

# 中国福建及其边缘海域现时 地壳运动定量研究

——GPS、断层形变和水准等测量与震源机制结果的综合分析\*

周硕愚<sup>1)</sup> 帅 平<sup>1)</sup> 郭逢英<sup>2)</sup> 陈兆煌<sup>2)</sup>  
邓千金<sup>1)</sup> 周 昕<sup>1)</sup> 陈园田<sup>2)</sup>

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所

2) 中国福州 350003 福建省地震局

**摘要** 基于中国大陆 GPS 测网(1994~1996 年)、福建 GPS 测网(1995~1997 年)和跨断层形变测量网(1982~1998 年)、精密水准网(1973~1980 年)以及近数十年来的震源机制资料,综合定量地研究了中国大陆东南缘——福建及其边缘海现时地壳运动.发现:此区域同大陆整体以 11.2 mm/a 速度较均匀地向 SE 方向运动;同时还存在着一种由泉州湾指向大陆内部,主方向 NW 并向两翼扩展,其平均速度为 3.0 mm/a 的运动.地壳形变测定的现时应变场与震源机制应力场以及地质学推测的构造应力场三者相符.区域应力场主压应力方位为 NW(NWW)-SE(SEE).在此应力场作用下,NE 向断层呈压性运动,NW 向断层呈张性运动.以泉州湾、晋江—永安 NW 向断裂为界,地壳运动呈现分区特性:闽西南及闽粤交界区为上升区、闽东北区为下降区,前区的应变率和断层活动量均高于后区.本研究区受到喜马拉雅碰撞带侧向传递运动和西太平洋俯冲带挤压的共同作用;前者导致的运动量大于后者,但前者均匀后者不均匀.因此,本区强震的孕育发生与西太平洋俯冲带的关系更直接.

**关键词** 中国大陆东南缘 速度场 应变场 断层运动 垂直运动 区域应力场  
喜马拉雅碰撞带 西太平洋俯冲带

## 引言

中国大陆东南缘——福建及其邻近海域是研究西太平洋俯冲带和喜马拉雅碰撞带对中国大陆共同作用的一个理想地区.该区又处于我国东南沿海强震活动带,1445 年以来已发生 4 $\frac{3}{4}$ 级以上地震数十次,其中包括 1604 年 12 月 29 日泉州海外 7.5 级和 1994 年 9 月 16 日台湾海峡南部 7.3 级地震.因此基于当代先进的测地技术,定量综合研究该区现时地壳运动,对大陆动力学、边缘海动力学和地震预测均具有重要意义.

\* 地震科学联合基金重点项目(9507451)、国家自然科学基金项目(49674224)、国家攀登计划“现代地壳运动与地球动力学”和福建省计委重点攻关项目(950507)资助.  
1999-05-04 收到初稿,1999-07-05 收到修改稿并决定采用.

我们基于该区域 GPS 测量(1995~1997 年)、跨断层形变测量(1982~1998 年)、精密水准网测量(1973~1980 年)以及震源机制解等资料及有关地质学、地貌学背景,综合定量地研究了此区域现时地壳水平运动、垂直运动、断层运动、主应变率场、最大剪切应变率场、地震应力场和构造应力场,进而讨论了该区现时地壳运动基本特征及其动力学意义.

1 现时地壳运动水平速度与应变率场

基于福建 GPS 网(1995~1997 年)和 TAIW(台北)、SHAO(上海)等 IGS(国际地球动力学服务)台站相应数据,将研究区视为连续介质体,应用将欧拉矢量按劳勒级数展开为多项式的方法(Haines, Holt, 1993; 吴云等, 1997),建立估算该区现时地壳运动水平速度与应变率场的模型.

图 1 分别表示了以台北和南平为基准点的现时水平速度场.带箭头矢量为实测值,带误差椭圆的矢量为模型值,两者之间的标准差前者为 $\pm 3.0\text{ mm/a}$ ,后者为 $\pm 2.6\text{ mm/a}$ .证实模型具有较高的可信度.图 1a 中各测点的速度矢量指向基本平行、模量大致相等;其平均速度为 $11.2\text{ mm/a}$ 指向 ES,反映了此研究区整体向 ES 方向运动的特性.与根据国家攀登计划全国 GPS 测网建立的中国大陆主要块体现时运动模型 PBMC-1 中的华南块体运动基本一致(周硕愚等, 1998).图 1b 由于以南平为基准点,大致扣除了本研究区整体均匀向 ES 方向的运动,展现了研究区内部的相对运动,即存在着一种由海洋指向大陆的、大致以泉州湾 NW 方向为轴线、两侧向 NE 和 SW 向展开的运动,其平均值为 $3.0\text{ mm/a}$ .可见,在 NW-SE 方位上,既存在着大陆指向海洋的矢量方向整体一致的较均匀的运动,又存在着海洋指向大陆的矢量方向呈扇形展开的不均匀运动,前者的平均年速度约比后者大 4 倍.前者可能体现了印度板块碰撞导致的侧向运动传递对中国大陆东南沿海的作用;后者可能体现了菲律宾海板块对台湾岛东侧仰冲推挤对东南沿海产生的影响.

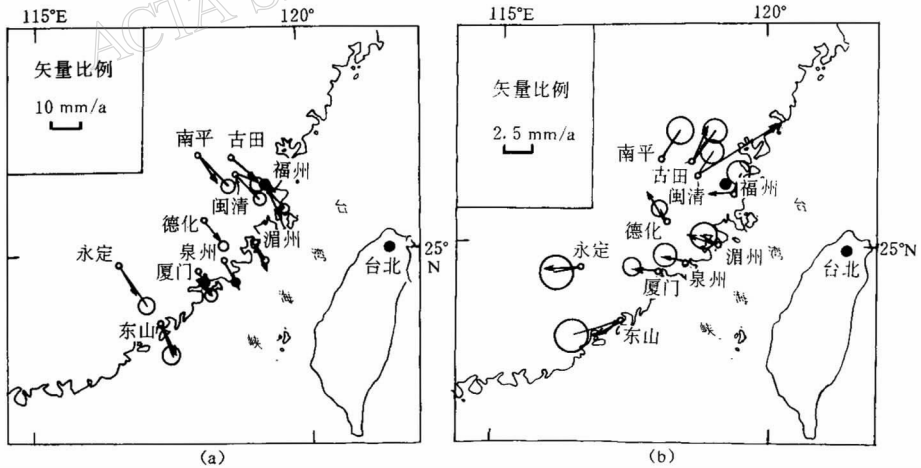


图 1 福建及其邻近海域现时水平速度场(1995~1997 年)  
(a) 以台北为参照点; (b) 以南平为参照点

图 2 是模型以 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格网密度推估出的现今应变率场.图 2a 展示出现时应变(应力)场主压应力轴的方向为 NW-SE 向,主张应力轴为 NE-SW 向.图 2b 最大剪应变率等值线图

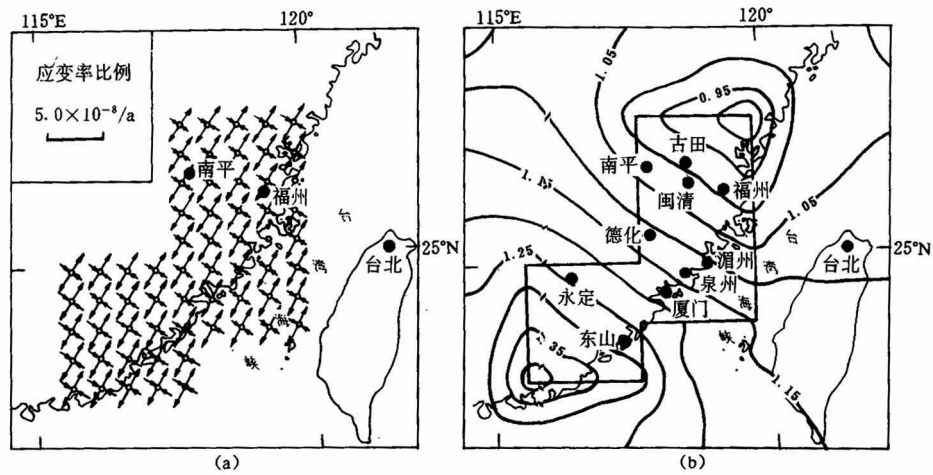


图 2 福建及其邻近海域现时应变率场(1995~1997 年,以南平为参照点)  
(a)主应变率场;(b)最大剪应变率等值线图(等值线所标数值均需乘以  $10^{-8}/a$ )

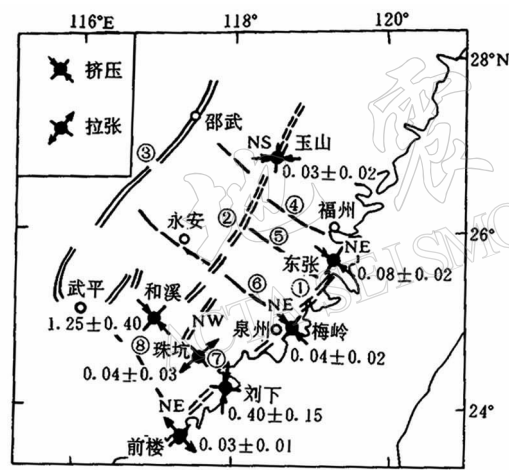


图 3 由跨断层短水准测量时间序列  
(1982~1998 年)求得的断层现时运动  
挤压或拉张状态及垂直形变年速率  
[图中数字表示垂直形变年速率及  
标准差(mm/a)]

- ① 长乐—诏安断裂, ② 政和—海丰断裂,
- ③ 邵武—河源断裂, ④ 闽江下游断裂,
- ⑤ 沙县—南日岛断裂, ⑥ 永安—晋江断裂,
- ⑦ 九龙江下游断裂, ⑧ 上杭—诏安断裂

显示出应变率具有明显的分区性,以通过泉州湾的 NW 方向为界,大致分为闽东北区和闽粤交界的西南区. 闽粤交界和闽西南区以及泉州湾的最大剪应变大于闽东北区.

## 2 现时断层运动的挤压或拉张状态及垂直形变速率

基于 7 个场地上实施的跨断层短水准测量所获得的时间序列,求得断层垂直形变性趋势年速率及其标准差. 参照地质野外调查所判明的上、下盘,若上盘上升则判定该断层现时运动为挤压状态,反之则为拉张状态.

由图 3 可见,在沿海 NE 走向的长乐—诏安断层带上,东张、梅岭、刘下各测点处的断层现时运动均呈“压”性,仅前楼呈微弱的“张”性;在中部 NE 走向的政和—海丰断裂带上,王山、和溪测点均呈“压”性. 相反,在 NW 走向的九龙江下游断裂上,珠坑测点则成“张”性.

断层形变测量初步证实:目前正在进行的断层运动,NE 向断裂呈“压性”,NW 向呈“张性”. 这与 GPS 测量揭示的主应变率场的方向是吻合的(图 2a). 断层垂直形变年速率都比较小,似乎也具有一定的分区性,即闽

西南区的断层活动性高于闽东北区(和溪测点速率仅根据 1995~1997 年测量求出)。

### 3 现时地壳垂直运动场

图 4 展示了基于两期一等水准网复测资料(760 个复测点, 每公里单位权标准差  $M_{\Delta} = \pm 0.94 \text{ mm}$ ), 应用多面函数拟合法绘制的现时地壳垂直运动等值线图(刘与锟等, 1988)。可以看出, 地壳垂直运动大致以由泉州湾指向 NW 的永安—晋江断裂为分界面, 闽西南为上升区、闽东北为下降区。与 GPS 测量给出的现时水平速度场(图 1b)、最大剪切应变率等值线图(图 2b)和现时断层垂直运动活动性(图 3)所揭示的分为两个区域及其分界面是相互印证的。

从图 4 中还可以看出, 本区垂直形变速率多半小于  $2 \text{ mm/a}$ , 个别地点最大也不超过  $7 \text{ mm/a}$ , 远小于由一等水准复测所揭示的台湾东海岸山脉相对于台东纵谷  $30 \text{ mm/a}$  的上升速率(Liu, Yu, 1990)。说明菲律宾海板块向大陆的仰冲、碰撞所产生的强大应力, 大部分已消耗在台湾岛东部一带, 传递到福建沿海已较微弱, 无论垂直形变(图 4)和断层活动(图 3)强度均低。应用中国大陆全境 1951~1990 年一等水准网 4 102 个复测点所作的综合对比分析表明, 本区的“平均垂直形变强度” $V_i < 1$ , 弱于西部地区(顾国华等, 1997)。

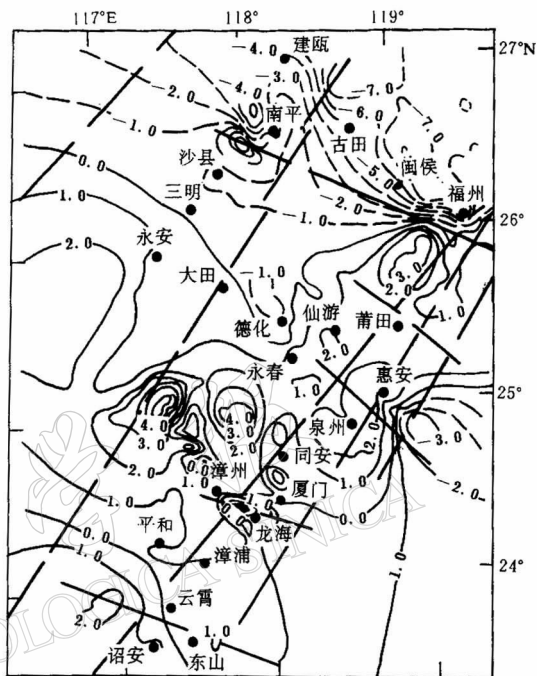


图 4 福建省现时地壳垂直运动等值线图(1973~1980 年, 等值线单位:  $\text{mm/a}$ ) (据刘与锟等, 1998)

### 4 震源应力场、震源深度与地震带

图 5 展示了由 20 世纪 90 年代以前, 各次强震震源机制解给出的主压应力轴( $P$  轴)场(张诚等, 1993)和 GPS 测地模型 PBMC-1 给出的现时速度场(周硕愚等, 1998)。从此图右下角部分可看出, 福建及闽粤沿海主压应力优势方向为 NWW-SEE 以及 NW-SE, 与 GPS 全国网速度矢量方向相近, 与台湾的震源应力场似属同一体系。对福建陆内多次小震求得的小震平均主压应力轴向为 NW-SE 向(蒋傅, 戴丽思, 1989)。近年来本区又发生了台湾海峡南部( $M=7.3$ , 1994-09-16)、龙岩( $M=5.1$ , 1992-11-26)、永定( $M=5.2$ , 1997-05-31)等 10 余次中强以上地震, 震源机制解表明, 其主压应力轴优势方向仍为 NW-SE 或 NWW-SEE 向(彭美风等, 1997; 丁学仁等, 1999)。

福建及其边缘海地区地震的震源深度小于  $30 \text{ km}$ , 未观测到震源深度达数百公里的深震。这可能与菲律宾海板块对台湾特殊的仰冲方式有关。

从图 5 还可看出, 本区的边缘海地震活动性低于台湾, 但又高于其西北侧的内陆地区。

按地震活动性从海洋到大陆的逐次递减,可分为 3 个基本平行的地震带,即台东地震带、东南沿海外带和东南沿海内带. 各带上  $M \geq 6$  地震年均发生率分别为:  $>1$ ,  $0.032 \sim 0.046$  和  $0.01 \sim 0.03$ , 相互间具有较高的相关性(林纪曾, 1980; 时振梁等, 1995).

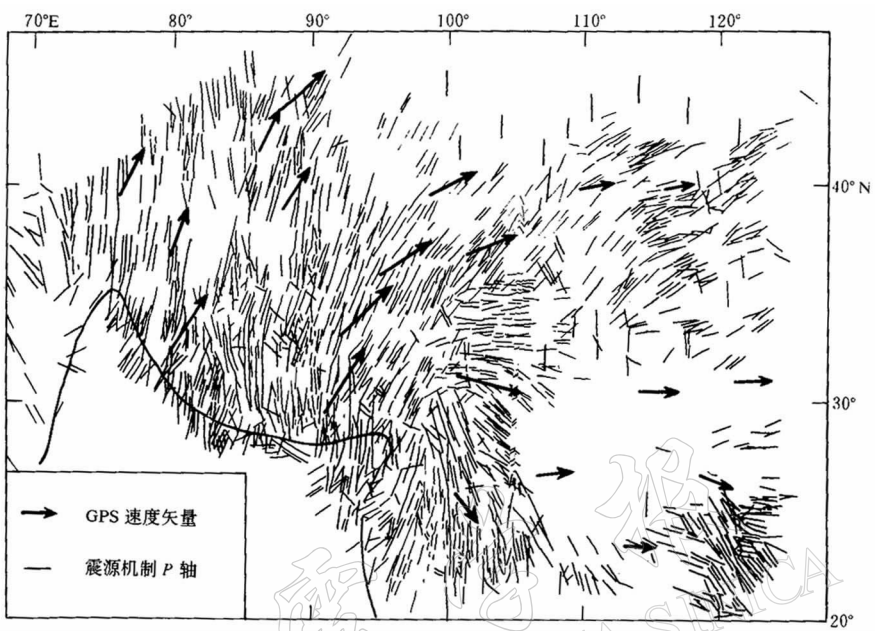


图 5 欧亚板块东南域强震震源机制  $P$  应力轴场  
和 GPS 运动模型速度矢量(据张诚等, 1993; 周硕愚等, 1998)

## 5 地质构造应力场

本研究区陆地上主要的 NE、NNE 向断裂带由东向西依次为: 长乐—诏安、政和—海丰、邵武—河源断裂带. 主要的 NW、NWW 向断裂带由北往南依次为: 闽江下游、沙果—南日岛、永安—晋江、九龙江下游和上杭—诏安断裂带(参见图 3). 其中一些 NW 向断裂, 如永安—晋江断裂可能是台湾海峡南侧 NW 向巴士系构造在泉州湾登陆, 继续向大陆内部扩展、直至永安一带所致. 沿海的断陷盆地、平原和海峡, 如兴化湾、莆田平原、泉州湾、泉州平原、厦门港、龙海平原等为晚更新世以来形成, 它们的长轴大多为 NW 向, 并表现出 NE 向的扩展. 地质学综合研究认为, 晚更新世以来, 受到西太平洋俯冲带菲律宾板块向 NW 方向的挤压, 本研究区构造应力场主压应力方向为 NW 和 NWW 向、主张应力为 NE 和 NEE 方向(丁国瑜, 1991; 丁原章, 梁劳, 1992; 陈国田等, 1998).

## 6 结论与讨论

### 6.1 地壳形变测量所揭示的现时地壳运动

福建 GPS 测网较均匀地整体地以  $11.2 \pm 3.0$  mm/a 的平均速度向 ES 方向运动(以台北为参考点), 全国 GPS 测网中的泉州点以  $14 \pm 4$  mm/a 的速度向 EES 方向运动(以长春为参考点). 反映了中国大陆华南块体及其东南缘向着海洋的运动.

在福建陆地区域内部还存着一种与上述方向相反的由海洋指向陆地的不均匀相对运动。其平均速度大约为 3.0 mm/a, 其方向为由泉州湾指向 NW, 即晋江—永安断裂带方向, 并向其左、右两翼扇形展开(以南平为参考点)。

GPS 测定的主应变率场, 其主压应力方位为 NW-SE, 主张应力方位为 NE-SW。断层形变测量揭示出 NE 走向断层受挤压、NW 走向断层受拉张。两者相互符合。

GPS 给出的最大剪应变(以及面应变等)等值线图 and 精密水准测量给出的垂直形变等值线图以及断层形变测量结果, 均揭示出福建现时地壳运动可分为西南和东北两个区的分区特性。分界面大致为泉州湾、晋江—永安 NW 向断裂带。西南区应变率较大, 为上升区; 东北区应变率较小, 为下降区, 其断层活动性也略低于西南区。

## 6.2 地壳形变学与地震学及地质学结果的相互印证与区域应力场

测定岩石瞬间破裂状态的地震学所给出的震源应力场、测定地壳以 1 年或 10 年尺度运动的地壳形变学所给出的地壳应变率场和测定地学痕迹(百万年尺度平均)的地质学所给出的构造应力场, 三者能相互印证。说明福建及其边缘海的区域应力场主压应力方位为 NW-SE 和 NWW-SEE。从百万年前至今日, 区域应力场的方向是基本稳定的。

## 6.3 印度板块碰撞和西太平洋俯冲带对中国大陆东南缘——福建及其边缘海共同的动力作用

印度板块碰撞使中国大陆内部诸块体产生侧向运动、运动速度由南至北, 由西向东逐次减少; 运动方向由北北东逐步转向东以致东南和东东南。此种作用使福建及其边缘海整体地较为均匀地向东南方向(指向海洋)运动。另一方面, 西太平洋俯冲带中菲律宾海板块向西北方向运动, 在台湾东部与大陆发生碰撞和转向仰冲, 其能量大部分在此消耗; 小部分能量通过巴士系构造等途径, 对福建及其边缘海产生向西北方向(指向大陆)的挤压作用。两种动力作用共同形成了中国东南沿海——福建及其边缘海的区域应力场: NW-SE(NWW-SEE)方位挤压和 NE-SW(NEE-SWW)方位拉张。从地壳形变测量数据看, 前者的作用大于后者(平均年速率约大 4 倍)。但前者导致的速度场比较均匀, 而后者导致的速度场则相当不均匀, 因此后者, 即菲律宾海板块的运动, 更易于为强震的孕育与发生提供动力条件。实际上东南沿海内地震带和外地震带强震的发生, 与台东地震带强震的活跃程度密切相关, 时间上也常略滞后于后者。此外, 从本文前述的各项数据看, 以泉州湾及晋江—永安断裂带为界的闽西南和闽粤交界区发生强震的动力学条件胜于闽东北区。

## 6.4 问题与后续研究

本研究基于空间和地面多种地壳形变观测, 初步揭示出中国大陆东南沿海华南块体内部的地壳运动分区现象。从空间分布看, 此种现象似乎与海洋中的 NW-NWW 向巴士系构造在泉州一带登陆, 并继续向大陆内部扩展有关。尚有待深入研究。当前该区的地壳形变, 尤其是 GPS 观测, 无论在空间覆盖范围和时间进程长度上均感不足。今后有必要及时应用“中国地壳运动观测网络”(crustal movement observation network of China)所属东南沿海区域网(福建、广东、海南、广西)和“亚太空间地球动力学计划”(Asia Pacific space geodynamics program)新产出资料对此区域作进一步研究。在 21 世纪来临之际, 对揭示地球时空变化信息具有空前强大能力的地壳形变学, 必将对大陆动力学、边缘海动力学、动力地质学和地震预测作出新的推动(周硕愚, 1999)。

感谢马宗晋、丁国瑜、马瑾院士和陈鑫连、赖锡安、林继华、刘序俨研究员以及胡心康高级工程师的帮助。

### 参 考 文 献

- 陈园田, 王志鹏, 黄卿团, 等. 1998. 福建沿海的断陷盆地、平原、海湾与地震. 地壳形变与地震, **18**(4): 55~61
- 丁国瑜主编. 1991. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社, 337~349
- 丁学仁, 吴长江. 1999. 福建及其沿海地区中强以上地震的震源机制研究. 地壳形变与地震, **19**(1): 95~97
- 丁原章, 梁芳. 1992. 巴士系构造的地震危险性. 华南地震, **12**(2): 3~4
- 顾国华, 王若柏, 孙东平, 等. 1997. 垂直形变强度分析在地震预报中的应用. 地震, **17**(4): 397~403
- 蒋傅, 戴丽思. 1989. 震源断错和地震应力场. 见: 马杏垣主编. 中国岩石圈动力学地图集. 北京: 中国地图出版社, 68
- 林纪曾, 梁国昭, 赵毅, 等. 1980. 东南沿海地区的震源机制与构造应力场. 地震学报, **2**(3): 245~257
- 刘与锟, 郭逢英, 陈兆煌, 等. 1998. 福建省现代地壳垂直运动与断裂活动. 地壳形变与地震, **18**(4): 68~73
- 时振梁, 王健, 张晓东. 1995. 中国地震活动性分区特征. 地震学报, **17**(1): 20~24
- 吴云, 帅平, 施顺英. 1997. GPS 观测量与地震矩张量联合反演地壳水平运动速度场的方法. 地震形变与地震, **17**(4): 11~16
- 张诚, 修济刚, 邱同芝, 等. 1993. 全球强震震源机制. 北京: 万国学术出版社, 466
- 周硕愚, 张跃刚, 丁国瑜, 等. 1998. 依据 GPS 数据建立中国板块内块体现时运动模型的初步研究. 地震学报, **20**(4): 347~355
- 周硕愚. 1999. 走向 21 世纪的地壳形变学——对大陆动力学与地震预测的新推动. 地壳形变与地震, **19**(1): 1~13
- Haines A J, Holt W E. 1993. A procedure for obtaining the complete horizontal motion within zones of distributed deformation from the inversion of strain rate data. *J Geophys Res*, **98**: 12 057~12 082
- Liu Chiching, Yu Shuibeih. 1990. Vertical crustal movements in eastern Taiwan and their tectonic implications. *Tectonophysics*, **183**: 111~119