

新疆巴楚-伽师地区上地壳三维速度层析成像

和锐¹, 杨建思¹, 张翼²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:利用近震层析成像方法和2003年新疆巴楚-伽师 $M_s6.8$ 地震走时资料反演得到了震区地下速度图像。结果表明:P波速度在地壳内5 km以上表现出了较强的横向非均匀性,反映该区地表的沉积盖层介质特征;在5~22 km深度内以NNW和NNE向共轭相交的高速异常带为主,周围速度相对较低。结合构造背景和震源机制解,认为这一区处于NW-SE向的右行走滑和NNE-SSW向的挤压应力双力偶作用下,使得发生的地震有一定的相似性。而NNW和NNE向非均匀性条带为应变能的积累和释放提供了基础,是这次地震发生的一个重要条件。结合宏观调查和石油资料,推断这次地震发生在塔里木盆地西部的一条NNW走向、北倾的巴什托普隐伏断裂上。

关键词:巴楚-伽师震区; 上地壳结构; 近震层析成像; P波速度

中图分类号: P315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)02-0139-05

Tomographic Determination of the Upper Crustal Structure in Bachu - Jiashi Area, Xinjiang

HE Rui¹, YANG Jiansi¹, ZHANG Yi²

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

2. Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

Abstract: A detailed tomographic image of the upper crustal structure in Bachu - Jiashi area, Xinjiang Uygur Autonomous Region, is determined by using P-wave arrival time from the Bachu - Jiashi $M_s6.8$ earthquake in 2003. The inversion results as following: Over 5 km depth in the region, P-velocity imaging shows strongly horizontal heterogeneity, reflecting characteristics of sedimentary cover; Between 5 ~ 14 km depth, P-velocity imaging suggests that there exist two high and conjugated velocity zone encircled with relative low velocity body, one trending NNW and the other NNE. Combined with tectonic background and focal mechanism solutions, it is holded that the character of earthquakes in this region is similar under the action of double-couple, one of which is along NW - SE right-lateral strike-slip couple, and the other is along NNE - SSW compressive stress. The NNW and NNE zone of heterogeneity provided the foundation for strain energy accumulation and release, and was an important condition for occurrence of the Bachu - Jiashi earthquake. Combined the macro damage and isoseismic feature from field investigation and the study on petroleum seismic exploration, it is considered that this earthquake occurred on Bashitupu faults in western tarim basin, which trends along NNW and is north dipping.

Key words: Bachu - Jiashi area; Upper-crust velocity structure; Seismic tomography; P-wave velocity

0 引言

2003年2月24日,新疆巴楚-伽师交界处发生了一次 $M_s6.8$ 强烈地震,该地震对邻近的巴楚县琼库尔恰克等乡镇造成严重毁坏和人员伤亡,直接灾害损失近13.98亿元,死亡268人,是新疆有记录以来损失最为惨重的一次地震。

巴楚-伽师震区地处南天山南麓,是强烈的构造变形带。主震距1997-1998年伽师强震群仅30 km左右。巴楚-伽师地区地震余震序列发育,是极好的孕震构造研究区,引起了地震学界的广泛关注。然而这一区域位于我国西部,地震监测能力相对较弱,距离巴楚-伽师地震震中距小于250 km的台站仅4个。为了摸清震源体的大小以及余震时空分布,中国地震局决定加强此次地震的余震序列观测,派出现场应急流动观测队完成现场实时监测任务。现场监测持续记录50天左右,获得了一批高质量的数字化地震资料^①,为研究这一区域地下速度结构奠定了基础。

1 研究区构造背景

巴楚-伽师地震发生于新疆塔里木盆地西部,位于南天山地震带和西昆仑地震带交汇的夹角区内,是印度板块帕米尔尖角与欧亚板块碰撞的结合部位,构造运动强烈。震区地表没有断层出露,但存在隐伏的隆起构造,称为琼库尔恰克鼻状隆起。这一隆起表明震区所处的塔里木盆地西部存在显著的新构造活动^[3]。根据石油物探资料,震区所处的塔里木盆地西部发育隐伏的断裂构造,伴随断裂活动形成了一些隆起构造。震区下伏的巴什托普断层及其旁侧断层在空间上与巴楚-伽师 $M_s6.8$ 地震的微观震中和宏观震中是一致的。地震现场考察结果

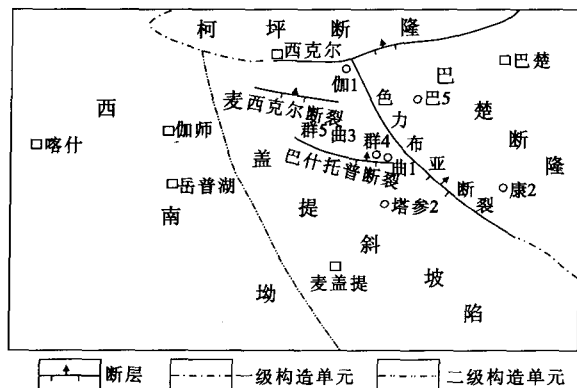


图1 巴什托普构造带示意图

Fig. 1 Location of Bashitupu tectonic belt.

表明在极震区的北部存在受构造控制的地裂缝带,正好位于受巴什托普断裂控制的琼库尔恰克鼻状隆起的顶部,说明该地震发生在巴什托普断裂及其控制的琼库尔恰克鼻状隆起上。

2 观测资料

3月9日现场应急流动观测队布设了宽频带流动数字地震台网,3月12日开始正式记录,共持续记录50天左右。台网由5台地震仪组成,跨度东西向约为70 km,南北向约为30 km(图2)。使用港震公司的FBS-3B型宽频带数字拾震器,配备EDAS-C24型24位数据采集器。本文所使用的震相数据来自于流动台网及当地4个固定站(喀什台、巴楚台、和田台、乌什台)记录到的 $M_s6.8$ 地震余震资料。对收集整理的资料使用双差定位法重新定位,读取余震P波、S波到时,对这些资料的质量进行了分析并筛选,共选出1722个地震。在做层析成像计算时,舍去走时残差大于2.0 s的地震。

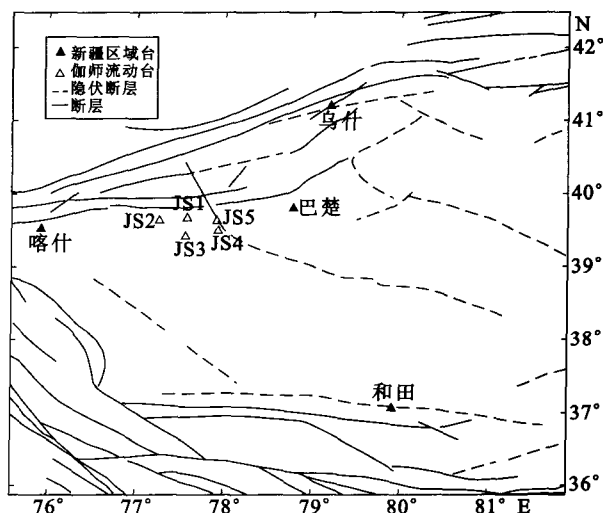


图2 台站分布图

Fig. 2 Distribution of mobile and permanent seismic stations.

3 方法

本文采用节点法描述连续速度模型,即用一系列矩形网格节点与一个线性插值函数结合起来描述速度结构;采用曲面节点描述不连续速度间断面。对于连续速度模型采用“伪弯曲法”三维快速射线追踪方法计算射线路径^[2];对于间断面采用 snell 定

① 杨建思. 2003年3月24日新疆伽师 $M_s6.8$ 地震现场考察报告[R]. 2003.

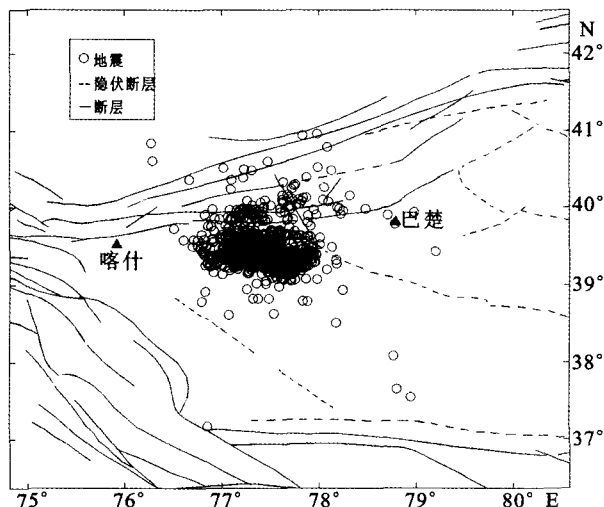
图3 巴楚-伽师 $M_{\text{s}}6.8$ 地震余震分布图

Fig. 3 Distribution of aftershocks of Bachu - Jiashi $M_{\text{s}}6.8$ earthquake.

律计算折射角^[3-4]。反演方法采用 LSQR 方法^[6]求解。采用检测板分辨率实验来检验反演结果。

根据刘启元^[6]和张先康^[7]对这一区域的研究结果,在计算中采用图4所示的一维速度初始模型。图5是地震射线分布的平面图,可以看出在 $N39.3^{\circ} \sim 39.7^{\circ}$ 、 $E77.1^{\circ} \sim 78^{\circ}$ 范围内的射线分布密集,交叉点多,反演结果可靠。研究区面积约为 $45 \text{ km} \times 77 \text{ km}$,在模型参数化时垂向采用了不等间距的网格划分,共4层;水平方向沿东西、南北按照 $0.15^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 进行网格划分。

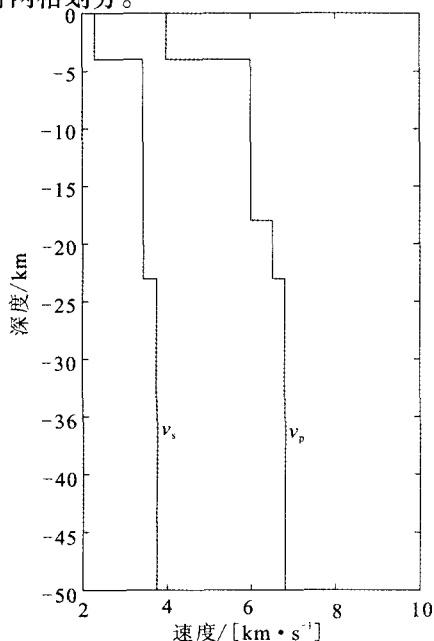


图4 初始一维速度模型

Fig. 4 Initial 1-D velocity model.

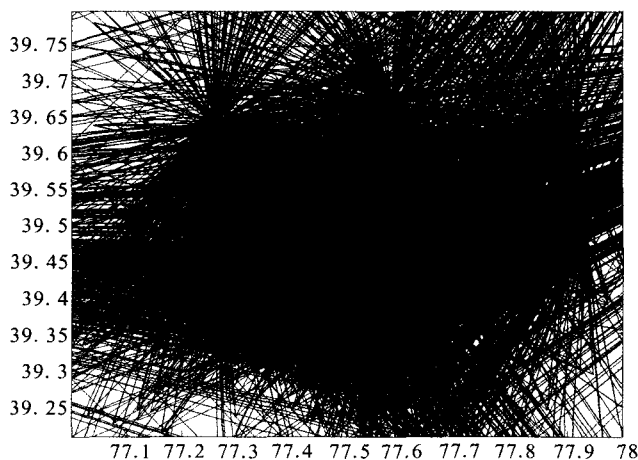


图5 射线分布图

Fig. 5 Distribution of P-wave ray path in plane view.

采用检测板分辨率实验检测在上述模型参数化和观测数据下各层是否有足够多的射线覆盖,从而使反演结果能分辨节点的速度扰动(图6)。由于研究区地震监测能力相对较弱,参与反演的数据有限,限制了反演精度。

4 结果解释

经过反演迭代计算和加密网格插值,得到研究区 $1 \sim 14 \text{ km}$ 深度的 P 波速度异常剖面图(图7)。图中色标代表速度扰动值(百分比),蓝色端表示相对高速,红色端表示相对低速。可以看出,在 5 km 以上地壳结构为非均匀较强的高、低速块状相间,以沿 NE 向的低速块体为主。在 $5 \sim 14 \text{ km}$ 范围内速度异常图像表现出一定的规律性,出现了两条相互正交的高速异常带。下面将分别讨论 5 km 以上以及 $5 \sim 14 \text{ km}$ 范围的反演结果。

在 2 km 深度层切片图上以 NE 向的低速块体为主, NW 向的低速块体次之,高、低速相间,表现为较强横向非均匀性,反映该区地表厚达数公里的沉积盖层介质特征。在伽师-巴楚地区附近的断层主要以 NE 向的柯柯断层和 NW 向的普昌断裂为主。低速块体走向与这一区域主要构造走向一致,反映了区域应力对沉积盖层的作用。

$8 \sim 14 \text{ km}$ 切片以 NWW 和 NNE 向两条高速块体为主。许多研究结果也表明,地震一般发生在高速体或高低速体的过渡带上。坚固体孕震模式^[8]指出,高速体(坚固体)的存在是高应力集中的重要条件,岩石是否失稳不仅取决于震源体的力学性质,还与环境刚度密切相关,当环境刚度小于震源体的等效刚度时,突发应力降才是可能的。巴楚-伽师

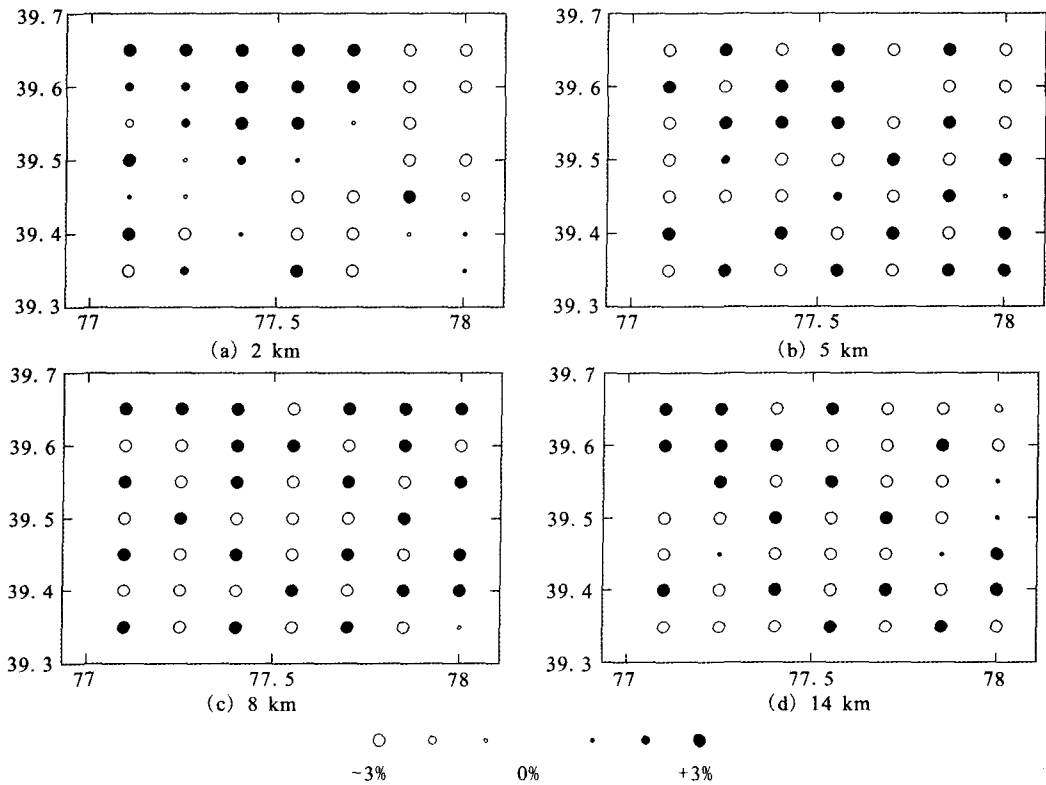


图6 各深度层上检测板分辨率检测结果

Fig. 6 Results of the checkerboard resolution test for each mesh layer.

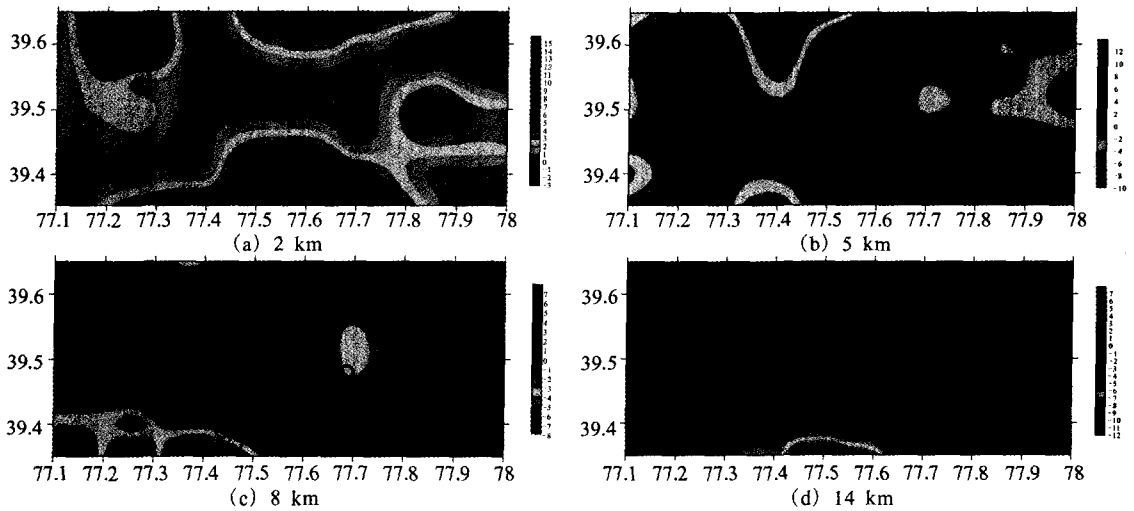


图7 不同深度P波速度扰动水平剖面图

Fig. 7 The P-wave velocity images at each depth slice.

$M_s 6.8$ 地震为北倾低角度稍具左移分量的逆冲破裂事件,断层面走向 300° , 倾角 28° , 震源深度为 $7.5 \text{ km}^{[9]}$, 将 $M_s \geq 3.5$ 余震投影到 8 km 的 P 波速度扰动水平剖面上, 见图 7(c) (其中黑圈代表地震, 圈的大小代表震级大小) 可以清楚看到余震基本上沿 NWW 向的高值条带分布, 多发生在 P 波速度高值

区内或靠近高值的位置。NNE 向的高值条带与 NWW 向的高值条带在纬度 39.45° 、东经 77.4° 的地方汇聚、相交, 形成两条正交的高速条带。到 14 km 层深时, 这组共轭的高速条带图像更加明显。5 月 4 日巴楚-伽师发生的 $M_s 5.8$ 地震与 $M_s 6.8$ 主要破裂方式明显不同, 属双侧破裂, 形成了 NNE 向的主

破裂面^[10],其余震基本沿着 NNE 向的高值条带分布。因此我们认为震区下方介质结构的强烈非均匀性为应变能的积累和释放提供了基础,这种结构上的差异成为巴楚-伽师地震发生的最直接原因。

石油物探资料显示,震区所处的塔里木盆地西部发育隐伏的断裂构造,伴随断裂活动形成了一些隆起构造。地震定位、震源机制解、震源破裂过程、等震线和地表破坏所反映出的发震构造与该地区先存的隐伏构造有很好的-致性。沈军^[1]认为发生2003年巴楚-伽师 $M_s6.8$ 地震的是塔里木盆地西部的一条隐伏断层,称之为巴什托普隐伏断裂。该断裂是条 NWW 走向的北倾盲逆断层。8 km 到 14 km 中的两条高值条带中的一条正是沿 NWW 向分布,其空间位置、走向、形态基本与余震一致。图 8 是沿东经 74° 一个垂直切面,可以看出 NWW 向的高速条带随着深度增加向 NE 倾斜。我们推测切片中 NWW 高值条带正是巴什托普隐伏断裂在速度图像上的反映。

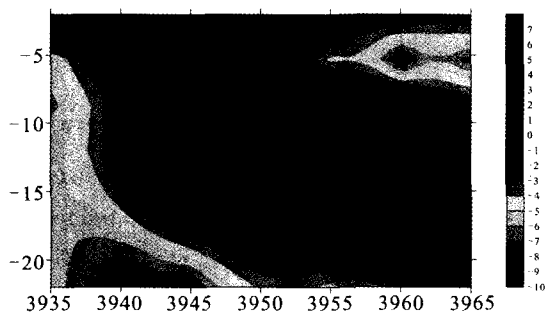


图 8 沿东经 74° 的 P 波扰动垂直切面

Fig. 8 The P-wave velocity image along E74° slice.

巴楚、伽师及周边地区的震源机制显示出多样性,主要分为走滑和倾滑两种类型,走滑地震的主压应力方向均为 NW,倾滑地震的张应力方向为 NE^[11-13]。巴楚-伽师 $M_s6.8$ 震源机制解显示此次地震断层是在 NW 向的区域应力作用下产生的倾滑逆断层,震源以单侧为主,破裂方向与极震区走向以及 NW 向的主压力方向一致^[10]。震源机制的结果说明这一区域同时存在 NE 和 NW 的构造背景,成像结果显示的 NWW 向和 NWW 向共轭构造特征可能反映了这一区域发震构造的主要特征。在这种构造背景下,巴楚-伽师 $M_s6.8$ 地震的发生不是孤立的,阿图什 1996 年 $M_s6.8$ 和 1998 年 $M_s6.0$ 、以及柯坪块体发生的多次 6 级地震,无论在震源断错性质还是主压力方向或震源破裂特征都很一致。

5 结论与讨论

巴楚-伽师地震发生在塔里木盆地西部与南天西段交汇部位,这一区域受帕米尔高原东北部块体以及印度板块西岬角向北推挤,而受西伯利亚块体的阻挡,形成一对强度不等,西面向北、东面向南的右行力偶,其一对作用方向相反的平行分力形成 NW-SE 向右行走滑力偶,另一对相向作用分力形成 NNE-SSW 向的挤压应力,致使 NWW 向褶皱、断层、隆起拗陷等挤压性构造占优势^[14]。在这种大的构造背景下,这一区域发生的地震有一定的相似性。巴楚-伽师 $M_s6.8$ 地震、阿图什 1996 年 $M_s6.8$ 和 1998 年 $M_s6.0$ 、以及柯坪块体发生的多次 6 级地震,无论在震源断错性质还是主压力方向或震源破裂特征都很一致。巴楚-伽师 $M_s6.8$ 震区下 NWW 和 NNE 向高速块体表明震区下方介质结构的强烈非均匀性,这种非均匀性为应变能的积累和释放提供了基础,是这次地震在这一位置发生的一个重要条件。结合宏观调查和石油资料,可以推断这次地震发生在塔里木盆地西部的一条 NWW 走向、北倾的巴什托普隐伏断裂上。

本文使用的程序是在赵大鹏提供的近震层析成像程序基础上修改完的,数据由中国地震局地震应急现场工作队提供,其中部分数据由黄媛收集整理,一并表示感谢。

【参考文献】

- [1] 沈军,陈建波,王翠,等. 2003 年 2 月 24 日新疆巴楚-伽师 6.8 级地震发震构造[J]. 地震地质,2006,28(2):205-212.
- [2] Um J, Thurber C. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77:972-86.
- [3] Zhao D, Hasegawa A, Kanamori H. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional and teleseismic events[J]. J. Geophys. Res., 1994, 99:22313-22329.
- [4] Zhao D, Hasegawa A, Horiuchi S. Tomographic imaging of P and S wave velocity structure beneath northeastern Japan[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97:19909-28.
- [5] Paige C, Saunders M. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. Association of Computational Mechanics Transactions and Mathematical Software, 1982, 8: 43-71.

(下转 149 页)

- [20] Ding Z L, E Derbyshire, S L Yang, et al. . Stacked 2.6 Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}O$ record[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 1-21.
- [21] An Z S, Kukla G, Porter S C, et al. . Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the loess plateau of China over last 130,000 Years[J]. *Quaternary Research*, 1991, 36:29-36.
- [22] Cande S C, Kent D V. Revised calibration of the geomagnetic polarity timescale for the late Cretaceous and Cenozoic[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100: 603-609.
- [23] Rutter N. W, Ding Z. L, Evans M. E, et al. . Magnetostratigraphy of Baoji loess-paleosol section in north central China Loess Plateau[J]. *Quaternary International*, 1991, 7: 97-102.
- [24] Porter S C, An Z S, Zheng H B, et al. . Cyclic Quaternary Alluviation and Terracing in a Nonglaciated Drainage Basin in the North Flank of the QinlingShan, Central China[J]. *Quaternary Research*, 1992, 38: 157-169.
- [25] 陈发虎,张维信. 甘青地区黄土地层学与第四纪冰川问题[M]. 北京:科学出版社,1993:24-34.
- [26] 岳乐平,薛祥煦. 中国黄土古地磁学[M]. 北京:地质出版社,1995:38-41.
- [27] 陈云,童国榜,曹家栋,等. 渭河宝鸡段河谷地貌的构造气候响应[J]. *地质力学学报*, 1999, 5(4): 49-56.
- [28] Sun Jinmin. Long-term fluvial archives in the Fenwei Graben, central China, and their bearing on the tectonic history of the India - Asia collision system during the Quaternary[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10-11): 1279-1286.
- [29] 孙继敏,许立亮. 汾渭地堑的河流阶地对第四纪时期印度 - 欧亚板块碰撞带的构造响应[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(1): 21-26.
- [30] 张猛刚. 渭河中游河流阶地的演化模式[D]. 西安:西北大学.
- [31] 潘保田,苏怀,刘小丰,等. 兰州东盆地最近 1.2 Ma 的黄河阶地序列与形成原因[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(2): 172-180.
- [32] 苏怀,王均平,潘保田,等. 黄河三门峡至扣马段的阶地序列及成因[J]. *地理学报*, 2008, 63(7): 744-750.
- [33] 潘保田,王均平,高红山,等. 从三门峡黄河阶地的年代看黄河何时东流入海[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(6): 700-705.
- [34] 潘保田,邬光剑,王义祥,等. 祁连山东段沙沟河阶地的年代与成因[J]. *科学通报*, 2000, 45(24): 2669-2675.
- [35] 何生胤. 西宁盆地湟水河流阶地与高原演化特征分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2007, 5(3): 81-86.
- [36] 鹿化煜,安芷生,王晓勇,等. 最近 14 Ma 青藏高原东北缘阶段性隆升的地貌证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004, 34(9): 855-864.
- [37] 赵志军,史正涛,方小敏,等. 祁连山北麓早更新世新构造运动的地层记录[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(6): 92-98.
- [38] 薛滨,王苏民,王云飞,等. 湖泊深钻揭示的中更新世以来中国环境的区域分异及其亚洲季风的关系[J]. *湖泊科学*, 1998, 10(1): 1-4.
- [39] 薛祥煦,李虎侯,李永项,等. 秦岭中更新世以来抬升的新资料及认识[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(1): 82-87.

(上接 143 页)

- [6] 刘启元,陈九辉,李顺成,等. 新疆伽师强震群区三维地壳上地幔 S 波速度结构及其地震成因的探讨[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 356-367.
- [7] 张先康,赵金仁,张成科,等. 米尔东北侧地壳结构研究[J]. *地球物理学报*, 2002, 45(5): 665-671.
- [8] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一)——固体孕震模式的由来与证据[J]. *地震学报*, 1995, 17(3): 273-282.
- [9] 王卫民,李丽,赵连锋,等. 2003 年 2 月 24 日新疆巴楚 - 伽师 $M_s 6.8$ 级地震震源破裂过程研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(2): 343-351.
- [10] 高国英,聂晓红,夏爱国. 2003 年伽师 6.8 级地震序列和震源机制的初步研究[J]. *中国地震*, 2004, 20(2): 179-186.
- [11] 朱令人,苏乃秦,杨马陵. 1997 年新疆伽师强震群及三次成功的临震预报[J]. *中国地震*, 1998, 14(2): 101-115.
- [12] 周仕勇,许忠淮,陈晓非. 伽师强震群震源特征及震源机制力学成因分析[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(5): 654-662.
- [13] 胥颐,刘福田,刘建华,等. 天山地震带的地壳结构与强震构造环境[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(2): 184-193.
- [14] 尹光华,蒋靖祥,穆桂金. 2003 年 2 月 24 日巴楚 - 伽师 6.8 级地震的构造背景初探[J]. *干旱区地理*, 2003, 26(2): 103-109.