

基于 GPS 的青藏块体东北缘现今地壳水平运动研究

李天文^{1,2}, 梁伟锋³, 李军锋², 龙永清², 王庆良³, 崔笃信³

(1. 西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 西北大学城市与资源学系, 陕西 西安 710069;
3. 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安 710054)

摘 要:以“中国地壳运动网络观测”工程 1999~ 2001 年 GPS 观测数据为基础, 应用 GAMIT/GLOBK 软件对数据进行精密解算, 获得了青藏块体东北缘 1999~ 2001 年相对于欧亚板块的水平运动速度场。结合板块构造和大地动力学理论, 分析了该地区地壳水平运动特征, 主要得出了以下结论: ①青藏块体地壳运动的东北边界应为海原断裂带和祁连山北缘断裂带; ②甘青块体西侧子块体以北东向运动挤压和地壳缩短为主, 东部子块体以整体顺时针旋转为主; ③鄂尔多斯块体可能存在逆时针旋转运动, 其旋转速度在块体西南侧的六盘山断裂处一带最大, 向北至块体西北部明显减小。

关键词:青藏块体东北缘; 地壳水平运动; GPS

中图分类号:P546 **文献标识码:**A

素有“世界屋脊”之称的青藏高原, 是全球海拔最高的一个巨型构造地貌单元, 也是当今世界上最年轻、最活跃的高原。青藏高原地处亚欧板块与印度板块的交界处, 自两大板块发生碰撞挤压以来, 不仅引起青藏高原的大幅度隆升, 同时导致强烈的水平构造运动, 成为中国大陆地壳运动的主要力源。青藏高原及其周边山系是全球最有典型意义的大陆地质构造带, 也是研究大陆地壳形变最好的天然实验室^[1-4]。

地处甘青地块、阿拉善地块、鄂尔多斯地块、南华地块和塔里木地块交界带的青藏块体东北缘是中国大陆重要的活动构造边界, 区内发育一系列高山、压陷盆地和走滑活动断裂等典型构造, 是研究青藏高原纵向挤压隆起和横向伸展运动的重要窗口, 也是研究块体相互作用的理想地区之一^[5-7]。多年来, 国内外众多专家学者对该地区构造特征和地震孕育机制等问题进行了广泛深入的研究, 并就祁连山断裂带的挤压推覆构造, 毛毛山—海原断裂的左旋走滑运动等问题取得了共识, 但在青藏块体东北

缘边界带划分以及块体旋转问题上仍存在分歧。例如, 在青藏块体边界带的划分上, 部分学者从地质历史上断层活动与块体运动出发, 倾向于将海原断裂带北侧的古浪—天景山断裂划分为青藏块体东北缘的边界断裂^[8], 但一些研究结果表明实际地壳运动情况与之不完全吻合。近十年来, 随着 GPS 空间对地观测技术的不断完善和广泛应用, 国内外学者在利用 GPS 观测研究中国大陆和青藏高原地壳运动方面做了大量工作。利用 GPS 观测资料, 江在森等计算了相对区域中心基准的 GPS 地壳运动速度场, 并发现甘青块体与阿拉善块体有相对旋转运动^[9]; 张晓亮等利用 DDA 模型模拟研究了青藏块体东北缘的 GPS 地壳运动特征^[10]。但以上研究存在的一个突出问题是 GPS 观测站点较为稀疏, 所得结果无法真实刻画出青藏块体东北缘地壳水平运动的细节。基于此, 本文选用“中国地壳运动网络观测”工程 1999~ 2001 年 GPS 观测数据, 通过 GAMIT/GLOBK 软件的精密解算, 获得了青藏块体东北缘 1999~ 2001 年水平运动速度场, 并结合板块构造和

收稿日期(Received date): 2005- 01- 03; 改回日期(Accepted): 2005- 03- 15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(40271089), 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目。[Supported by the National Natural Science Foundation of China, No.40271089; Supported by the National Key Project of “Observation Network of Chinese Crustal Movement”.]

作者简介(Biography): 李天文(1957-)男, 陕西户县人, 西北大学城市与资源学系副教授, 多年来一直从事全球定位系统与变形监测方面的研究。[Li Tianwen(1957-), Associate professor of Northwest University, specialized in Global Position System(GPS) and deformation monitoring. E-mail: p_o_s_t@163.com]

大地动力学原理对结果进行了分析。通过青藏块体东北缘地壳水平运动特征的研究, 希望能够澄清目前在青藏块体东北缘地壳运动认识方面存在的一些分歧, 为中国西部地区现代大地动力学研究以及地震预测提供依据。

1 研究区域概况

研究区位于 $92^{\circ}00' \sim 114^{\circ}00' \text{ E}$ 、 $32^{\circ}00' \sim 42^{\circ}00' \text{ N}$ 之间的青海、甘肃的河西走廊、祁连山区以及陕西、宁夏的广大地区, 位于甘青地块、阿拉善地块、鄂尔多斯地块、南华地块和塔里木地块交界带——青藏块体东北缘, 是中国大陆重要的活动构造边界(图 1)。区内发育一系列高山、断陷盆地和走滑活动断裂等典型构造, 为历年来地震的多发区, 是研究青藏高原纵向挤压隆起和横向伸展运动的重要窗口, 也

是研究块体相互作用和地震过程的地壳形变运动的理想地区之一。青藏块体东北缘的北部为阿拉善坚硬地块, 以东为鄂尔多斯地块, 它们都是相对稳定的块体。在龙首山和祁连山之间是河西走廊盆地, 区内发育了一系列弧形构造带: 阿尔金断裂带、祁连山断裂带、龙首山北侧断裂带、海原断裂带、六盘山断裂带、香山—天景山活动断裂带、西秦岭断裂带、烟筒山活动断裂带和牛首山—罗山活动断裂带等。这些弧形断裂带在第四纪, 乃至全新世均有强烈的活动, 控制了区内的新构造演化、地貌格局与地震活动等。值得注意的是, 这些弧形断裂带处在一个特定的大地构造部位, 从图 1 上不难看出, 青藏块体东北缘弧形构造带是青藏、鄂尔多斯和阿拉善三个镶嵌块体之间的重要活动构造带。因此, 对其形成的动力学环境和过程的研究不但具有十分重要的意义, 而且也可以帮助解释该区内地壳运动的原因。

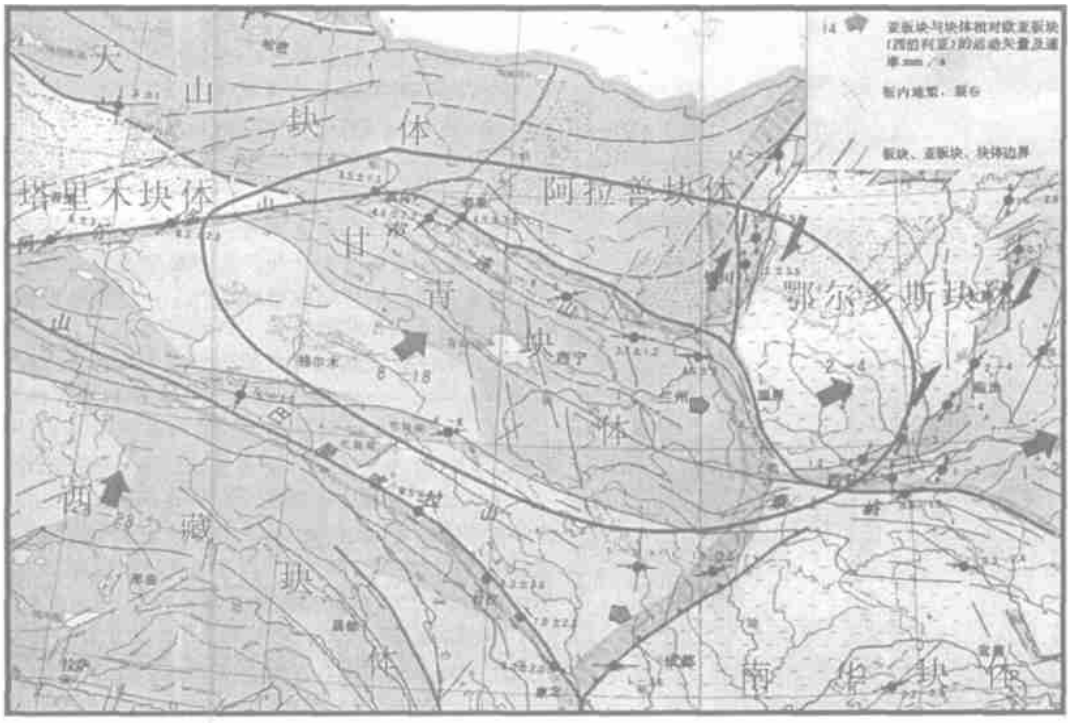


图 1 中国大陆局部块体分布及本文所选范围
Fig. 1 Part of Chinese Mainland blocks and test area

2 GPS 数据处理

2.1 资料概况

“中国地壳运动观测网络”国家大型科学工程(简称网络工程)是国家“九五”期间建设的、以 GPS 网络为主的大型科学工程, 由 25 个连续观测的基准

站、56 个定期复测的基本站和 1 000 个分布于主要地震带上进行不定期观测的区域站组成。作为中国地壳运动观测网络工程的主要参加单位之一, 中国地震局第二监测中心于 1998 年在青藏高原东北缘及邻区布建了约 200 个站点的 GPS 区域网。本研究选用 GPS 点近 300 个(图 2), 绝大多数为网络工程 GPS 站点, 部分为 973 项目河西 C 网观测点(约

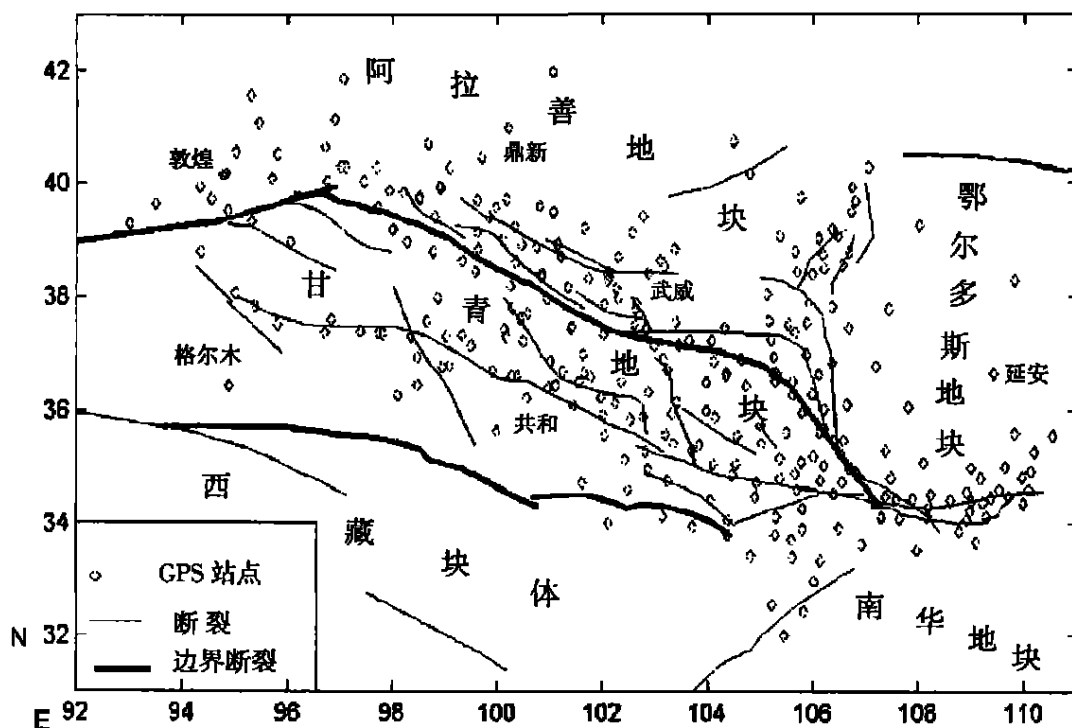


图2 青藏高原东北缘GPS站点分布

Fig. 2 Distribution of GPS stations in northeastern margin of Qinghai-Tibet block

50个)。其中,网络工程区域网站共进行了1999、2001年两期观测,观测时段长度4d;考虑到1993年时的卫星条件不好和观测时段较短,对河西C网本文仅利用了河西C网1999和2001年的两期观测资料,各站点观测时间长度为3d。

2.2 GPS数据处理

数据处理选用美国麻省理工学院(MIT)自主开发的GAMIT/GLOBK软件。首先使用GAMIT软件进行单基线解,经粗差剔除后,再利用GLOBK软件进行整体平差和站点速率计算。为尽可能多地利用野外观测资料,在资料处理之前,我们首先对少量因断电等因素影响出现观测断点的数据进行了拼接处理。再将每日时段内有关各站截止高度角在 15° 以上的双频相位,组成消除电离层效应的双差分观测值。在剔除粗差、修补周跳并扣除大气、潮汐、地球自转及卫星轨道等因素引起的相位延迟后,该观测值被用于估算基线坐标分量、初始相位模糊度和天顶方向对流层残余延迟,并通过最小二乘法解算组成单时段解。

在数据处理第二阶段,用GLOBK软件把全球H文件和区域H文件组合起来,用GRED计算时间序列并检查基线及坐标重复性,对不符合要求的站采取措施重新解算,对仍不符合要求的站或天予以

剔除,最后用GLOBK计算站点速度。在速率计算时,采用对IGS(International GPS Service)站强约束,把区域网归入ITRF国际参考框架的方法进行。具体做法是:①用GLOBK求速度场,选择位于中国周边和欧亚板块的10个速度稳定的IGS站,根据ITRF 2000提供的速度、坐标误差的二倍进行约束。区域站的坐标约束为1.0m,速度约束为0.1m;②将第一步求得的速度中扣除欧亚板块旋转影响后的值作为区域地壳运动的速度值。

经过GPS软件精密解算,得到了青藏高原东北缘1999~2001年各监测点相对于欧亚板块的速度值(表1)。

3 GPS速度场特征分析

根据上述速度解算结果,结合专业软件绘制了青藏高原东北缘1999~2001年相对于欧亚板块的水平速度场(图3)。图3中各站点运动速度绝大部分在0~15mm/a间,南北、东西速度分量中误差一般在3~4mm间,对个别人为破坏和脚架对中误差较大的站点进行了剔除。为突出站点位移起见,图中没有给出相应的站点速率误差椭圆。从图3可以看出青藏块体东北缘及邻区现今地壳水平运动具有

表 1 青藏高原东北缘部分站点 1999~ 2001 的速度值(mm/a)

Fig. 1 The velocity value of parital stations in northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau during 1999~ 2001

| 点名 | N 分量 | E 分量 | 点名 | N 分量 | E 分量 | 点名 | N 分量 | E 分量 | 点名 | N 分量 | E 分量 |
|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|-------------|-------------|------|------------|-------------|
| D065 | 6. 655 324 | -5. 496 36 | G118 | 8. 893 600 | -1. 257 780 | G006 | 2. 286 857 | -3. 004 720 | G075 | 7. 874 301 | -0. 068 000 |
| D062 | -1. 481 723 | -13. 953 70 | G069 | 3. 640 226 | -1. 118 870 | G004 | 0. 513 981 | -2. 764 350 | G044 | 2. 682 649 | -1. 142 700 |
| G038 | 6. 060 723 | -6. 383 30 | G113 | 7. 719 834 | 1. 103 996 | G001 | 1. 539 544 | -3. 275 440 | G157 | 8. 198 358 | 1. 836 792 |
| G032 | 6. 086 817 | -6. 978 35 | G105 | 8. 788 685 | -0. 502 770 | G026 | 6. 052 814 | -6. 000 130 | G146 | 3. 962 248 | -0. 481 770 |
| D084 | 3. 044 485 | -4. 991 65 | G046 | 0. 919 225 | -1. 987 250 | G021 | 3. 505 608 | -0. 783 410 | G143 | 1. 780 359 | -0. 743 770 |
| D083 | 1. 385 356 | -5. 155 61 | G063 | 5. 187 551 | -1. 047 720 | G019 | 4. 617 995 | -4. 373 990 | G133 | 3. 102 915 | 1. 062 376 |
| D086 | 5. 158 396 | -4. 583 75 | G066 | 6. 912 595 | -0. 002 580 | G120 | 7. 670 920 | -5. 159 460 | G148 | 4. 412 610 | 0. 045 520 |
| D090 | 4. 558 820 | -4. 320 16 | G049 | 2. 649 204 | -1. 737 430 | G121 | 7. 013 493 | -5. 034 900 | G152 | 7. 619 393 | 1. 417 843 |
| D098 | 3. 168 995 | -5. 081 48 | G081 | 8. 433 434 | -0. 736 570 | G043 | 1. 888 360 | -1. 792 740 | G041 | 1. 551 745 | 1. 053 361 |
| G016 | 2. 491 390 | -5. 788 33 | G106 | 7. 142 889 | 0. 668 573 | G085 | 7. 658 601 | -4. 466 820 | G158 | 7. 167 112 | 2. 533 753 |
| G024 | 3. 341 945 | -7. 643 41 | G115 | 9. 129 829 | 0. 194 060 | G077 | 5. 965 291 | -2. 372 990 | G153 | 6. 907 807 | 2. 129 812 |
| D093 | 3. 087 255 | -4. 581 12 | G087 | 9. 176 791 | -1. 981 460 | G107 | 5. 315 639 | -2. 161 98 | G132 | 3. 396 851 | -2. 411 450 |
| G027 | 1. 696 970 | -5. 205 63 | G134 | 2. 308 078 | -1. 136 820 | G116 | 7. 215 872 | -3. 993 69 | G149 | 3. 868 121 | 1. 561 536 |
| D089 | 2. 340 804 | -3. 589 89 | G064 | 2. 743 039 | 1. 413 475 | G042 | 2. 469 272 | -2. 604 59 | G150 | 7. 221 088 | 2. 772 800 |
| G025 | 2. 892 617 | -5. 255 26 | G061 | 3. 645 092 | -0. 960 050 | G119 | 12. 100 660 | -0. 358 10 | G135 | 2. 099 592 | -0. 987 370 |
| G036 | 6. 328 589 | -6. 596 29 | G098 | 6. 951 412 | 2. 210 225 | G086 | 8. 671 507 | -3. 296 39 | G159 | 7. 540 356 | 4. 104 620 |
| G009 | 1. 989 180 | -4. 365 05 | G057 | 3. 303 989 | -0. 366 930 | GC02 | 3. 197 263 | -1. 998 70 | G154 | 4. 948 016 | 4. 245 967 |
| D096 | 4. 028 481 | -4. 248 32 | G060 | 4. 668 127 | -0. 776 990 | G067 | 4. 119 485 | -2. 276 02 | G147 | 5. 233 648 | 2. 456 073 |
| D087 | 2. 553 491 | -2. 209 05 | G109 | 7. 606 209 | 1. 139 220 | G104 | 7. 345 606 | -1. 845 31 | G136 | 2. 275 798 | 0. 845 471 |
| G017 | 3. 938 962 | -6. 568 01 | G102 | 8. 570 260 | 0. 974 625 | G078 | 8. 531 560 | -3. 632 000 | G144 | 4. 382 922 | 1. 289 198 |
| D094 | 4. 618 225 | -5. 652 77 | G074 | 8. 302 158 | 0. 661 006 | G114 | 7. 398 385 | -2. 157 20 | G137 | 2. 743 710 | -0. 190 320 |
| G031 | 5. 422 381 | -6. 211 17 | G096 | 8. 043 986 | 0. 095 345 | G072 | 4. 338 715 | -2. 412 72 | G138 | 2. 580 974 | 1. 546 697 |
| G020 | 0. 909 691 | -4. 291 12 | G058 | 4. 578 535 | -0. 464 780 | G099 | 5. 733 957 | -3. 554 67 | G127 | 0. 904 582 | -0. 951 050 |
| D091 | 2. 761 650 | -3. 954 61 | G047 | 1. 646 613 | -0. 675 410 | G092 | 8. 086 758 | -1. 066 03 | G129 | 3. 189 238 | 0. 960 448 |
| G034 | 5. 675 538 | -7. 482 71 | G080 | 10. 508 360 | -0. 091 350 | G111 | 6. 285 337 | -2. 591 10 | G128 | 2. 438 599 | 0. 372 129 |
| G022 | 3. 393 127 | -8. 640 62 | G089 | 7. 518 864 | 0. 277 371 | G117 | 8. 381 609 | -1. 392 33 | G122 | 3. 316 222 | -1. 685 670 |
| D088 | 4. 719 965 | -2. 343 73 | G103 | 8. 118 945 | -0. 197 220 | G091 | 6. 939 258 | -1. 934 94 | G139 | 0. 865 273 | 1. 018 884 |
| G010 | 1. 216 642 | -4. 626 45 | G070 | 7. 709 742 | 0. 273 825 | G095 | 7. 982 240 | -2. 511 33 | G130 | 2. 658 610 | 0. 898 333 |
| G028 | 6. 921 331 | -5. 487 27 | G055 | 5. 222 844 | 0. 451 017 | G068 | 3. 981 908 | -0. 530 30 | G125 | 1. 296 561 | -0. 559 920 |
| G013 | 2. 942 806 | -5. 193 64 | G084 | 7. 557 751 | 1. 222 857 | G050 | 3. 331 350 | -2. 556 01 | G156 | 4. 434 840 | 9. 297 950 |
| G002 | 0. 695 421 | -3. 526 18 | G052 | 2. 195 983 | -1. 428 130 | G112 | 7. 309 198 | -0. 898 95 | G151 | 6. 118 084 | 5. 224 806 |
| G007 | 4. 259 095 | -3. 008 72 | G141 | 2. 090 519 | 0. 179 060 | G101 | 7. 692 975 | -0. 862 52 | G131 | 2. 451 265 | 2. 420 616 |
| G039 | 6. 836 055 | -6. 523 75 | G100 | 7. 031 008 | 1. 242 842 | G083 | 7. 348 753 | -1. 842 17 | G162 | 2. 163 505 | 6. 211 001 |
| G018 | 4. 818 435 | -6. 856 64 | G040 | 3. 186 248 | -2. 353 300 | G108 | 6. 512 499 | -0. 782 44 | G167 | 4. 434 623 | 6. 011 706 |
| G030 | 5. 283 200 | -7. 088 29 | G082 | 10. 256 88 | 1. 058 06 | G053 | 2. 714 022 | -2. 847 82 | G090 | 8. 611 406 | 0. 768 135 |
| D085 | 3. 539 979 | -4. 158 22 | G094 | 8. 681 005 | 1. 947 007 | G079 | 7. 766 348 | -0. 814 08 | G062 | 2. 917 043 | 0. 519 369 |
| D095 | 3. 539 468 | -2. 051 72 | G065 | 3. 972 644 | -1. 299 590 | GC10 | -4. 431 230 | 15. 534 21 | G008 | 2. 286 501 | -4. 451 840 |
| G037 | 7. 498 837 | -6. 871 010 | G059 | 3. 182 137 | 0. 393 286 | G073 | 7. 132 899 | -1. 366 39 | G011 | 3. 713 041 | -4. 677 450 |
| G005 | 2. 777 138 | -1. 858 710 | G045 | 1. 645 008 | -0. 807 640 | G093 | 9. 054 234 | 1. 620 918 | G164 | 3. 274 934 | 3. 767 025 |
| G033 | 6. 123 269 | -5. 511 210 | G051 | 1. 766 422 | -0. 970 980 | G056 | 3. 755 616 | -2. 440 060 | G161 | 1. 157 027 | 3. 135 279 |
| G012 | 5. 005 084 | -6. 569 330 | G097 | 9. 890 586 | 1. 405 420 | G123 | 0. 516 189 | 4. 368 389 | G054 | 3. 570 458 | 0. 406 557 |
| G015 | 5. 527 044 | -4. 929 710 | G076 | 9. 003 433 | 0. 930 101 | G160 | -0. 670 250 | 3. 721 614 | G048 | 1. 776 512 | -2. 872 530 |
| G003 | 1. 361 956 | -2. 207 740 | G071 | 6. 647 717 | 0. 606 460 | G169 | 3. 947 981 | 5. 583 236 | G023 | 2. 277 120 | -4. 237 450 |
| G014 | 7. 684 901 | -4. 745 910 | | | | | | | | | |

以下特点:

1. 阿拉善块体是一个内部变形很弱的较稳定块体。在图 3 中,块体内部测点的运动速度很小(一般 3 mm/a 以内),运动方向紊乱,缺乏系统性,不存在块体旋转运动迹象,坐标的变化主要是由测量误差引起的。除此之外,从图上还可以看出,河西走廊

盆地内部站点水平运动速度较小,与阿拉善块体内部站点速度差异也很小,表明祁连山北缘断裂带应为青藏块东北缘的另一条边界断裂,它与东部的海原断裂带共同构成青藏块体现今地壳运动的东北边界。

2. 阿尔金断裂主干断裂的北端,其西侧的敦

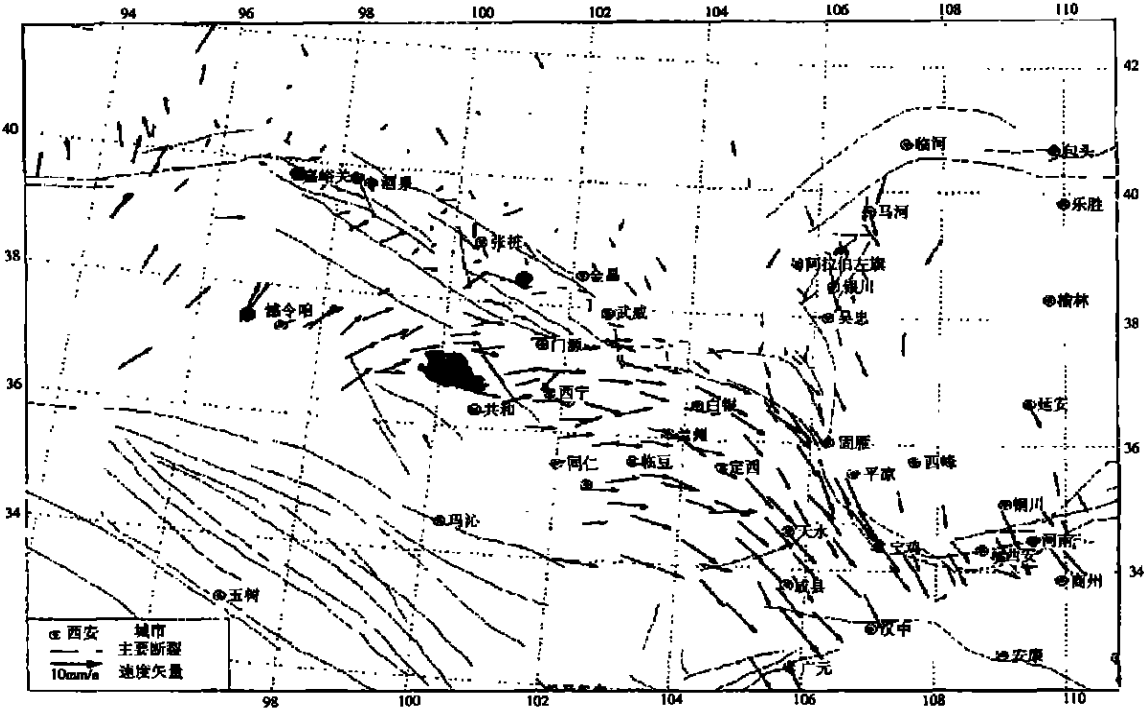


图 3 青藏块体东北缘地壳水平运动速度场

Fig. 3 Horizontal movement rate field in northeastern margin of Qinghai-Tibet block relative to the stable Eurasia(1999~ 2001)

煌、安西一带, 点位运动方向为东西向或北西西向。运动速率一般在 6 mm/a 左右。上述观测数据表明, 阿尔金断裂东北端存在相对左旋运动的同时, 其西侧还具有相对拉张性质, 这种拉张性可能是北东向敦煌、安西盆地形成的原因之一。由于阿尔金断裂(主要是中段) 有较大的左旋错动, 西北部的塔里木、天山与准葛尔地块向北北西方向运动, 它们之间运动速率的递减是由于天山南北挤压构造的存在而造成的, 而它与甘青地区块体运动的差别反映了阿尔金断裂的水平走滑运动。

3. 甘青块体西部以北东向运动和地壳缩短为主。从图 4 中格尔木—酒泉—鼎新 N45°E 分量 GPS 速度剖面可以看出, 柴达木盆地南缘 8 mm/a 的北东向运动, 几乎全部为柴达木盆地的压陷沉降和祁连山山地的挤压上升地壳缩短所吸收。其中, 祁连山主干断裂以南的祁连山地和柴达木盆地呈近线性均匀地壳缩短, 但祁连山主干断裂和祁连北缘断裂之间的北祁连山地区, 地壳缩短速率明显加剧, 反映出北祁连地区可能正经历着强烈的挤压逆冲推覆构造运动。运动的强度明显呈南强北弱的态势, 表明阿拉善块体比较稳定, 对青藏块体的北向和北东向运动起了阻挡作用, 越靠近阿拉善块体其阻挡作用越强, 运动自然减弱, 远离阿拉善块体阻挡作用越

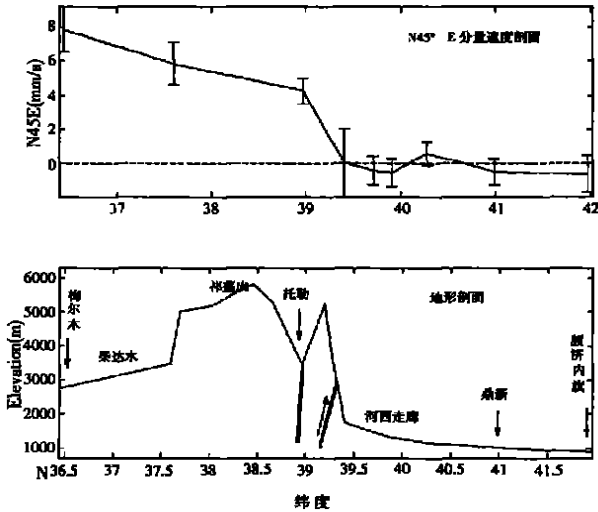


图 4 格尔木—酒泉—鼎新速度剖面

Fig. 4 The horizontal rate N45°E component profile along Geemu-Jiuquan-Dingxin

弱, 运动强烈。

上述 GPS 观测结果与现今地质地貌所反映的该区北东向强烈挤压构造运动比较吻合, 即喜马拉雅山运动以来, 受印度板块的北东向挤压作用, 在昆仑山断裂和阿拉善块体之间的甘青块体西部地区, 形成了两凹一隆的挤压型构造格局, 南侧的柴达木盆地和北侧的河西走廊盆地强烈挤压下陷, 其内所

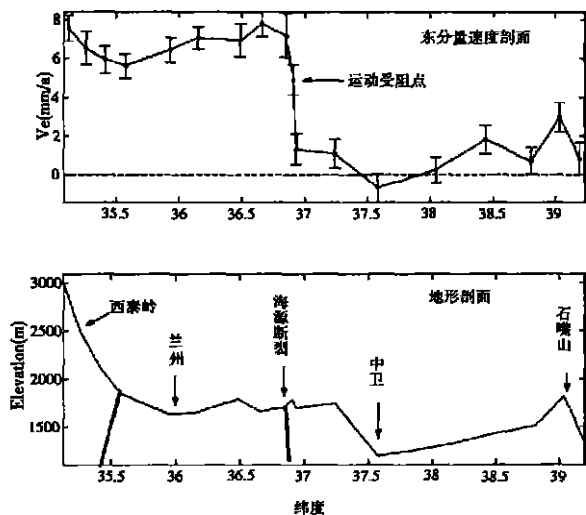


图5 夏河—兰州—海原—石嘴山速度剖面

Fig. 5 The horizontal rate east component profile along

Xiahe-Lanzhou-Shi Zui Shan

接收的第四系沉积层厚度分别 $> 2\ 800\text{ m}$ 和 $> 1\ 200\text{ m}$;在两压陷盆地之间的祁连山地则强烈挤压隆起或推覆上升,其新构造运动上升幅度达 $2\ 500\text{ m}$ 以上,目前,柴达木盆地以北的祁连山地海拔高程已抬升到 $4\ 000\sim 5\ 500\text{ m}$,相比而言,北侧的河西走廊盆地平均海拔高程则只有 $1\ 500\text{ m}$ 左右。

4. 柴达木盆地以东至六盘山一带的甘青块体中、东部地区,都卷入了统一的刚性块体顺时针旋转运动,具体表现为:西侧呈北东向运动,到中部转变为近东西向运动,再往东则逐渐转变为南东方向运动。根据最小二乘估算,该块体的旋转角速度大约为 $0.135^\circ/\text{Ma}$,欧拉旋转极中心大致在东经 92° 、北纬 20.8° 附近。上述GPS观测结果印证了前人有关甘青块体存在顺时针旋转的地质推断,但块体的旋转范围仅涉及甘青块体的中、东部地区,西部的祁连山地和柴达木盆地并未卷入整体的块体旋转运动。就甘青旋转块体本身而言,其旋转运动的西边界和东边界比较模糊,运动速度呈渐变状态;其北边界则比较清晰,即为毛毛山—海原巨型走滑断裂带。上述GPS观测结果表明,海原走滑断裂带应为青藏块体东北缘的现今运动边界之一,而非某些学者认定的古浪—天景山断裂^[1]。图5为夏河—兰州—海原—银川东西向GPS速度剖面,可以看出,海原断裂带以南各GPS站点东分量运动速度比较一致,均为 7 mm/a 左右,但在海原断裂带两侧则出现了 $5\sim 7\text{ mm/a}$ 的速度陡变带(左旋走滑),1920年海原8.5级大地震后,海原断裂贯通比较彻底,断裂两边相对运

动较大。

5. 在甘青块体存在显著顺时针旋转运动的同时,鄂尔多斯块体似乎也存在比较明显的逆时针旋转运动,其旋转运动速度在块体西南缘的六盘山断裂带一带最大,向北至块体西北角的银川盆地一带明显减小。有关鄂尔多斯块体是否具有整体旋转特征,还需要结合块体东部的GPS观测资料做进一步证实。不过,从本研究的结果可以初步推断:其一,鄂尔多斯块体的逆时针旋转是由甘青块体的顺时针旋转运动带动起来的,即具有被动旋转特点,两块体的藕合作用点为北西向的六盘山褶皱断裂带;其二,鄂尔多斯块体旋转速度的由南向北衰减,表明该块体的西北边界阻力比较大,还没有形成贯通的边界断裂,这反过来可能也正是鄂尔多斯块体西缘银川—固原一带地震活动比较强的主要原因。

4 结论与讨论

1. 青藏块体现今地壳运动的东北边界应为海原断裂带和祁连山北缘断裂带,其中海原断裂带南、北两侧GPS速度场存在明显陡变带,说明地壳运动在块体边界上确实存在突变现象,而非连续变化。

2. 昆仑山以北、祁连—海原断裂以南、阿尔金断裂以东的甘青块体,可以划分为东、西两个子块体,其中西部子块体主要包括柴达木盆地及其北侧的祁连山地,以北东向运动挤压和地壳缩短为主;东部子块体以整体顺时针旋转为主,其北边界为毛毛山—海原断裂,西边界应大致在柴达木以东的都兰—俄博一线。由于两子块体运动方向和运动性质的差异性,可以推测两子块体分界的都兰—俄博一带应存在较大的北西向拉张应力场,而该拉张应力场将有利于北东向拉张断裂的发育。

3. 鄂尔多斯块体似乎有逆时针旋转运动,其旋转运动速度在块体西南缘的六盘山断裂带一带最大,向北至块体西北带明显减小。

参考文献(References):

- [1] Armij, R., P. Tapponnier, J. L. Mercier, *et al.*. 1986. Quaternary extension in Southern Tibet: Field observations and tectonic implication[J]. *J. Geophys. Res.*, **91**: 803~872.
- [2] Sino-British Comprehensive Geological Investigation Team of the Qinghai-Tibet Plateau. Geological Evolution of the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1990. 30~40. [中英青藏高原综合地质考察队. 青藏高原地质演化[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 30~40.]

- [3] Hou Zengqian, Chen Wen, Lu Jian. Collision event during 177~135 Ma on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from 40Ar/39Ar dating for basalts on the western margin of the Yangtze Platform [J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 2002, **76**(2): 194~204.
- [4] Li Tianwen, Chen Jianbing, Tang Guo'an, *et al.*. An inverse analysis of the comprehensive Medium Parameters and a Simulation of the crustal deformation of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 2004, **78**(6): 1250~1257.
- [5] Zhou Min, L. Taiyi, Zhang Yuansheng, *et al.*. The geological structure background and the crustal structure in the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2000, **22**(6): 645~653. [周民都, 吕太乙, 张元生, 等. 青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究[J]. 地震学报, 2000, **22**(6): 645~653.]
- [6] Li Jianhua, Shen Xuhui. Syntaxis faults at the northeastern corner of the Tibet Plateau and the annular tectonics in southern Ordos [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, **23**(1): 116~121. [李建华, 申旭辉. 青藏高原东北隅弧束断裂与南鄂尔多斯环形构造. 地震地质, 2001, **23**(1): 116~121.]
- [7] Wan Aimin, Liu Jialin, Miao Leilei, *et al.*. The natural environmental and response of marine earth system in the northeastern border of Tibet Plateau and its surrounding areas [J]. *Journal of Mountain Science*, 2000, **18**(2): 97~103. [王爱民, 刘加林, 缪磊磊, 等. 青藏高原东北边缘及毗邻地区自然环境与人为响应关系[J]. 山地学报, 2000, **18**(2): 98~103.]
- [8] Tapponnier, P., Xu Z. Q., Roger F., *et al.*. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau [J]. *Science*, 2001, **294**: 1671~1677.
- [9] Jiang Zaisen, Zhang Xi, Cui Duxin, *et al.*. Recent horizontal movement and deformation in the northeast margin of Qinghai-Tibet block [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, **44**(5): 639~644. [江在森, 张希, 崔笃信, 等. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形. 地球物理学报, 2002, **44**(5): 637~644.]
- [10] Zhang Xiaoliang, Jiang Zaisen, Cheng Bing, *et al.*. Preliminary research on present block demarcation, movement and deformation in northeast margin of Qinghai-Tibet [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2002, **22**(1): 63~67. [张晓亮, 江在森, 陈兵, 等. 对青藏东北缘现今块体划分、运动及变形的初步研究. 大地测量与地球动力学, 2002, **22**(1): 63~67.]
- [11] Ding Guoyu. Introduction to lithospheric dynamics of China [M]. Beijing: Seismological Press, 1991. [丁国瑜. 中国岩石圈动力学概论[M]. 北京: 地震出版社, 1991.]

Research on Recent Crustal Horizontal Movement of Northeastern Margin of Qinghai-Tibet Block Based on GPS

LI Tianwen^{1,2}, LIANG Weifeng³, LI Junfeng², LONG Yongqing², WANG Qingliang³, CUI Duxin³

(1. Continental Movement Dynamics Lab, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Department of Urban and Resources Science, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3. Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an 710054, China)

Abstract: Northeastern margin of Qinghai-Tibet block is an important tectonic movement boundary, and is also a window to research on crustal movement of Qinghai-Tibet Plateau. Through studying the geology structure and tectono-dynamic characteristics of the test area, it is of great significance not only for Qinghai-Tibet Plateau itself, but also for correctly realizing and analyzing present-day tectonic deformation and dynamic mechanism in northwest China. Based on the GPS observation data from 1999 to 2001 and the soft of GAMIT/GLOBK, the horizontal movement rate-field in northeastern margin of Qinghai-Tibet block is obtained, which is relative to the stable Eurasian continent from 1999 to 2001. Combining with the mechanism of tectonic movement and geodynamics, we mainly conclude that: ① Haiyuan left-lateral active fault and northern edge thrust fault of Qilian mountain compose the major northeastern boundary of present-day crustal movement of Qinghai-Tibet block; ② the west part of Gansu-Qinghai block's crustal movement characteristics is dominated by N-S compression and crustal shortening, and the east part rotates clockwise as an integral rigid body; ③ the Erdos block may take anti-clockwise rotation driven by Gansu-Qinghai rotating block, and the velocity reaches the maximum at the northwest part of Liupan mountain fault.

Key words: the northeastern margin of Qinghai-Tibet block; horizontal crustal movement; GPS