

文章编号: 1009-3850(2004)04-0089-07

新技术, 新挑战 ——GPS 在青藏高原等地区地质研究中的应用

B. C. Burchfiel

(Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology,
Cambridge, Massachusetts 02139, USA)

新技术应用到地学领域所获取的新的科学数据有助于我们加深对地质过程的理解。同时, 我们解释地质过程的研究方法也受到新技术资料的挑战, 从而迫使我们用新的或不同的方法来研究这些地质过程。在此, 我想对某些资料进行讨论, 这些都是热门的研究领域。当然, 作为一个野外地质工作者, 我的理解有限。工作的确尚在进行之中, 其潜在的结果将促使我们通过新方法着眼于浅部地壳结构及其与深部岩石圈过程的关系。我们所讨论的技术是 GPS(Global Positioning Systems), 资料主要来自中国, 但类似资料分析的问题在其他地区仍然存在。

自 1986 年至 1995 年, 在我们与成都地质矿产研究所合作的野外地质研究中, 我们提出关于青藏高原东部晚新生代到现代的构造框架的工作设想。在此, 我要感谢我在成都地质矿产研究所的合作伙伴陈智梁在过去 17 年间的持续合作。这个设想包括的 GPS 研究, 在当时还在拓宽它的应用范围, 被认为是一种新的、非传统的技术。虽然只用了几年时间进行定期的 GPS 测量, 但已获得初步的成果。

我们讨论的第一个研究区域是青藏高原东部。青藏高原东部的地形与其北缘及南缘迥然不同, 后者有连续的陡峻的地形前缘(图 1)。高原东部有两个无明显地形边界的、连续的长斜坡, 其间被四川盆地西部龙门山陡峭的前缘所分隔。我们的构造假设主要来自野外研究, 认为青藏高原东部构造框架由三个不同的晚新生代和活动变形区组成(图 2)。在东北部, 沿着东—北东向的左旋阿尔金断层的位移转换为祁连山的北东—南西向缩短。向东, 缩短方向更趋近于东西向, 左旋的东西向走滑断层转换为南北向构造上的南北向缩短。在中部, 龙门山相对于

四川盆地上升了 6km, 成为青藏高原周缘最陡峭的山前带。野外研究表明, 这一山前带及其以西的高原并非因上地壳缩短而形成, 该区的高原东部与其前陆低速向东运动(Burchfiel et al., 1995; Chen et al., 2000)。最后, 在西南部, 没有显著的地形突变来确定高原的东缘。该处地壳具有活动的、向东凸出的左旋走滑断层, 而这些断层以西的地壳则相对于华南围绕东喜马拉雅构造结顺时针旋转(Wang et al., 1998)。

我们在青藏高原东部的 GPS 研究支持和修正了我们的构造解释(Chen et al., 2000), 并迫使我们寻求新的构造解释。在此, 我要感谢我的同事们杰出的工作, 他们是麻省理工学院的 Bob King 和成都地质矿产研究所的张选阳。这些 GPS 数据在今后几年甚至几十年内仍可利用。而且, 我们的地质研究表明现在的体系至少在过去 4~6Ma(某些地区甚至更长)以来均在活动。特别有意义的是 GPS 数



图 1 从东往西俯视青藏高原东部, 数字化高程模式图象显示, 高原东部边缘与高原北部和南部边缘的陡峭地形前缘相比较, 二者具完全不同的地形



图2 青藏高原东部及邻区晚新生代—现代构造略图

箭头①表示印度和高原东北部相对于欧亚、高原东南部相对于华南的地壳断片的运动；箭头②表示左旋走滑断层；箭头③表示右旋走滑断层；箭头④表示缩短构造；箭头⑤表示伸展构造。EHS. 东喜马拉雅构造结

据与地质资料结合的意义,这是我的讲演的重点。

在龙门山中部,以华南为参考框架,地质和GPS数据表明高原的部分地段与华南一起向东移动,实际上不能用缩短来说明了地形边缘以西的高原的形成(图3)。当我们进入该区调查时,根本没有想到要提出检验这种解释。主要基于 Royden (1996) 的工作,我们提出一种解释,认为在高原中央的重力势能的驱动下,下地壳向东流动,并通过下地壳的膨胀加厚导致了青藏高原东部的地形升高。横切龙门山南部的剖面显示龙门山前缘及其以东在晚新生代只有少量缩短(图4)。龙门山陡峭的地形前峰,是由于邻近的四川盆地之下强度大而缺少韧性的地壳阻挡地壳向东流动的结果。韧性下地壳在高原边缘出现上涌,造成非补偿的局部地形起伏。大部分下地壳围绕四川盆地之下的弱韧性下地壳侧向流动,形成向北和向南地形梯度较缓的宽阔区域(图1)(Clark and Royden, 2000)。Lebedev 和 Nolet (2003) 对地幔层析成像的最新工作表明,四川盆地之下存在高速的、可能冷而弱韧性的岩石圈,深度为150km,而且可能深达350km以下。

但是,挑战随之而来。假如这个解释是正确的,

很少有来自地表地质的资料能提供深部变形的直接证据或分析高原高度以往的变化。我们得到来自 Kirby et al. (2002) 和 Clark (2003) 的证据,表明过去大约5~12Ma 中高原东部在隆升。我们在陡峭的龙门山前缘进行的构造和地质年代学研究表明,这些地方的断层在晚新生代主要是垂直位移(Burchfiel et al., 1995)。然而,如果我们研究老的山系,则没有地形、年轻或活动断层方面的资料以及GPS数据。那么,我们还能识别如此重要的构造作用和构造区吗?

高原东北部的GPS数据揭示了另一个以前未认识的问题(图3)。何处为与华南一起运动的龙门山高原的西部边界?这是我们以前从未考虑过的问题,直到GPS数据显示高原东部可能需要一个西部边界。在龙门山以西,初步的GPS数据显示出一条大致呈北东方向的边界,每年有8~15mm的活动的右行剪切。其实我们并没有设置网络控制边界位置,因为这个结果并非我们所预料的。现在我们对这个区域加密了网络以便更清楚地确定此边界,但数据结果还不能利用。这些数据还给野外工作者另一个挑战:在任何中国地质图上并没有这个构造,地

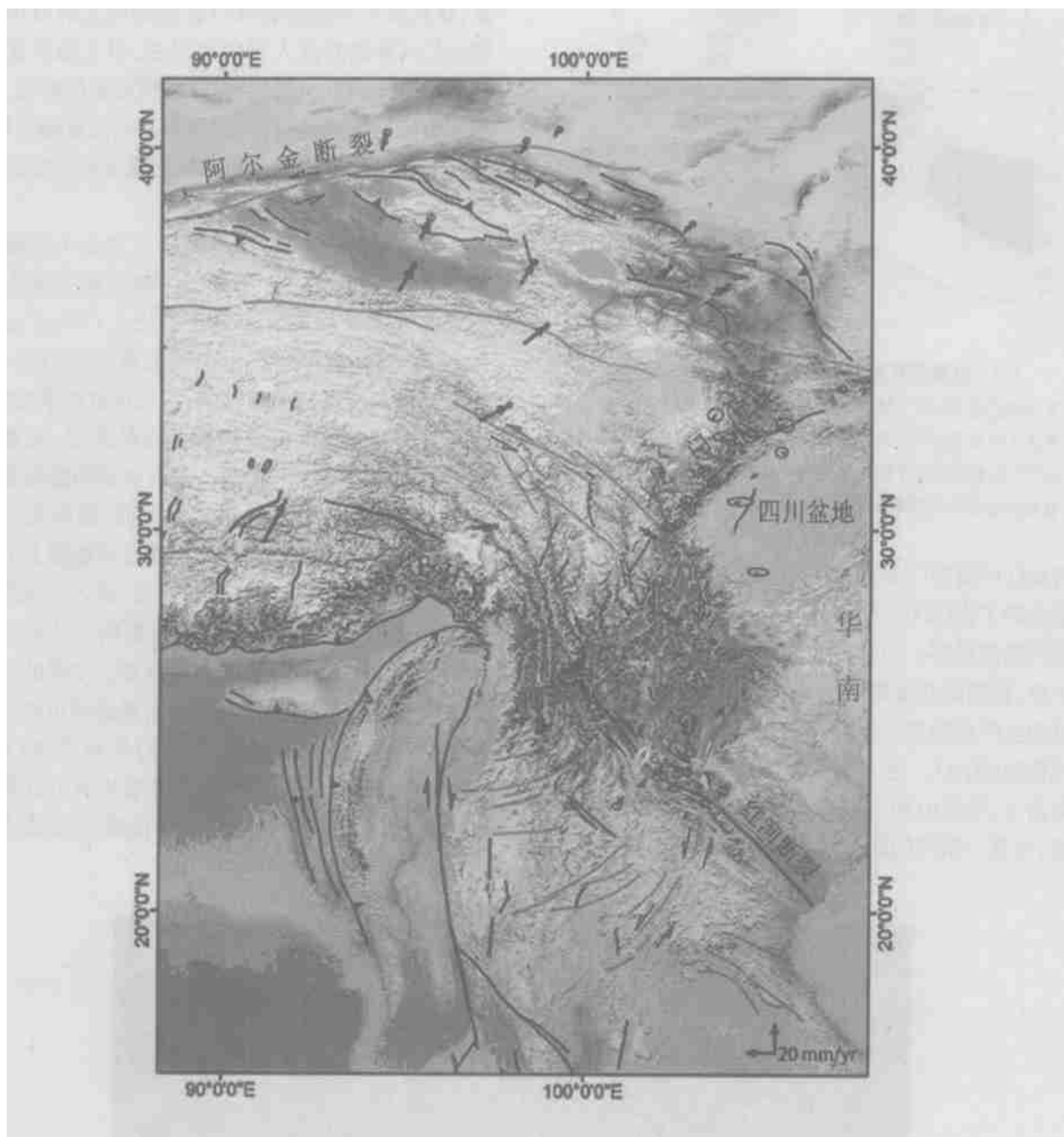


图 3 青藏高原东部及邻近前陆地区叠置了相对于华南的 GPS 速率的构造图(图 2), GPS 速率显示青藏高原龙门山部分和华南一起运动,沿着龙门山陡峭的地貌前缘在误差范围内并没有缩短。这些 GPS 数据显示出没有与之有关的地表构造的龙门山以西的速度梯度(浅色区)

形或卫星照片也没有证据支持这一边界存在的假设。它提出了陆壳在没有发育贯通构造时能吸收多少应变,以及我们在老的地质记录中是否认识到这样的应变的问题。

一个有关的问题存在高原东南部,即向东凸出的弧形断层所限定的地壳断片围绕东喜马拉雅构造结以每年约 10 mm 的速度相对于华南顺时针旋转, Wang (1994) 描述过这个现象,并为 GPS 测量所核

实(King et al., 1997, Chen et al., 2000)。旋转地壳断片的东部边界的左旋断层系界限清晰,但在东南,断层分了几个分枝,并以众多扩张拉分盆地为标记(Wang et al., 1998, 图 3)。断层系统的总位移约为 60km。在红河以北 100km 附近,总位移仍然约为 60km,但出现许多分枝,而不像其北部的单一的断层。然而,在红河以北 100km 内,这些分支断层的左旋走滑位移向南减少,仅少数断层延伸到北西向的



图 4 从青藏高原到四川盆地最南部的剖面略图
显示通过地壳的展平加厚导致韧性的中、下地壳向东流动, 使高原之下的地壳加厚。来自高原中部的向东流动, 遭遇四川盆地之下弱韧性地壳并使其围绕四川盆地周围流动, 形成向四川盆地的北部和南部缓倾斜的高原表面

右旋红河断裂(Wang et al. , 1998); Schoenbohm 等最近的工作(2003)表明没有一条这样的分支断层使红河断裂错移。而且尽管这些分支断层向南减少了位移, 横穿南北走向左旋断裂系的地理界限这一部分的红河断裂显示出突出的左移弯曲, 约有60km的视偏差(图 5)。在大地卫星影象上, 不仅红河断裂弯曲了, 哀牢山和更南的构造单元都弯曲了。再向南, 出现一系列的北东向的左旋断层和一些北西向

的右旋断层, 并且进一步向南进入印支半岛。很明显, 在高原东南部限制顺时针旋转地壳的剪切延伸穿过红河断层并深入到中南半岛, 但上地壳变形的性质沿着走向有所变化, 即从断续分布的断层, 到小断层组成的宽阔地带, 再到没有断层的宽阔剪切带, 最终到北东向左旋和一些共轭右旋断层组成的宽阔地区。

我们最近的 GPS 结果证实了对这个区域的活动变形的解释(图 3), 而我们的地质研究推断这种变形的方式至少有 4 ~ 6Ma 的历史(Wang et al. , 1998)。这些数据所产生的挑战要使我们明白, 地壳是如何调节宽阔的剪切的: 可以使红河断裂弯曲, 也可在其相邻地区没有断续分布的断层、明显的破裂或其他吸收形变的构造。红河断裂的偏移部分显示其最显著的右行走滑活动。因而, 在南北向剪切带内的逆时针旋转增加了北西向红河断裂上的右行走滑, 并形成不连续的地壳边界带, 带内不同的性状似乎是受统一的、均一的剪切的影响。从地表地质来看, 在华南构造格局中, 红河断裂是主要的右旋活动走滑断层。我们的研究显示右旋活动可能与南北向剪切带的逆时针旋转有关。野外地质和 GPS 数据均与此解释相吻合, 但地壳弯曲的调节过程仍未解决。因此, 对野外地质提出了挑战: 是否在老的造



图 5 红河中部地区的大地卫星图像, 南北向的鲜水河-小江断裂系(白色)的左旋位移逐渐消失, 而剪切却越过红河断裂(黑色)、哀牢山和更南的构造继续延伸, 使这些构造弯曲而无明显的地表剪切构造痕迹。红河断裂以北两个明显的活动右旋断层也用黑色表示。

山带认识了这种关系。如果区域内存在特定的某类岩石,通过古地磁研究是非常有用,它可以确定旋转是怎样完成的。更进一步的问题是:在深剥蚀的造山带,这些构造在深部又是怎样的。

如果从更广泛的方面来看,构造和 GPS 分析结果本身的其他挑战亦存在。以固定的欧亚框架为参照来研究 GPS 结果,所有华东部分,包括青藏东部的龙门山,均围绕远离华东的旋转极向东—南东移动(图 6)。我们的初步解释认为地壳围绕东喜马拉雅构造结旋转的驱动力来自印度向北楔入到欧亚大陆和青藏高原中央的重力势能。但在南部,地壳运动越来越受到来自印缅俯冲带的牵引力的影响,上地壳的伸展构造越来越广。我们认为,这样的运动表明,上地壳的构造和运动与深部的岩石圈的运动是折离的。华南相对于欧亚大陆向东到南东的移动可能是深部岩石圈运动的结果,而上地壳构造则是由深部岩石圈所带动的。我们与成都地质矿产研究所布设于青藏东南及其东南前陆的露天的宽频地震网络使检验这些解释成为可能。在欧亚大陆参考框架内来看,东—南东移动是朝着复杂的太平洋—东南亚板块边界的,并可能在一定程度上受这个边界的动力所驱。在这个尺度下,整个东南亚复杂的海域地区,即伸展的大洋和大陆盆地以及不规则俯冲带

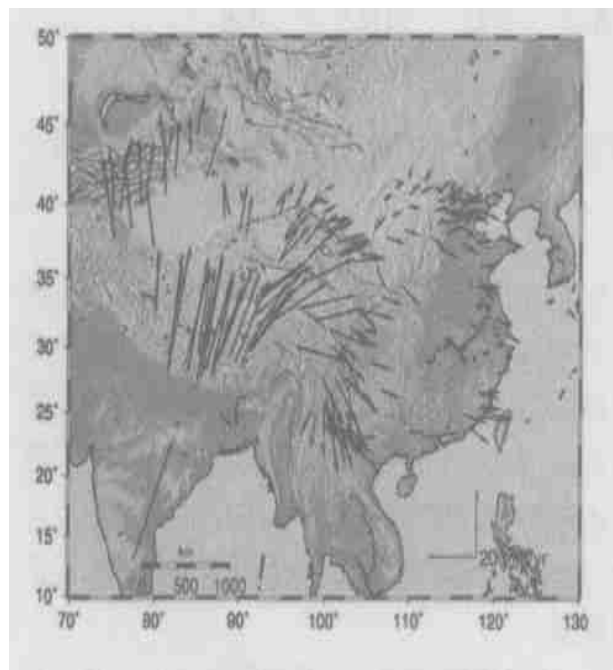


图 6 在欧亚参考框架下的中国和尼泊尔 GPS 速度图显示青藏高原东部(龙门山地区)总体以相同的速率向东南东运动,高原东南部与华东地区的地壳断片作顺时针方向旋转。数据来自 Abdurakhmatov et al. (1996), Chen et al. (2000), T. Her-ring (2003, 私人通讯), Shen et al. (2000) 和 Wang et al. (2001)

所在的位置,与印度-欧亚大陆碰撞带以北的陆间会聚区一般大甚至更大。这两个区域的概念可以有所不同,然而又是“推”和“拉”互相联系的两个区域。二者之间的边界漫长而复杂,并位于东南亚的陆地内。

使用 GPS 新技术,我们面临的挑战包括以下问题:首先,在青藏东南,地壳运动的方向和速度能确定,但我们很难解释,在构造填不出图来,而剪切形变又是连续的局部地区,上地壳变形是如何被调节的。第二,在这样的区域深部地壳构造又是如何的?第三,没有 GPS 数据,则很难确定上地壳地域向东—东南移动,以及它与深部岩石圈运动的折离。

这里提出的问题也有许多不同的表现。类似的剪切和断层迹线以及邻近地壳岩石的弯曲在其他区域也见到。例如, McClusky et al. (2001) 等的 GPS 速度场(图 7)表明,贯穿美国西部之东莫哈韦沙漠和内华达山脉东部的北—北西走向的右行剪切,使东西走向左旋的 Garlock 断层的东部(Miller et al., 2001),以大约每年 11mm 的速度逐渐右旋剪切弯曲。除死谷南部断层带外,这里的弯曲很像北—北西走向右行走滑的红河主体断裂的弯曲,但没有切割 Garlock 断层。古地磁研究在定义变形如何被调节方面非常有用(例如,见 Schermer et al., 1996),但地壳剪切的机制仍然不清楚。

上地壳剪切的不同表现出现在希腊和土耳其西部。 McClusky et al. (2000) 的 GPS 新数据给出了东地中海的地壳运动速度。爱琴海的 GPS 速度在误差范围内都相等,并显示爱琴海地壳作为缺少重要内部变形的单一的小地壳断片而移动(图 8)。北西和北东方向边界有明显不同:在西边,为希腊本土内的水平剪切、伸展带;在东边,如 GPS 速度梯度显示的那样,是水平剪切和伸展的混杂带。北安纳托利亚断层带在北边限定了爱琴海地壳,该断层带在爱琴海北部及其在爱奥尼亚海的 Kefalonia 断层带的西延部分界限均很清晰。该断裂系以每年约 25mm 的速度右行剪切,但在穿越希腊本土的地段,没有连续的断层系,而主要为西—北西和东西向斜列的地堑,如科林斯地堑,形成约 100km 宽、走向和主剪切带斜交的带(McKenzie, 1978; Goldsworthy et al., 2003)。爱琴海地壳的东部边界位于土耳其西部由东西走向的地堑组成北西走向的地带,但没有左行剪切的转换伸展带出现。最近, Dimitris Papanikolaou 和 Leigh Royden (2003, 私人通讯)基于伯罗奔尼撒半岛地质填图,提出爱琴海作为单一地

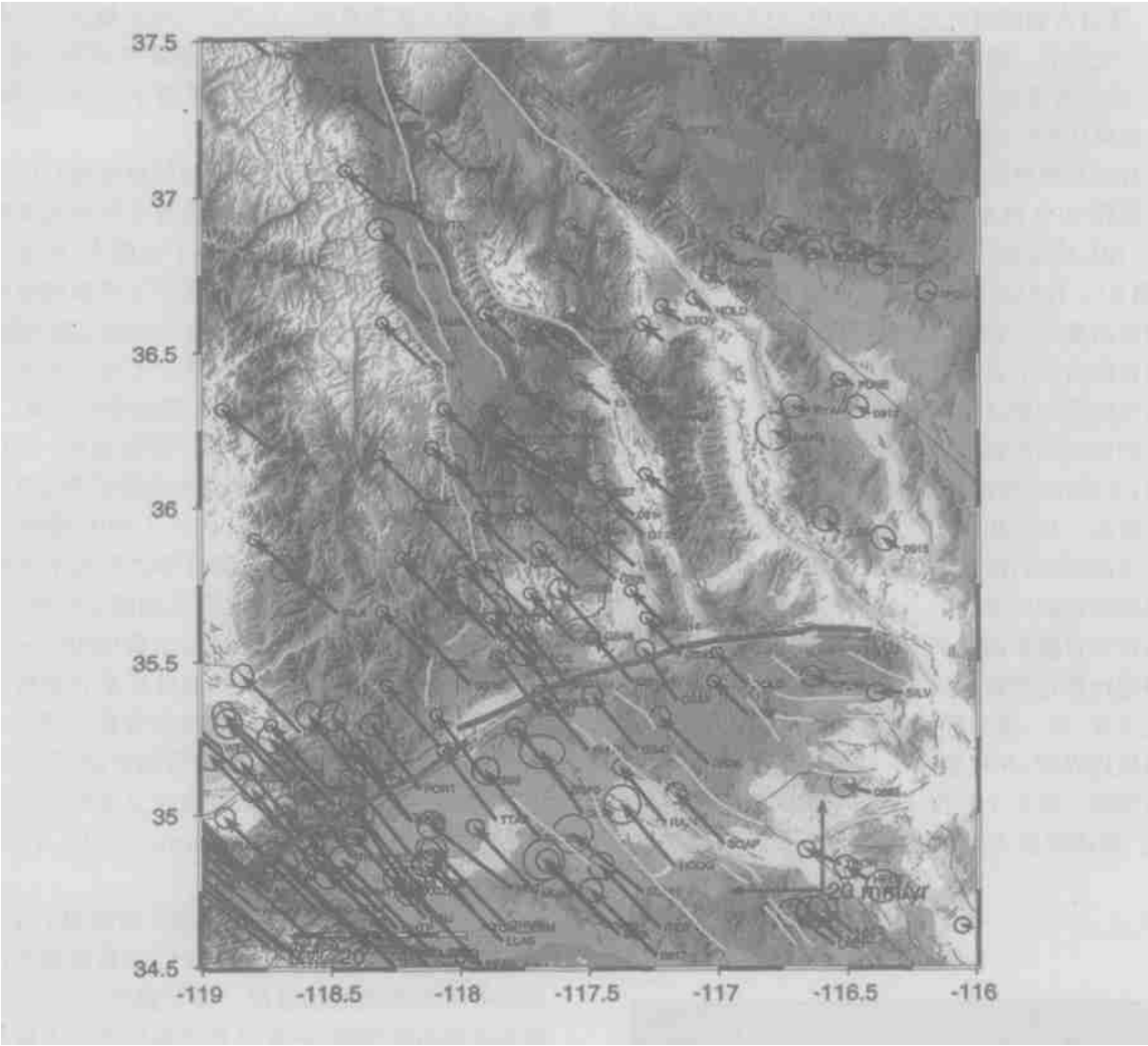


图 7 内华达南部和加利福尼亚东南部相对于北美的 GPS 速率场(S. C. McClusky, 2003, 私人通讯)。Garlock 断层为北东-南西西向,主要的北北西向断层为右旋活动断层

壳断片移动,时代较新,大概为上新世—第四纪,因而中断了该区在新生代时较为典型的位于俯冲板片之上的弧后扩张的长期历史。对野外地质的挑战是,在没有 GPS 和地震数据的情况下,如何确定希腊和土耳其这部分的地表构造——将之识为重要的穿透剪切的表现。进行地表构造填图的地质工作者,可能遭遇到了这些重要的但又没有在区域框架中起作用的复杂的构造。穿过希腊和土耳其本土的这些构造的深部表现是一个值得研究的构造问题。

在老的造山带,如缺乏有效的 GPS 数据,宽阔的区域剪切、局部的复杂构造和地表不连续的剪切带之间还能建立联系吗?只要我们系统地研究这里特别讨论的现代剪切带的变形模式及其上地壳表现,那么,我的回答是肯定的。也需要认识这些活动

剪切带的深部地壳表现,只有这样才能识别出与更老、更深剥蚀造山带剪切有关联的构造。这样的资料将来自大地测量、地质、地球物理和古地磁研究的结合。相反,现在暴露在老的造山带中的老的深部地壳剪切带的野外研究,也能加深理解上述由与 GPS 有关的研究揭示的活动的深部地壳过程,提供借鉴。

众所周知,在各类地质研究中, GPS 已成为日益重要的工具。我的观点是:对于野外地质工作者,它也是极端重要的工具。它产生新类型的数据需要与野外研究结合,不仅能解决局部问题,也能解决区域问题。呈现在我们面前的是一种新技术,并带来新的、重大意义的地质挑战!

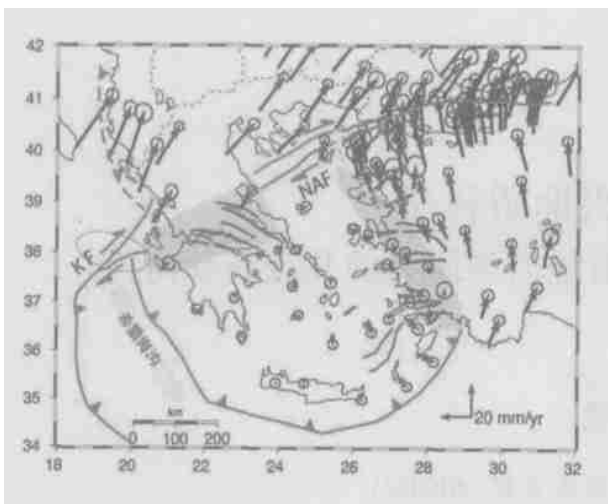


图8 相对于爱琴海区域最小化速率的GPS速率图 KF为右旋的Kefalonia断层; NAF为北安那托利亚断层。阴影区为GPS速率梯度确定的弥散边界。中部短线为正断层

致谢:在中国进行的本研究得到美国国家科学基金大陆动力学计划(EAR 961497 and EAR 0003571)的资助。并得到成都地质矿产研究所过去17年来历任所长刘宝、潘桂棠和丁俊卓越而持续的支持,对他们的支持我非常感激!本文还承蒙Bob King, Leigh Royden, 和 Brian Wernicke 提出许多建议,谨此一并致谢!

参考文献(略)

经原作者同意,译自于《GSA TODAY》2004年2月,廖忠礼译,陈智梁校。

副标题为编辑所加。

(上接第98页)

- [1] 刘东生. 开展“人类世”环境研究, 做新时代地学的开拓者——纪念黄汲清先生的地质创新精神[J]. 第四纪研究, 2004, 24(4): 369—378.
- [2] ZHANG P, MOLNAR P, DOWNS W. Increased sedimentation rates and grain sizes 2—4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates[J]. Nature, 2001, 410: 891—897.
- [3] SCHWARTZ P, RANDALL D. An abrupt Climate change scenario and its implications for United States national security. www.gbn.org, 2004.
- [4] 陈智梁, 孙志明, Leigh H. Royden, 等. 四川泸定普格达组的堰塞湖成因及其意义[J]. 第四纪研究, 2004, 24(6) (印刷中).
- [5] 范宏喜. 强国富民安天下——我国地质环境保护五年回眸. www.cgs.gov.cn, 2004.
- [6] GRADSTEIN F M, OGG J G, SMITH A G et al. A new Geologic Time Scale with special reference to Precambrian and Neogene[J]. Episodes, 2004, 27(2): 83—100.
- [7] 刘东生. 第四纪科学发展展望[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 165—176.
- [8] 程裕淇, 等. 中国大百科全书·地质学[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993. 169—172, 565—568.
- [9] 徐钦琦. 青藏高原首次出现的古生物证据及其对全球的影响[A]. 中国青藏高原研究会, 等. 中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文选[C]. 北京: 科学出版社, 1992. 296—301.
- [10] 陈智梁, 潘桂棠. 青藏高原陆内造山作用——晚新生代地质构造[A]. 肖序常, 李廷栋, 等. 青藏高原的构造演化与隆升机制[C]. 广州: 广东科技出版社, 2000. 191—236.
- [11] CAVAZZA W, WEZEL F C. The Mediterranean region — a geological primer[J]. Episodes, 2004, 26(3): 160—168.