等水准点作为起算点, 在 1966 年、1975 年的珠峰高程测量中<sup>[1]</sup>, 由该地区西侧 I 定江 3 点起始的西侧 II 等定绒水准路线(图 1)进入珠峰前沿.

这两期(1966 ~ 1975 年)定绒线上的高程变化参见表 1 和图 2, 而在 1992 年、1998 年施测中, 由于西侧定绒水准路线的道路已毁, 因而改道由该地区东侧 II 萨拉 58 点开始的 II 等邦绒水准路线(图 3)进入珠峰前沿. 邦绒线重合水准点高程变化参见表 2 和图 4. 水准测量的精度指标均按国家 II 等精密水准规范执行<sup>[6]</sup>.

表 1, 2 和图 2, 4 表示了在珠峰以北 70 km 范围内进行的多期精密水准测量成果, 反映出珠峰地区的地面相对垂直运动呈波浪式起伏, 这意味着珠峰地区在印度板块的推土机式推动下, 在整体抬升的过程中伴有波浪式的起伏, 这些起伏的量级与推力的大小可能和地壳的物

2000-07-18 收稿, 2000-10-06 收修改稿

\* 国家测绘局测绘科技基金(编号: C95-04)和国家科委攀登项目(批准号: 97231003)资助课题

\*\* 参加此项研究课题的还有宋眩、许才军、刘志良、程传禄等

理性质密切相关.

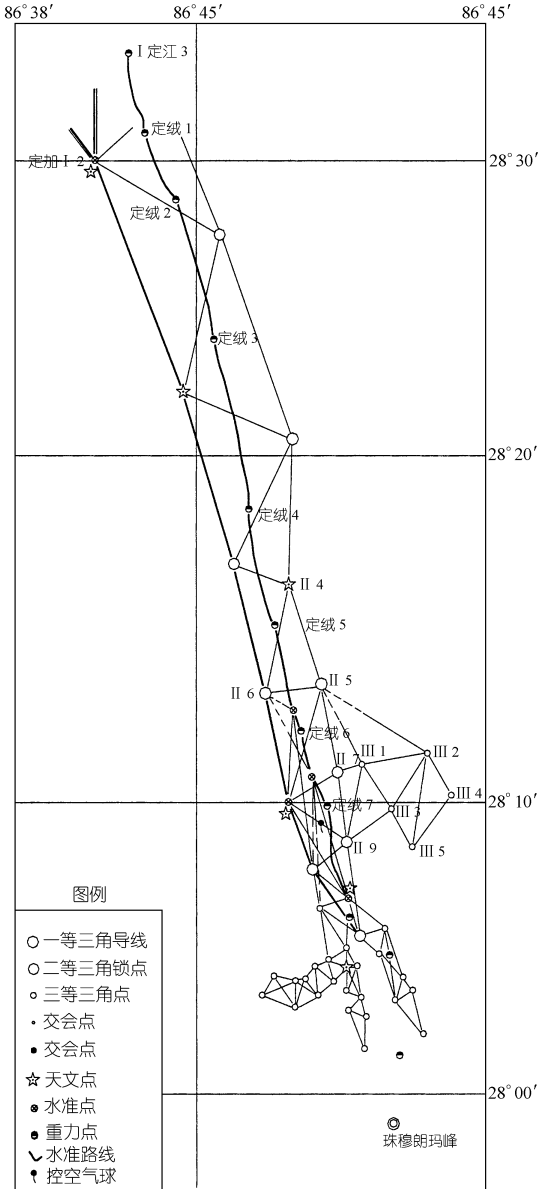


图 1 1966 年珠峰地区大地测量施测图

表 1 珠峰地区定绒线水准点的高程变化<sup>a)</sup>  
(1975~1966)

点名	高程变化值/mm	位于珠峰北/km
I 定江 3	0	68
定绒 1	0	64
定绒 2	13	60
定绒 3	24	46
定绒 4	30	38
定绒 5	15	32
定绒 6	31	26
定绒 7	29	22
定绒 8	9	20
定绒 9	8	18

a) 黄海 56 高程系统. 表中高程变化均相对 I 定江 3 点而言

表 2 珠峰地区帮绒线水准点的高程变化<sup>a)</sup>  
(1998~1992)

点名	高程变化值/mm	位于珠峰北/km
II 萨拉 58	0	67
II 邦绒 01	-1	64
II 邦绒 02	-4	61
II 邦绒 03	-3	59
II 邦绒 04	-11	58
II 邦绒 05	-3	56
II 邦绒 011	+7	42
II 邦绒 13	+5	36
II 邦绒 14	+9	35
II 邦绒 15	+15	33
II 邦绒 18	+12	23
IV 支 1	+10	20
珠峰基准点	-2	16
II 支 1	+11	12

a) 黄海 85 高程系统. 表中高程变化值均相对 II 萨拉 58 水准点而言

## 2 珠峰地区的地面垂直运动与地震活跃幕

水准点 II 邦绒 15(参见表 2, 该点即表 1 中的定绒 7)和 IV 支 1 是珠峰地区 1966 年、1975 年、1992 年、1998 年 4 次水准测量重合的仅有的两个点. 它们分别位于珠峰以北 33 和 20 km 处. 它们的高程变化可以比较典型的表征距珠峰北 40 km 以内地区的相对垂直位移及其速率(表 3, 4, 图 5).

表 3 珠峰北 40 km 内地区多次水准测量重合点高程成果比较<sup>a)</sup>

点名	1966 年测	1975 年测	1992 年测	1998 年测	位于珠峰北
II 邦绒 15 (II 定绒 7)	4701.464 m	4701.493 m	4701.570 m	4701.585 m	33 km
IV 支 1	5005.854 m		5005.942 m	5005.952 m	20 km

a) 根据 1985 国家高程基准

表 4 珠峰北 40 km 内水准点垂直运动速率

施测时间间隔	1975~1966	1992~1975	1998~1992
平均年上升率	3.0 mm	4.3 mm	2.2 mm
我国发震状态	地震活跃幕	地震平静幕	地震活跃幕

表 4 中列出了根据水准点 II 邦绒 15、IV 支 1 的多次高程值计算的各时期平均年上升率, 以及和我国地震活跃幕<sup>[7]</sup>的同期对照. 结果显示珠峰地区的上升速率并非均匀恒定, 表明在青藏高原长期的隆升“脉动”性大背景下<sup>[8]</sup>, 短期内也存在有隆升的“脉动”性. 此外, 表 4 中还显示地震活跃期对应于较慢的年上升率, 地震平静期对应较大的年上升率. 其可能的机制为:

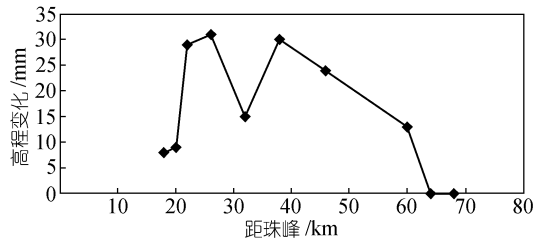


图 2 珠峰北邻近地区的地壳垂直运动图(定绒线 1975~1966)

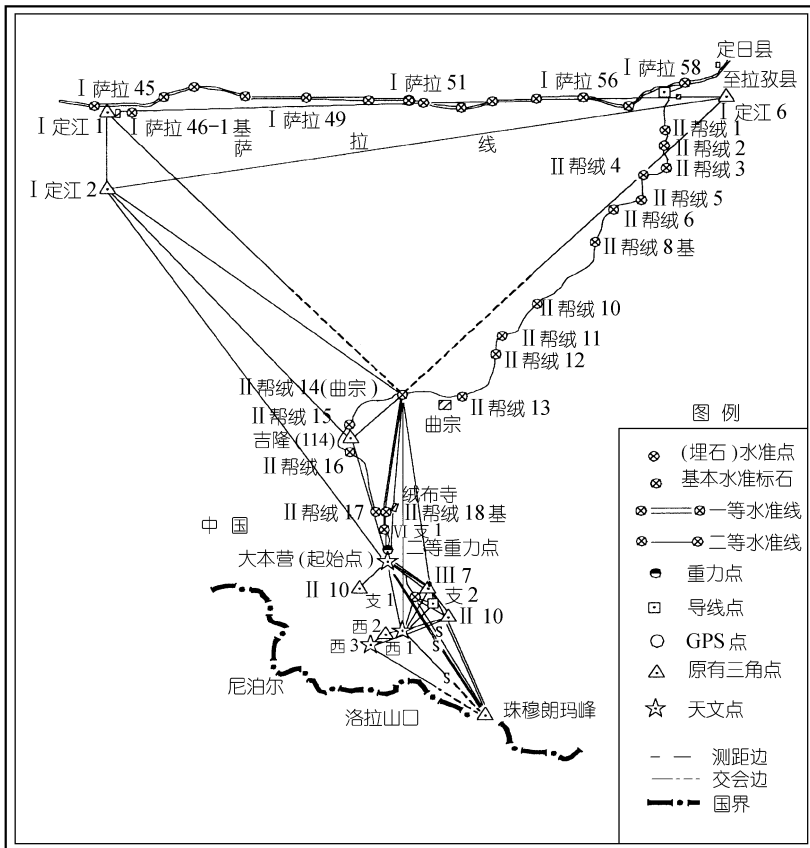


图 3 1992 年珠峰地区大地测量施测图

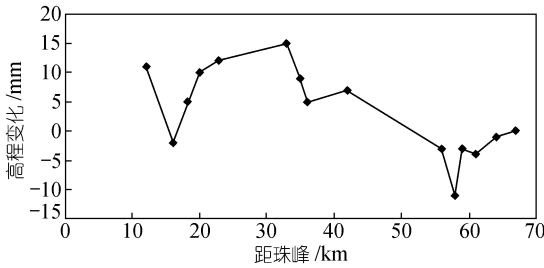


图 4 珠峰北邻近地区的地壳垂直运动图 (邦绒线 1998~1992)

为 3 mm, 速率仅为 0.8 mm/a<sup>1)</sup>, 珠峰南坡的地壳垂直运动很微弱, 因此可以理解为, 印度板块的冲撞挤压力绝大部分通过印度、欧亚板块在青藏地区释放出来了. 对上述现象机制的思考, 仅从一个学科的实践经验还不足以下肯定的结论, 提供其他的地学学科作进一步的研究.

### 3 珠峰地区地面水平运动

根据在珠峰地区所实施的 1992, 1998 两期 GPS 观测成果, 其重合点的水平运动量见表 5.

表 5 珠峰地区 1992 年 GPS 网与 1998 年 GPS 网重合点的水平运动

点名	$B(^{\circ})(')$	$L(^{\circ})(')$	$\Delta B''$ (1998~1992)	$\Delta L''$ (1998~1992)
曲宗(II <sub>14</sub> )	28 19	86 51	0.0081	0.0106
珠峰基准点	28 08	86 51	0.0081	0.0103
III <sub>7</sub>	28 06	86 52	0.0081	0.0103
西 1	28 04	86 51	0.0079	0.0107
I 定江 1	28 35	86 37	0.0071	0.0112
I 定江 6	28 37	87 10	0.0079	0.0109
I 定加 2	28 30	86 37	0.0079	0.0108
吉隆(II <sub>4</sub> )	28 16	86 49	0.0081	0.0106
Piramide	27 58	86 49	0.0085	-0.0048

由各重合点的水平运动量解算其水平运动速率得图 5 和图 6.

图 5 和图 6 中曲线大体相应于印度板块和欧亚板块的边缘分界线. 由上述两期 GPS 观测成果清晰看出, 珠峰地区在印度板块的推动下, 仍向北东东方向(54°方位角, 6 ~ 7 cm/a)运动. 同时发现在跨越喜马拉雅山两侧的监测点之间有着相同的向北推移速度, 但东西向存在明显的走滑迹象, 因此推测在珠峰下方有较大的走滑断裂存在. 当然, 珠峰地区相对两大板块的冲撞边缘带来说, 只是很小的局部, 因此不一定能代表两大板块的整体运动状态, 但从一个侧面说明了, 印度板块作用于欧亚板块推力方向与接触面的不正交, 必然会产生局部或整体的走滑.

珠峰地区作为欧亚板块与印度板块的冲撞边界, 是反映两板块相互作用性状的敏感指示器. 因此对其开展深入的地学研究, 不仅对揭开青藏高原的隆升机制会发挥重要作用, 而且对研究我国的地震周期规律有重要意义.

1) 与 Dr. B. Washburn 的私人通讯中 Mr. Charles Corfield 的测量报告

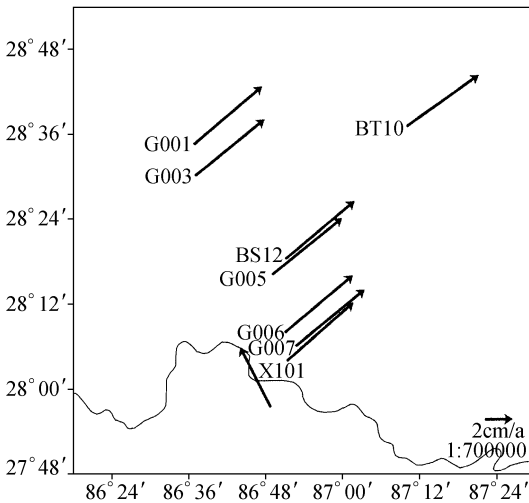


图 5 珠峰地区 GPS 速度场(相对于 ITRF96 框架)

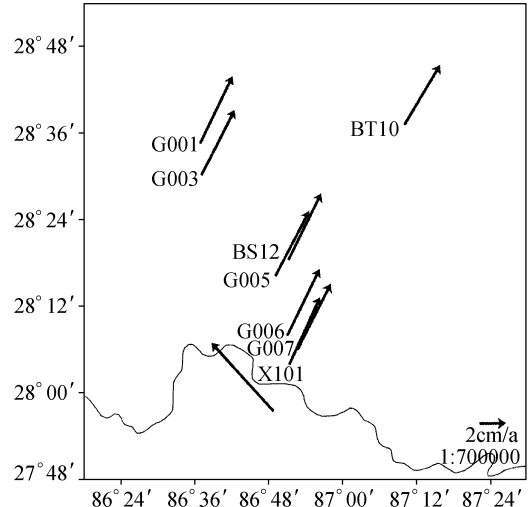


图 6 珠峰地区 GPS 速度场(相对于 Eurasia 板块)

### 4 珠峰地区的地应变率场

根据珠峰地区地面水平运动速度场(图 5 和图 6), 可以求得相应的地应变率参数(表 6、图 7)<sup>[9]</sup>.

表 6 珠峰地区 GPS 速度场确定的应变率场参数

应变率场参数	珠峰地区 (1998~1992) 含金字塔 (Pyramid)点	珠峰地区 (1998~1992) 不含金字塔 (Pyramid)点
最大主应变率 $\epsilon_1$ ( $0.01 \mu \text{ strain}^a/\text{a}$ )	0.37284	0.03037
最小主应变率 $\epsilon_2$ ( $0.01 \mu \text{ strain}/\text{a}$ )	-0.65558	-0.17034
最大主应变率方位角 $\alpha_1(^{\circ})$	131.774	134.130
最大剪应变率 $\gamma_m$ ( $0.01 \mu \text{ strain}/\text{a}$ )	1.02842	0.20071
面膨胀率 $\Delta$ ( $0.01 \mu \text{ strain}/\text{a}$ )	-0.28274	-0.13997
$\gamma_1$ ( $0.01 \mu \text{ strain}/\text{a}$ )	-0.11555	-0.00610
$\gamma_2$ ( $0.01 \mu \text{ strain}/\text{a}$ )	-1.02191	-0.20062

a)  $1 \mu \text{ strain} = 1.0 \times 10^{-6}$

在 44° . 珠峰地区具体应变情况可参见表 6 和图 7.

从图 7 中可以看出: 珠峰地区以东北-南西向挤压为主, 北西-南东向拉张为辅. 珠峰地区的地形和地理的宏观状态也反映了这一现象. 珠峰地区位于印度板块与西藏地块挤压和俯冲作用的边缘地带, 这一“东北-南西向挤压”, 使得该地区有巨大的高程起伏, 从高于 7000 ~ 8000 m 的山地地形高度, 在 20 ~ 30 km 内大体向北东方向迅速下降到 5000 ~ 6000 m, 在该地区的 GPS 监测点有类同的北东方向的位移. 而在两大板块冲撞边缘的不同两侧的 GPS 监测点,

在二期 GPS 资料求得的应变场参数中, 当考虑金字塔(Pyramid)点时, 由三角形求得的最大张应变率为  $3.97 \times 10^{-7}/\text{a}$ , 方向北偏西  $17^{\circ}$ , 最大压应变率为  $-2.0 \times 10^{-7}/\text{a}$ , 方向北偏东  $3^{\circ}$ ; 而由 10 个点整体计算的块体最大主应变率(张应变率)为  $3.7 \times 10^{-9}/\text{a}$ , 方向北偏西  $49^{\circ}$ , 最小主应变率(压应变率)为  $-6.6 \times 10^{-9}/\text{a}$ , 方向北偏东  $41^{\circ}$ . 不考虑金字塔(Pyramid)点时, 由三角形求得的最大张应变率为  $0.1 \times 10^{-8}/\text{a}$ , 方向北偏西  $66^{\circ}$ , 最大压应变率为  $-0.9 \times 10^{-8}/\text{a}$ , 方向北偏东  $27^{\circ}$ ; 而由 9 个点整体计算的块体最大主应变率(张应变率)为  $3.0 \times 10^{-10}/\text{a}$ , 方向北偏西  $46^{\circ}$ , 最小主应变率(压应变率)为  $-1.7 \times 10^{-9}/\text{a}$ , 方向北偏

则出现南西方向的不同速率或相反方向的位移. 在该地区的另一个地理特点, 就是有众多呈现纵向的冰川, 重要的如东、中、西绒布冰川. 这一地理现象的形成可能不仅是冰雪、水流的冲蚀影响, 而“北西-南东向拉伸”也起了重要作用.

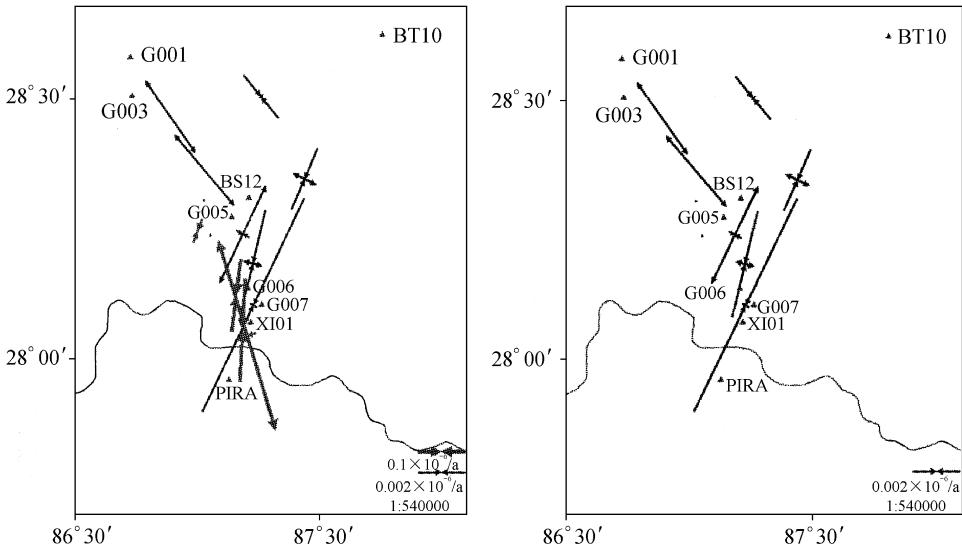


图 7 珠峰地区由 GPS 速度场确定的应变率场  
左图含金字塔 (Pyramid)点, 右图不含金字塔(Pyramid)点

### 5 结束语

(1) 根据 30 余年大地测量成果分析, 珠峰地区的地壳垂直运动在 10 年量级的时间上和空间上都存在非平稳性现象.

(2) 珠峰地区的地壳垂直运动在时间上的非平稳性, 与地震学家提出的地震活跃幕呈现有一定相关性.

(3) 珠峰地区的地壳垂直运动在空间上的非平稳性可能和地壳介质的非均匀性及地应力的非均匀吸收有关.

(4) 根据相隔 6 年的两期(1992 年, 1998 年)高精度 GPS 测量资料, 珠峰地区的地壳水平运动以每年 6~7 cm 速度向北东东(54° 方位角)方向运动.

(5) 上述同期的 GPS 测量资料表明, 印度板块和青藏块体在冲撞边缘呈现较为明显的走滑运动趋势.

**致谢** 30 余年来我国所获得的历次珠峰地区的测量成果, 均是参与此项任务的军民大地测量工作者和登山队员艰辛劳动的结晶, 作者在此谨向他们致以崇高的敬意和谢意. 本课题得到国家测绘局有关部门和叶淑华院士、马宗晋院士的大力支持, 作者也在此表示感谢.

### 参 考 文 献

- 1 朱 亮. 珠穆朗玛峰高程测定. 中国科学, 1976, 19(2): 74~77
- 2 陈俊勇, 刘永诺, 张 骥, 等. 在板块边缘地区重力场的求定. 测绘学报, 1994, 23(4): 241~265

- 3 陈俊勇, 刘允诺, 张 骥, 等. 珠穆朗玛峰地区的地壳运动、地壳厚度、张性冰川的探讨. 测绘学报, 1994, 23(3): 178~183
- 4 Chen J Y, Chang G, Lee U L, et al. Crustal movement, gravity field and atmospheric refraction in the Mt. Everest. ZfV, 1994, (8): 389~400
- 5 陈俊勇. 珠穆朗玛峰地区的地壳运动及有关问题的探讨. 地球物理学报, 1999, 39(1): 58~67
- 6 国家精密水准测量规范. 北京: 测绘出版社, 1974
- 7 马宗晋, 蒋 铭. 中国的强震期和强震幕. 中国地震, 1987, 3(1): 47~51
- 8 丁国瑜主编. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 1991. 139, 148~152, 542
- 9 顾国华. 利用 GPS 地形变在大地坐标系中计算应变. 地壳形变与地震, 1998, 18(3): 20~24