

文章编号: 0253-3782(2003)05-0541-07

中国大陆现今地壳运动研究^{*}

王 琪

(中国武汉 430071 中国地震局地震研究所)

摘要 中亚、东亚地区的构造变形的定量化对全球板块运动和岩石圈动力学研究具有重要意义。最近 4 年, 利用空间技术, 一个全面反映中国大陆地壳水平运动的实测速度场已基本完成。GPS 结果十分清晰地刻画出中国大陆地区块体运动及内部变形特征, 提供了认识印度-欧亚碰撞引起的活动构造的新视角。本文回顾了 4 年来中国学者在利用 GPS 研究现今地壳运动方面所取得的成就, 以及在利用 InSAR 技术研究强震破裂方面的进展情况。这些研究成果, 标志着中国大陆构造变形的定量化研究进入了一个新阶段。

关键词 现今地壳运动 GPS 中国大陆

中图分类号: P313.4 **文献标识码:** A

引言

亚洲大陆的新生代构造活动的主要特征表现为: 欧亚大陆与印度次大陆在喜马拉雅一带的陆-陆碰撞及印度板块向下持续挤入青藏块体引起的大尺度、高强度地壳变形, 引起青藏高原抬升到平均海拔 4 000~4 500 m, 向北影响到天山、贝加尔一带的构造活动, 向东使印支、华南块体整体向东南挤出。无论是规模还是复杂程度, 中亚和东亚地区的构造变动均在全球占显著地位。研究其运动学特征对深入认识全球板块运动和大陆岩石圈动力学具有重要价值。

在国土面积上, 中国占亚洲大陆的大部分区域, 其中青藏高原的绝大部分及东天山位于中国境内。因此, 其现今地壳变形在亚洲构造及大陆动力学研究中占有重要地位。在过去的 4 年里(1999~2002 年), 中国广泛应用 GPS、InSAR 等空间技术, 在监测大陆现今地壳运动与地震变形方面取得很大进展。尤其是国家重大科学工程之一的“中国地壳运动观测网络”(CMONOC) 的建成及正常运行, 以其站点密集和对国土的整体覆盖, 使研究地壳运动的能力有了极大提高(马宗晋等, 2001; 牛之俊等, 2002)。迄今一个反映中国大陆及邻区地壳水平运动的统一速度场已基本完成。该速度场由近 1 000 个站点组成, 建立在欧亚固定的参考系上(王敏等, 2003), 十分清晰地刻画出块体运动及板内变形的主要方式。多年来积累的 GPS 观测成果, 提供了对印度板块向北推挤所导致的构造变形的新认识, 地表变形观测对模拟下部地壳的动力过程提供了定量依据, 并推动了地学相关领域研究的发展与深入。

* 国家自然科学基金(40274007)资助。

2003-03-10 收到初稿, 2003-05-26 收到修改稿, 2003-06-01 决定采用。

本文为在日本召开的第 21 届国际大地测量与地球物理大会中国国家报告的一部分, 目的是回顾最近 4 年来中国在地壳运动与变形方面所取得的成就, 基本内容引自国内学术期刊上的相关论文, 部分来自国际期刊上中国学者发表的论文。首先, 本文简要介绍了“中国地壳运动观测网络”的有关情况, 然后概略总结 GPS 速度场所揭示的中国大陆构造变形特征; 接下来分区域报告不同课题组在青藏、天山、华北、川滇地区有关地壳位移、应力应变场方面的研究工作, 以及中国大陆地壳运动模型方面的研究; 最后介绍 InSAR 技术应用于玛尼(青藏)、张北(华北)地震同震变形研究的情况。

1 中国地壳运动观测网络

中国地壳运动观测网络是由中国地震局、总参测绘局、中国科学院、国家测绘局共建的科学工程项目(牛之俊等, 2002), 它以全球卫星定位系统(GPS)观测技术为主, 辅之以甚长基线射电干涉测量(VLBI)和卫星激光测距(SLR)等空间技术, 结合精密重力和精密水准测量, 构成大范围、高精度、高时空分辨率的地壳运动观测网络。观测网络由基准网、基本网、区域网、以及数据传输与分析处理系统四大部分组成, 以监测地壳运动服务于地震预测预报为主要目标。“中国地壳运动观测网络”1998 年初开始建设, 2000 年底通过国家验收, 并正式投入运行。

基准网由 25 个 GPS 连续观测站组成, 其中武汉、北京、上海、乌鲁木齐和拉萨观测站同时也是国际 IGS 站。少量站(武汉、上海、长春、昆明、北京、乌鲁木齐)GPS 与 VLBI、流动或固定 SLR 并址观测。基准网相邻站间距离平均约 700 km, 主要功能是监测中国大陆一级块体的构造运动(青藏、新疆、华南、华北、东北、南海)。在中国大陆六大块体, 除南海块体外, 每个块体上至少有 3 个基准站, 这样, 基本控制了中国大陆一级块体的运动, 对监测大尺度地壳运动和构造变形起到了关键作用。

基准站主要装备有 ASHTECH 双频接收机及扼流圈天线, 采用大于 2 m 的钢筋混凝土强制观测墩。每天 GPS 数据经卫星通讯和电话线传至北京的数据中心。所有站点上用 FG5 绝对重力仪观测重力值并联测精密水准。4 年来, 基准站相邻站间 GPS 基线长度年变化率实测精度为 1.3 mm/a , 1999~2001 年两次绝对重力测定(典型为 1~2 天时段)的实测精度为 $1 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (牛之俊等, 2002)。

基本网由 56 个定期复测的 GPS 和重力测站组成, 作为基准网的补充。它与连续观测的基准站一起均匀布设于全国, 平均站距约 350 km。基本网主要用于监测一级块体内部变形、块体间的地壳变动以及全国尺度的长期重力变化。1998~2002 年完成了 5 次 GPS 观测, 3 次采用 LaCoste-Romberg G 型相对重力仪进行基准、基本网相对重力联测。分析结果表明, GPS 基线实测精度为水平分量小于 3 mm, 垂直分量小于 10 mm, 全网基线相对精度达 3×10^{-9} ; 而站点间相对重力实测精度为 $30 \times 10^{-8} \sim 40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

区域网由 1 000 个不定期复测的 GPS 站组成, 既作为基准网和基本网的补充, 又是基准、基本网的空间加密。其中约 700 个站集中分布在川滇、河西走廊、华北等地区。这些地区历史上发生过中强地震, 潜在的地震活动可能给当地民众和财产造成巨大威胁。另外 300 个站均匀分布在全国其它地区, 如青藏、新疆、东北和华南。区域网主要用于监测断层、活动地块边界带的地壳变动, 为地震预测预报服务。区域网采用流动观测模式不定期整网观测, 部分站点可能出于地震预测的目的进行多次复测。1999 年 3~8 月完成了首次

观测工作; 2001 年 3~8 月完成了 90% 区域网的复测工作。对两次观测的数据分析表明, 区域网的基线定位精度与基本网相当。2000, 2002 年还加测川滇、青藏地区部分网点(50~60)用以检测滇西地区的变形异常, 以及研究 2001 年 11 月 14 日昆仑山口西 8.1 级地震变形场(乔学军等, 2002)。区域网由约 900 个测站间隔 2 年的观测, 经 GAMIT/GLOBK 软件处理, 给出了速度场精度大约为 1~2 mm/a(王敏等, 2003)。

2 中国大陆地壳运动基本特征

中国大陆岩石圈新构造变形的最显著特征是巨大的晚第四纪活动断裂十分发育, 将中国大陆切割成为不同级别的活动地块。活动块体内部微弱变形, 或基本不变形。大部分变形发生在块体的边界, 是历史上破坏性地震集中的地区。最近, 综合网络工程与其它数据(1991~2002 年)得到的速度场揭示了中国大陆现今运动的分块特征, 即不同的活动地块具有不同的水平运动和变形方式(王敏等, 2003; Zhu *et al.*, 2000; 王琪等, 2001; Wang *et al.*, 2001; 王小亚等, 2002; 张培震等, 2002a,b)。

位于尼泊尔境内高喜马拉雅地区的 GPS 站点, 以相对于欧亚板块的向北运动为主, 略具向东的分量, 运动速率一般在 35~40 mm/a 之间, 与以前的 GPS 观测结果一致。这一运动方式实际上反映了 50 个百万年来印度板块与欧亚大陆碰撞之后的持续楔入作用, 在地质上则表现为主边界冲断带和山前冲断带向印度平原的逆冲作用。

青藏高原南部晚第四纪构造变形以一系列近南北向正断裂-地堑系, 以及断续的北西-西走向的右旋走滑断裂为主要特征。GPS 揭示出拉萨地块的优势运动方向为 N30°E~47°E, 平均速率为 27~30 mm/a。根据藏南东西部测站速率之差, 推算其东西向拉张速率为 14~15 mm/a, 大于根据活动断裂研究获得的长期平均速率(10 ± 5) mm/a。

青藏高原中部发育数条北西-西走向的左旋走滑断裂, 将青藏地块分割成几个不同形状的次级地块(羌塘、昆仑、柴达木、祁连)。羌塘地块的测站显示出向 N60°E 优势方向的运动, 速率平均在(28 ± 5) mm/a。向北是 GPS 测站较少的昆仑地块, 但昆仑地块以北的柴达木活动地块虽然运动方向与羌塘地块没有太大的差别, 但平均运动速度骤减到 12~14 mm/a。而再向北到祁连山活动地块, 其优势运动方向变为 N70°~90°E, 速度则减小为 7~14 mm/a。所以, 青藏高原内部活动地块的运动方式是分块的, 各块之间或者运动方向不同, 或运动速度不同。

尽管天山远离欧亚碰撞带——喜马拉雅, 活动断裂褶皱十分发育, 天山地区的高强度地震活动表明山体内部发生地壳缩短变形。穿过中天山(81° ~ 85° E)的观测表明, 天山正在经历着向北逐渐递减的构造变形, 速率从南天山的 21 mm/a 减少至北天山的 13 mm/a 左右。天山在这一纬度上的地壳缩短约为 8 mm/a。这一结果与百万年来的平均缩短速率 6 mm/a 基本一致。而西天山境外 GPS 观测推算出的 20 mm/a 跨天山缩短变形, 目前直接测量完全证实了这一估算。跨天山的缩短变形从西到东递减的观测证据, 也与由地质资料建立的理论模型一致。

川滇活动地块位于青藏高原的东南隅, 是中国大陆地震活动最强烈的地区之一。川滇地块的东边界是左旋走滑的鲜水河和小江断裂, 具有 10~15 mm/a 的走滑速率, 错断河谷与山脊。其西南边界是右旋走滑的红河断裂, 长期活动速率平均为 7~8 mm/a。活动构造研究证明, 川滇菱形活动地块具有向南东运动的趋势, 但运动可能是不均匀的。川滇活动

地块北部鲜水河一带运动方向为 $N120^{\circ}\text{E}$ 左右, 而到南部的昆明一带方向变为 $N160^{\circ}\text{E}$. 反映了川滇菱形地块向南南东方向的总体运动和绕东喜马拉雅构造节点的顺时针旋转.

华北活动地块包括鄂尔多斯和华北平原. 位于该地区的大部分站点在欧亚固定参考系下的速率为 $8\sim13\text{ mm/a}$, 方向为 $N90^{\circ}\sim110^{\circ}\text{E}$. GPS 观测结果表明, 鄂尔多斯内部相对稳定, 周边盆地带的运动比较复杂, 西边界向北北东方向运动, 北边界向东运动, 东边界和南边界总体上向南南东方向运动. 尽管存在速率、方向上的差异, 华北总体上表现为均匀应变场. 应变主要集中分布在两个地区: 一个位于北京以北的东西向第四纪断层上, 具有 $3\sim4\text{ mm/a}$ 的左旋相对位移; 另一个位于山西断陷带, 具有 $3\sim4\text{ mm/a}$ 的北西-南东向拉张. 但依据现有的 GPS 观测表明, 横跨其它主要活动断裂和地震带都没有明显的拉张位移, 与地震、地质的结果有所不同. 或许这些活动断裂在过去的 10 年间应变积累很慢, 或整个华北活动地块不完全表现为拉张作用.

华南地区在构造活动上属于比较稳定的地块, 内部不发育明显的活动断裂和褶皱, 地震活动性比较低, 唯东南沿海发育一些晚更新世活动断裂和地震. 上海站 VLBI 测量曾推算, 华南地块以 $(8\pm1)\text{ mm/a}$ 的速率向 $N116^{\circ}\text{E}$ 方向远离西伯利亚. 早期的 GPS 观测结果表明, 华南整体向南南东方向以 $6\sim11\text{ mm/a}$ 的速率运动(周硕愚等, 2000). 目前的结果进一步证实, 华南以 $11\sim14\text{ mm/a}$ 速率沿 $N90^{\circ}\sim120^{\circ}\text{E}$ 方位作整体运动, 华南地块内部的确表现为刚性块体, 少有内部变形.

3 区域地壳构造变形

陈俊勇等(2001)的研究表明, 珠穆朗玛峰地区运动大致为北东东方向. 从 1992 与 1998 年两次 GPS 观测推算, 珠峰地区相对欧亚内部的水平运动速率达 $60\sim70\text{ mm/a}$, 比其他人利用周边站点估算的速率高一倍(马宗晋等, 2001; 王琪等, 2001; Wang *et al.*, 2001). 刘经南、许才军等利用 1993~1997 年 3 期观测资料, 测定了喜马拉雅北缘至柴达木盆地南缘一带的水平和垂直速度场(刘经南等, 2000; Xu *et al.*, 2000a), 结果揭示了青藏地区的地壳运动南北向缩短、东西向拉张的主要活动特征, 青藏高原垂直向隆升也相当可观. 分析表明, 喜马拉雅块体的缩短量大致为 $(19\pm2)\text{ mm/a}$, 藏南地区中段的拉张速率 $(6\pm6)\text{ mm/a}$. 从青藏中部 5 个测站的垂直运动分析, 高原的隆升速率 $(8\pm5)\text{ mm/a}$, 这与 1993~2000 年张为民等(2000)在拉萨用绝对重力观测推算隆升速率为 10 mm/a 基本一致. 而西藏块体相对于柴达木块体的汇聚速率为 $(9\pm5)\text{ mm/a}$, 并伴随有 $(9\pm6)\text{ mm/a}$ 的东向运移, 反映了青藏高原物质向东部地区的侧向挤出. 喜马拉雅块体表现为压应变, 而西藏块体以张应变为主, 青藏中部地区的东西向拉张速率最高达 $(16\pm6)\text{ mm/a}$.

王琪等(2000)基于 1992~1999 年的观测数据, 给出了天山南北汇聚变形的大地测量证据. 其中西天山 400 km 宽地带的汇聚速率在 20 mm/a , 而东天山细窄地带上的汇聚速率不过 4 mm/a . 汇聚速率从西向东递减, 与地形从东西向由宽变窄十分吻合. 塔里木盆地内部基本无变形, 以刚性块体相对西伯利亚做顺时针旋转, 以垂直天山走向推及天山, 产生山前逆掩断层和褶皱. 准噶尔与哈萨克地台存在明显差异运动, 准噶尔在运动学特征有别于哈萨克和其它邻近块体, 可作为独立的构造单元.

许多研究者用 1992~1999 年中国地震局第一地形变监测中心 GPS 观测资料, 研究华北地区的构造运动(江在森等, 2000; 杨国华等, 2001; 许才军等, 2002; Xu *et al.*, 2000b;

Wu *et al.*, 2001). 其中许才军等(2002)的结果显示华北块体以 $3\sim12\text{ mm/a}$ 速率相对西伯利亚运动. 杨国华等(2001)分析了华北地区现今构造应变场的时空变化特征; 而江在森等(2000)用非连续地壳变形方法指出华北东西部应力场的显著差异. 他们都确认华北地区主要表现为压缩变形, 而块体西边界山西断陷带明显有东西向拉张活动.

江在森等利用 1993~1999 在河西走廊地区的 GPS 速度场, 研究青藏高原东北缘地区水平运动(江在森等, 2001). 在欧亚固定的参考框架下, 31 个测站显示出一个南南东向的整体位移, 其速率大约为 9 mm/a . 南部甘青块体运动较快, 而北部阿拉善地块移动要慢得多, 比南部慢 6 mm/a . 海原断层上左旋走滑十分显著, 上世纪曾发生过 8.5 级地震. 该地区西部压应力场方向为北北东, 东部为北东东, 而甘青和阿拉善地区普遍存在北西西的拉张作用.

分析 1991~2001 年青藏地区 GPS 数据和 1998~2000 年相对重力数据, 表明在昆仑山口西 8.1 级地震前, 青藏地区存在大范围的左旋剪切变形, 而且剪切应变最大地区恰位于震源区, 其等值线走向与破裂方向基本一致. 面应变也说明该地区有大范围的拉张, 重力测量反映出很大的自由空气异常变化. 上述情况可以认定, 局部构造变动促成了近 400 km 长的左旋走滑破裂(江在森等, 2003).

陈智良等与美国麻省理工学院合作, 研究了我国西南(川滇)地区的地壳运动特征(陈智良等, 1999; Chen *et al.*, 2000). 他们利用 1991~1997 年多期观测资料, 揭示出西南地区的地壳变形的主要方式——顺时针构造旋转和块体边界断裂的非均匀滑动. 他们的结果显示川滇地块及其以西地区相对成都的运动速度大致在 $5\sim10\text{ mm/a}$, 鲜水河—小江断裂以东的川青地块和扬子地块运动微弱, 幅度为 $1\sim7\text{ mm/a}$. 以上两个地区(川滇、川青)均表现为顺时针的涡旋运动. 没有明显的迹象表明存在地壳物质向东挤出或逃逸. 而基于大地测量反演, 申重阳等(2002)的工作揭示出, 红河断裂和鲜水河断裂吸收了相当部分的地壳变形, 如果变形完全以弹性形式积累, 并主要以地震来释放, 则变形积累的能量每年可沿这些断层产生一个 6 级左右的中等强度地震.

4 活动地块的运动学模型

张强和朱文耀(2000)在 ITRF96 参考框架内, 用 28 个分布在全国及周边地区的 GPS 站, 建立由 10 个地块组成的运动学模型, 给出了每个地块的欧拉矢量, 并从各个地块的运动幅度、方向等方面表明与地质资料给出的模型具有一致性. 符养等(2002)对模型又有进一步改进, 有些大地块被分成几个小块体, 使地块总数达到 15 个, 并利用了更多的 GPS 数据, 以及总数为 79 个测站在 ITRF97 下的速率值.

最近王敏等(2003)建立了一个新模型, 用到 900 个网络工程资料. 模型包括 9 个构造块体、2 个宽变形带, 给出了每个构造单元之间的欧拉极和相对旋转速率. 模型速率与 GPS 实测速率的吻合, 也显示了东亚和中亚大陆存在 3 种类型的变形方式: 第一种表现为分布式的变形, 如青藏高原内部、天山等; 第三种呈现为刚性块体运动与板块类似, 如塔里木、南北地震带以东地区, 其变形主要通过比较窄的边界带变动来调节; 第二种变形方式介于第一、第三种之间, 如青藏高原边缘地带的柴达木、祁连山、西宁和川滇菱形块体.

5 InSAR 技术研究地震变形

王超(2000)、张红等(2001)利用欧空局 ERS1/2 合成孔径雷达卫星资料, 研究 1998 年 1 月 10 日张北-尚义 6.2 级地震。他们采用三轨差分技术, 获得了本次地震的同震位移场。从视向形变图分析, 本次地震位于 $114^{\circ}20' E$ 、 $40^{\circ}57' N$, 其最大视向位移量达 25 cm, 同震变形场涉及 300 km^2 的范围。基于弹性半空间模型反演 InSAR 干涉图像, 求取最佳震源参数。其结果显示, 本次地震破裂发生在一个向南倾 30° , 走向 $N95^{\circ} E$ 的 12 km 长、14 km 宽、7.5 km 深的右旋逆倾滑平面上。同震走滑量约为 0.73 m, 地震能量约为 $2.7 \times 10^{18} \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

单新建等(2002)最近用欧空局 ERS1/2 SAR 资料, 研究 1997 年 11 月 8 日玛尼 7.6 级地震的变形场。同样利用 3 轨差分技术, 获取了 150 km 长覆盖整个地表破裂的变形干涉图像。根据 InSAR 资料, 本次地震最大水平位移达 8 m。其中主震破裂可分为 4 段, 中间两段分别长约 27 和 37 km, 深 35 km, 具有较大的同震位移, 平均滑动量分别为 6.5 和 6 m。与中段比, 两端的地震位移相对较小, 东西两端的破裂长度分别为 26 和 23 km, 破裂深度分别为 18 和 20 km, 前者滑动量为 5.8 m, 后者为 4 m。

6 结论

经过 10 多年的努力, 我们对东亚、中亚地区的现今构造变形幅度、分布、性质等基本特征的认识已初步形成。这在很大程度得益于 GPS 观测技术广泛应用, 以及“中国地壳运动观测网络”的建设, 而 InSAR 技术应用于国内地震变形监测也丰富了断层变形研究形式和内涵。目前不同研究者所取得的成就, 充分展示了空间技术在推动本领域发展所发挥的关键作用, 中国大陆构造变形的定量化研究从总体看, 跃上了一个新台阶。

参 考 文 献

- 陈俊勇, 王泽民, 庞尚益, 等. 2001. 论珠穆朗玛峰地区地壳运动[J]. 中国科学(D辑), **31**(4): 265~271
- 陈智良, 张选阳, 沈凤, 等. 1999. 中国西南地区地壳运动的 GPS 监测[J]. 科学通报, **44**(8): 851~854
- 符养, 朱文耀, 王小亚, 等. 2002. 利用中国地壳运动观测网络研究中国大陆相对于 ITRF97 板块模型形变[J]. 地球物理学报, **45**(3): 330~337
- 江在森, 张希, 陈兵, 等. 2000. 华北地区近期地壳水平运动与应力应变场特征[J]. 地球物理学报, **43**(5): 657~665
- 江在森, 张希, 崔笃信, 等. 2001. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报, **44**(5): 636~644
- 江在森, 张希, 祝意青, 等. 2003. 昆仑山口西 $M_{s}8.1$ 地震前后区域构造变形背景[J]. 中国科学(D辑), **33**(增刊): 163~172
- 刘经南, 许才军, 宋成骅, 等. 2000. 精密全球卫星定位系统多期复测研究青藏高原现今地壳运动与应变[J]. 科学通报, **45**(24): 2 658~2 663
- 马宗晋, 陈鑫连, 叶叔华, 等. 2001. 中国大陆区现今地壳运动的 GPS 研究[J]. 科学通报, **46**(13): 1 118~1 120
- 牛之俊, 马宗晋, 陈鑫连, 等. 2002. 中国地壳运动观测网络[J]. 大地测量与地球动力学, **22**(3): 1~7
- 乔学军, 王琪, 杜瑞林, 等. 2002. 昆仑山口西 $M_{s}8.1$ 级地震的地壳变形特征[J]. 大地测量与地球动力学, **22**(4): 6~11
- 单新建, 马谨, 王超, 等. 2002. 利用星载 D-InSAR 技术获取的地表形变场提出玛尼地震震源断层参数[J]. 中国科学(D辑), **32**(10): 837~844
- 申重阳, 王琪, 吴云, 等. 2002. 川滇菱形块体主要边界运动模型的 GPS 数据反演分析[J]. 地球物理学报, **45**(3): 352~361
- 王敏, 沈正康, 牛之俊, 等. 2003. 现今中国大陆地壳运动与活动块体模型[J]. 中国科学(D辑), **33**(增刊): 21~32

- 王琪, 张培震, 牛之後, 等. 2001. 中国大陆现今地壳运动与构造变形[J]. 中国科学(D辑), **31**(7): 529~536
- 王琪, 丁国瑜, 乔学军, 等. 2000. 天山现今地壳快速缩短与南北地块的相对运动[J]. 科学通报, **45**(14): 1 543~1 547
- 王小亚, 朱文耀, 符养, 等. 2002. GPS 监测的中国及其周边现时地壳形变[J]. 地球物理学报, **45**(2): 198~209
- 王超, 刘智, 张红, 等. 2000. 张北-尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量[J]. 科学通报, **45**(23): 2 550~2 554
- 许才军, 董立祥, 施闯, 等. 2002. 华北地区 GPS 地壳应变能密度变化场及其构造运动分析[J]. 地球物理学报, **45**(4): 517~526
- 杨国华, 谢觉民, 韩月萍. 2001. 华北主要构造单元及边界带现今水平形变与运动机制[J]. 地球物理学报, **44**(5): 645~653
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002a. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块[J]. 地学前缘, **9**(2): 430~440
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002b. 青藏高原现今构造变形特征与 GPS 速度场[J]. 地学前缘, **9**(2): 441~450
- 张为民, 王勇, 许厚泽, 等. 2000. 用绝对重力仪检测青藏高原拉萨点的隆升[J]. 科学通报, **45**(20): 2 213~2 216
- 张强, 朱文耀. 2000. 中国地壳各构造块体运动模型的初建[J]. 科学通报, **45**(9): 967~973
- 张红, 王超, 单新建, 等. 2001. 基于 InSAR 差分干涉测量的张北-尚义地震震源参数反演[J]. 科学通报, **46**(21): 1 837~1 840
- 周硕愚, 吴云, 秦小军, 等. 2000. 基于多种 GPS 数据研究福建及邻近海域 1994~1997 年地壳水平运动[J]. 地球物理学报, **45**(3): 352~361
- Chen Z, Burchfiel B, Liu Y, et al. 2000. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation[J]. *J Geophys Res*, **105**: 16 215~16 227
- Wang Qi, Zhang Peizhen, Freymueller J, et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by Global Positioning System measurements[J]. *Science*, **294**: 574~577
- Wu Jichang, Xu Caijun, Chao Dingbo, et al. 2001. Research on an intraplate movement model by inversion of GPS data in north China[J]. *J Geodynamics*, **31**: 507~518
- Xu Caijun, Liu Jingnan, Song Chenzhong, et al. 2000a. GPS measurement of present-day uplift in the southern Tibet[J]. *Earth Planet Space*, **52**: 735~739
- Xu Caijun, Liu Jingnan, Chao Dingbo, et al. 2000b. Preliminary study of block rotation model in north China area using GPS measurements[A]. In: Schwarz P ed. *Geodesy Beyond 2000: The Challenges of the first decade*[C]. Berlin: Springer-Verlag Berlin, 295~303
- Zhu Wenyao, Wang Xiaoya, Cheng Zhongyi, et al. 2000. Crustal motion of Chinese mainland monitored by GPS[J]. *Science in China (D)*, **43**(10): 394~400

CURRENT CRUSTAL MOVEMENT IN CHINESE MAINLAND

Wang Qi

(Institute of Seismology, China Seismological Bureau, Wuhan 430071, China)

Abstract: The quantification of tectonic deformation in the Eastern and Central Asia is of great significance for the study on global plate motion and lithospheric dynamics. In the past four years, the velocity field of horizontal crustal movement for the Chinese mainland has been established for the first time thanks to the intensified GPS measurements and its improved accuracy. The velocity field derived from GPS measurements delineates the patterns of tectonic deformation in Chinese mainland in the unprecedented detail, and thus reveals the new features of the ongoing tectonic process resulted from the collision of India plate to Eurasia plate. Meanwhile, the surface offset induced by two strong earthquakes occurred in Chinese mainland was sampled precisely using InSAR technique.

Key words: current crustal movement; GPS; Chinese mainland