

华北地区上新世至第四纪断裂作用 型式与左旋扩展

张岳桥 P.Vergely J.L.Mercier

摘要：华北地区包含两个新生代引张构造域，即太行山以西的鄂尔多斯周缘地堑系和以东的华北—渤海平原盆地。鄂尔多斯周缘地堑系上新世～第四纪的断裂作用表征为以正向倾滑活动为主，同时具有右旋或左旋走滑分量的运动型式，指示了NW-SE向地壳引张作用。华北—渤海盆地内上新世～第四纪的断裂作用发生在NNE至NE走向的断裂带上，具有右旋和正向倾滑的斜向运动特征。EW走向的秦岭断裂系构成了华北引张构造域的南界，显示左旋走滑运动。NNE走向的郯庐断裂带构成了华北引张构造域的东界，表现为右旋走滑，与EW向挤压和SN向引张构造应力作用一致。本文提出的一个构造运动学模式将华北地区上新世～第四纪的构造变形与青藏高原东北边缘海原和昆仑断裂的左旋走滑运动联系在一起，给出了中国大陆活动地块向东扩展的侧向挤出大地构造的新见解。在这个模式里，海原断裂的左旋走滑作用同时被鄂尔多斯地块的反时针旋转运动和沿该地块西南边缘冲断和褶皱作用所调整吸收；昆仑断裂带的左旋走滑运动继续沿秦岭断裂系向东扩展并影响整个华北东部地区，导致了NNE走向的先存断裂的复活。

关键词：活动断裂作用型式；左旋扩展构造；华北地块

中图分类号：P546

文献标识码：A

PLIOCENE-QUATERNARY FAULTING PATTERN AND LEFT-SLIP PROPAGATION TECTONICS IN NORTH CHINA

 Zhang Yu-qiao¹, P.Vergely², J.L.Mercier²

(1. *Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China*; 2. *URA-CNRS: Geophysique et Geodynamique Interne, Universite de Paris-Sud, F-91405, France.*)

Abstract : North China includes two extensional domains: the grabens surrounding the Ordos block in the west, and Huabei-Bohai plain basins in the east. Pliocene-Quaternary faulting in grabens around the Ordos block displays predominantly normal dip slip displacements with a right-lateral or left-lateral slip component, indicating a NW-trending extension. Pliocene-Quaternary faulting in the Huabei-Bohai Plain basins has occurred along NNE-trending faults with oblique slip including right-lateral strike slip and normal components. The major EW-trending Qinling fault system bounds both extensional domains on the south and displays left-lateral slip decreasing in magnitude from west to east. The

NNE-striking Tanlu fault zone bounds the extensional domains on the east and displays right-lateral strike slip movement, consistent with EW-trending compression and N-S-trending extension. A kinematic model linking North China deformation with left-lateral slip on the major Haiyuan fault on the NE margin of Qinhai-Tibetan plateau and on the Kunlun fault gives a new insight into eastward propagating extrusion tectonics in China. In this model, displacement on the Haiyuan fault is accommodated by the counterclockwise rotation of the Ordos block and folding along its SW margin. Motion on the Kunlun fault continues along the Qinling fault system into eastern China where it is accommodated by reactivation of NNE-trending pre-existing faults.

Key words : active faulting pattern; left-slip propagation tectonics; North China block

0 引言

卫星图像(Landsat, SPOT)构造解译、地震震源机制解和野外实地调查等已确切地表明,左旋走滑和引张断裂作用分别是青藏高原东北缘(105°E 以西)和华北地区(105°E 以东)两个活动构造区(带)的主要变形机制[1~8](图1)。Molnar和Tapponnier[1]以及Tapponnier和Molnar[2,9]提出了一个活动构造模式,相继得到其它不同工作的支持[10~16]。在这个模式中,青藏高原东部地块和华南地块的向东侧向构造挤出是对印度和欧亚大陆碰撞和持续的陆内汇聚作用过程的位移调节。另一种观点暗示,青藏高原东部地区大规模的沿EW走向的左旋走滑断裂作用——侧向挤出大地构造的重要运动学标志,可以用一条巨型近SN走向的右旋剪切作用来解释,作用在青藏高原与华南地块之间,使其间的地块发生顺时针旋转[17~18]。

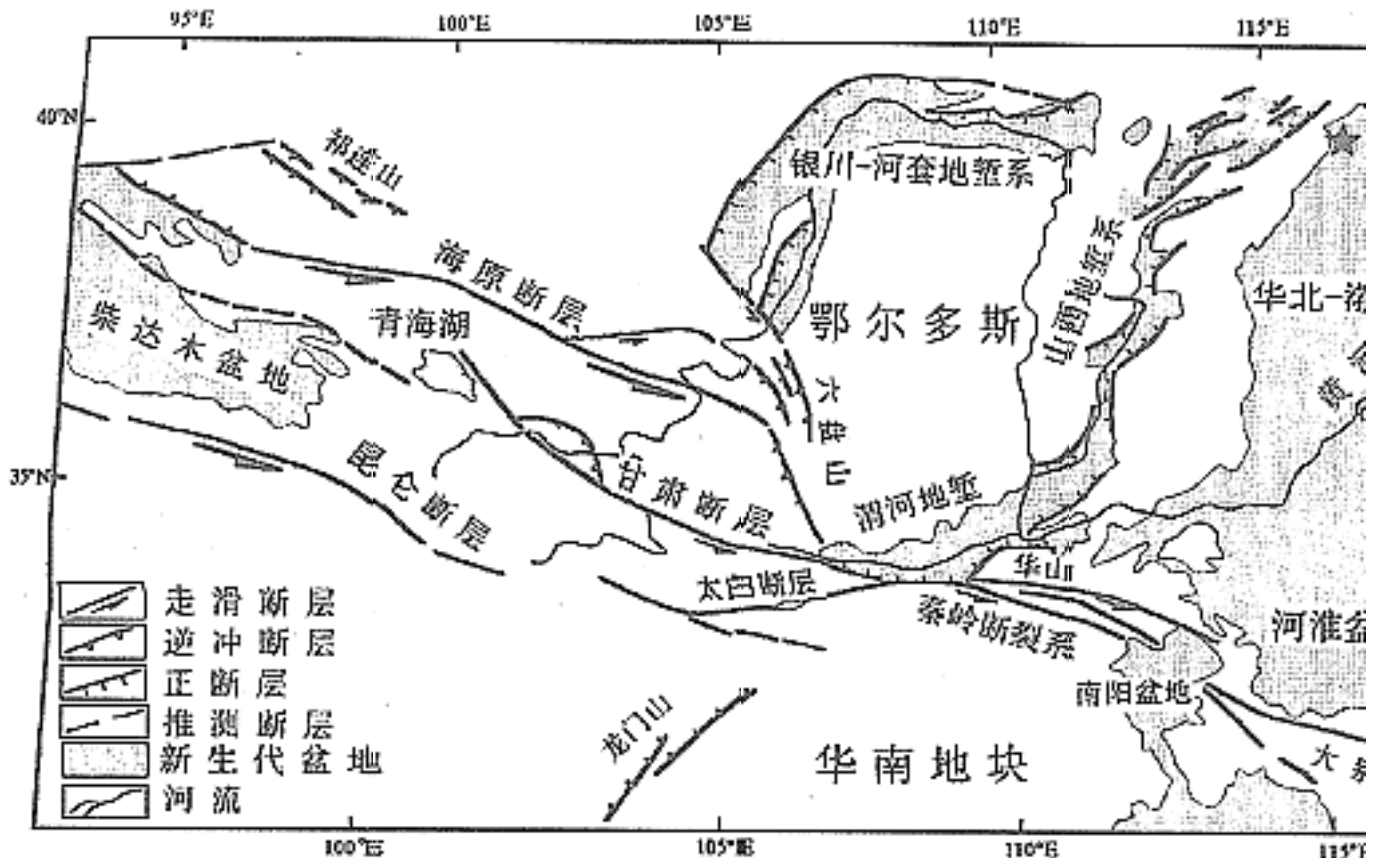




图1 青藏高原东北边缘和华北地区主要活动构造纲要图

Fig.1 Sketch map outlining major active tectonic features along the NE margin of Tibetan plateau and in North China

日益增加的野外证据充分表明，发生在青藏高原与戈壁—蒙古地块之间侧向运动主要分布在两条左旋活动走滑断裂带——海原断层和昆仑断层(图1)。另外，华北地区受广泛的地壳引张变形所主导。这两种对照显著的构造形变体制是如何联结的，目前不甚清楚。关于青藏高原东北缘左旋走滑变形是否以及如何向东扩展并传递到 105°E 以东的华北引张构造域一直是一个有争议的问题，为国际地学界所关注[14, 19~21]。本文的目的是，基于鄂尔多斯地块周缘地堑系和秦岭左旋活动断裂系的新的运动学资料，阐述我们对华北地区扩展大地构造作用过程的最新理解。

1 华北地块伸展断裂作用、地壳引张和地块旋转

华北地块展布在东西宽1200km、南北长800km至1100km的区域范围(图1)，发生在最后45Ma~50Ma的陆内裂谷作用将该地块分裂成东部和西部两个构造域，之间被太行山脉所分隔，每一个构造域具有特定的盆地地貌特征和地质演化历史[5~7, 22]。根据2500多年的历史记载，华北地区是中强地震的高发区。

西部构造域包含两个狭长的地堑系，分别展布在鄂尔多斯地块的北至西北边缘以及南至东南边缘。SPOT卫星图像分析[23]以及野外观测[19, 24~25]表明，这些地堑盆地展示了丰富的活动地貌证据，指示斜向正倾滑断裂作用，伴随着共轭的右旋和左旋走滑分量。根据渭河地堑盆地内断层滑动矢量的野外分析结果表明[26~27]，自中

新世晚期以来(约 $6\text{Ma} \pm 3\text{Ma}$)，盆地处于NW~SE向引张应力作用之下(即最大主压应力轴是垂向的)。根据鄂尔多斯周缘地堑盆地内的地震震源节面解资料的反演结果表明，现今区域应力场是以NW~SE向的引张应力机制占主导地位^[16, 28]。基于地质和地震反射剖面资料，初步估算了横穿地堑盆地的上新世~第四纪时期的地壳引张速率^[16, 29]。结果显示了沿西缘和西北边缘的银川-河套地堑系的快速拉伸以及沿渭河-山西地堑系的拉伸速率呈现由南向北显著减小趋势。总体的引张变形特征指示了鄂尔多斯和太行山两个活动地块相对旋转的运动学型式。根据这个运动学型式，鄂尔多斯地块相对于戈壁-蒙古地块作反时针旋转，其旋转轴大约位于北纬 42.5° ，东经 117° ，这个地块之间的相对旋转运动为银川-河套地堑系的引张变形所调整。另一方面，太行山地块相对于鄂尔多斯地块作反时针旋转，其旋转轴大约位于北纬 41° ，东经 123° ，为渭河-山西地堑系的拉伸变形所调节。

东部引张构造域包含了北部菱形和南部三角形两个盆地区，它们的东界是NNE走向的郯庐断裂带。这些盆地经历了相同的新生代构造历史^[5~7]。早第三纪强烈的陆内裂谷作用导致了本区地壳减薄，伴随着晚第三纪和第四纪时期的区域热沉降作用。控制早第三纪裂谷盆地的断裂构造显示了更为弥散分布的特征，地震反射剖面资料表明这些断裂构造自上新世以来发生过间歇性的复活。地震震源机制解和地表破裂资料指示了NNE至NE走向断裂的右旋走滑运动(最大主压应力方向为NE~SW，最小主压应力方向为NW~SE)^[30]。

NNE走向的郯庐断裂带是中国东部岩石圈主要不连续面之一，构成了华北地块新生代引张构造域的东界。野外观察表明，位于大别山东缘的郯庐断裂带南段，其最新构造运动是右旋走滑，同时具有微小的正向倾滑分量^[15]。在江苏和山东境内的郯庐断裂带中段和北段，其第四纪活动指示了右旋走滑兼具逆冲分量。沿断裂带发生的地震震源机制解资料指示了断裂运动的走滑应力机制，其最大和最小应力轴方向分别为近EW和SN。

2 秦岭断裂系的左旋走滑及其向东消减

在渭河地堑以东地区，一组近EW走向的断裂纵切秦岭山脉，这些断裂带展示了显著的第四纪左旋活动的地貌特征^[15, 31]。左旋走滑变形集中分布在三条主断裂带上，它们是洛南断裂、商县断裂和丹凤断裂，向东汇聚并隐伏于南阳盆地第四纪沉积物之下。通过SPOT卫星图像测量的沿断裂带水系错断标志指示秦岭左旋活动断裂系第四纪累积位移速率大约是 7.2mm/a 。部分左旋走滑变形被断裂带一侧的帚状断裂构造所吸收，这种断裂作用型式沿洛南断裂的北侧尤为发育，使该断裂的左旋走滑位移量向东显著减小。另一部分左旋走滑变形继续向东扩展，传递到位于南阳盆地以东的大别山变质杂岩体南北两侧的两条主要断裂带。SPOT卫星图像分析和野外观察表明，在大别山地区，断裂带左旋走滑变形的地貌特征不甚显著；大别山变质杂岩体本身被一组NNE至NE走向的断裂所切割，这组断裂显示了右旋走滑兼具正向倾滑变形的地貌特征。秦岭断裂系左旋走滑在大别山地区正是通过这种“书架”式断裂作用的组合型式而得到位移调节。值得注意的是，秦岭左旋走滑断裂系似乎终止在郯庐断裂带的西侧，后者没有被前者错断。

3 从左旋走滑到引张变形的转移机理：扩展大地构造

如上所述,鄂尔多斯周缘引张构造域表现为以正向倾滑为主的伸展断裂作用,受制于NW~SE向地壳引张;而位于太行山以东的华北东部引张构造域内,活动断裂作用型式以NNE~NE走向的右旋走滑变形占主导;东界郟庐断裂带表现为压性右旋走滑变形的应力机制。另一方面,秦岭断裂系左旋走滑位移幅度由西向东显著减弱。这些断裂运动的方向和幅度大小的空间变化暗示了华北地块新构造和活动构造变形的驱动力是来自西部青藏高原。一个关键的问题是沿秦岭断裂系的左旋走滑是如何从西部传递过来的。在建立东西部运动学联系之前,让我们考虑下列两个观察到的事实。

(1)在渭河地堑西部地区,EW走向的甘肃断裂带看起来继续沿着渭河流域向东沿伸;而近SN走向的六盘山冲断带交接终止在该断裂带的北侧。早期Tapponnier和Molnar(1979)曾推测该构造的交接部位是构造作用重要的地区。根据覆盖该地区的SPOT卫星图像的构造地貌分析和野外观察揭示^[32],该部位并没有发生显著的断裂左旋活动或正向倾滑活动。这个观察事实与下列的推论是一致的,即海原活动左旋走滑断层可能是青藏高原东北边缘最快滑动的断层(速率为10mm/a^[14,20,33]),向东终止在SN向六盘山褶皱冲断带。由此,我们推断沿海原断层的左旋走滑很少或没有向东扩展到秦岭左旋走滑断裂系。

(2)秦岭北麓断裂带位于渭河地堑的南缘,SPOT卫星图像的构造地貌分析以及详细的野外活动断裂填图展示了断裂活动性的侧向分段特征^[15,34]。沿断裂带的中段和东段,活动断崖和古地震遗迹极为发育,而西段的活动性则相对较弱。中段和西段之间为太白断裂所分隔,后者斜切秦岭山脉,汇聚于秦岭北麓断裂带。目前,对这条断裂带的活动习性没有作过详细的研究。我们从秦岭北麓断裂带的分段特征推测,太白断裂可能是西部昆仑左旋走滑断裂系和东部秦岭左旋走滑断裂系的联结通道,位于渭河地堑东部地区的秦岭断裂系的左旋走滑是通过该断裂从昆仑左旋走滑断裂系传递过来的。

考虑到了上述两个观察事实,我们提出了华北地块活动构造的一个运动学联结模式(图2)。这个模式阐明了青藏高原东北边缘主要断裂构造的左旋走滑变形与华北地区引张变形之间的运动学耦合和扩展机理。它区分了两个左旋扩展构造系统,一个由海原断裂代表,另一个由昆仑-秦岭断裂系代表。这样的区分有助于更好地理解中国大陆内部与陆-陆碰撞相关的侧向挤出大地构造,同时表明断裂带左旋走滑的向东扩展是华北地区上新世~第四纪时期构造变形的主要驱动力。断裂构造扩展的型式在很大程度上取决于所发生地区先存破裂构造的格局。海原断层左旋走滑的向东扩展导致了鄂尔多斯刚性地块的顺时针旋转以及沿着该地块西北边缘的引张变形。相对照的是,由于华北地块东部地区的基底岩石遭受早第三纪强烈的陆内裂谷作用而发生很大程度的破裂,昆仑-秦岭断裂系左旋走滑的向东扩展导致了广大地区范围内先存断裂构造的复活,产生了鄂尔多斯刚性地块以东的华北地区弥散分布的活动断裂作用型式,包括了狭长形展布的渭河-山西地堑系以及整个东部引张构造域,影响的范围达到1200km。扩展挤出大地构造的一个共同的特征是地块的顺时针旋转运动。

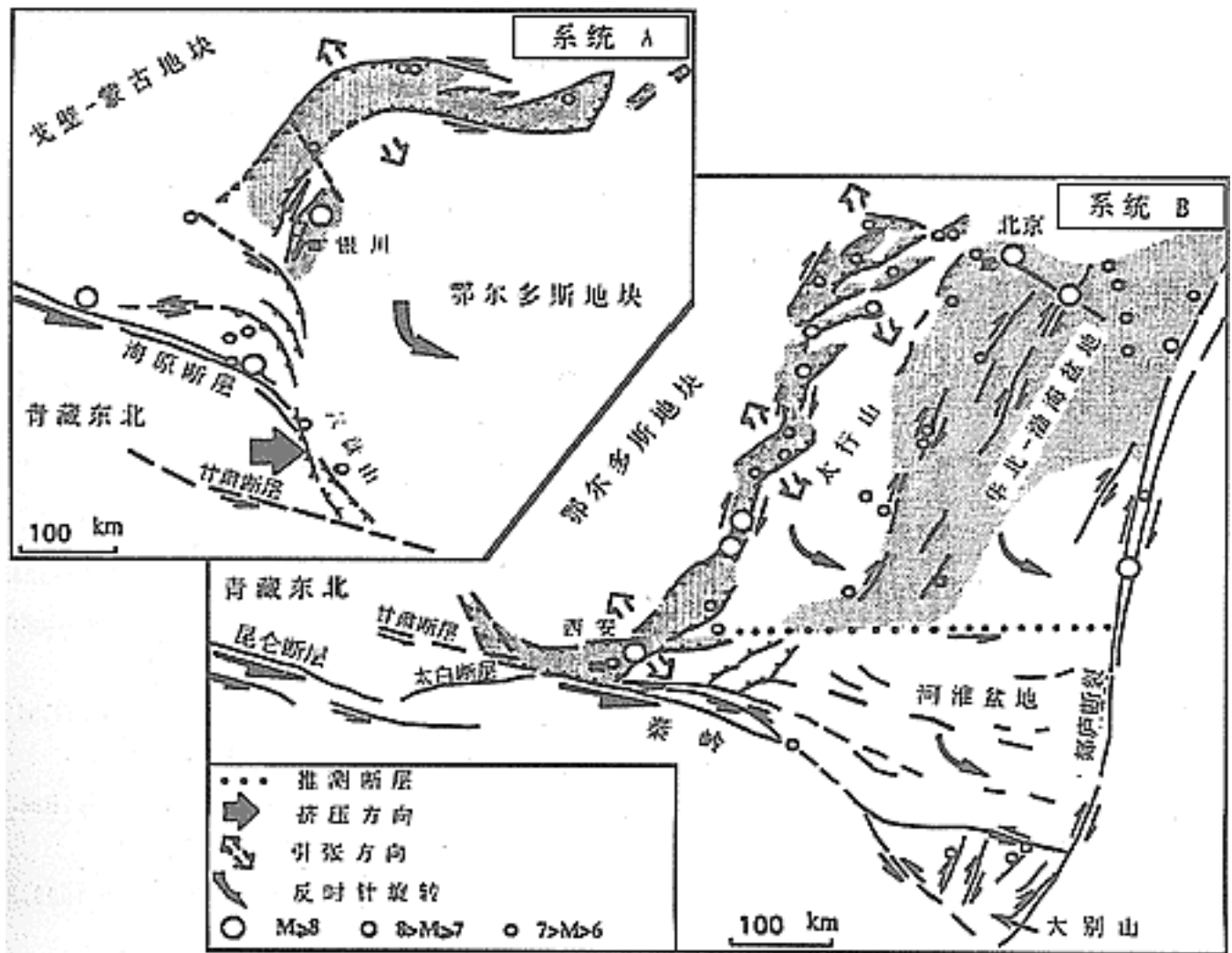


图2 青藏高原东北边缘断裂构造左旋走滑变形和华北地区引张构造变形的运动学耦合模式图

Fig.2 A kinematic model linking left-lateral strike-slip faulting in NE Tibet with extensional domains in North China

从区域运动学角度看，昆仑-秦岭断裂系的左旋走滑是对华南地块相对于鄂尔多斯地块作向东侧向运动的位移调节，运动方向大约 $N100^{\circ}E$ (ESE方向)，速率为 5mm/a 。加上鄂尔多斯地块本身相对于戈壁-蒙古地块作反时针旋转，那么，华南地块相对于戈壁-蒙古地块的左旋侧向运动大约为 12mm/a ，运动方向是 $N115^{\circ}E$ 。

基金项目：地质力学开放研究实验室项目

作者简介：张岳桥(1963—)，男，副研究员，博士，主要从事新构造与活动构造研究。

作者单位：张岳桥¹ 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；

P.Vergely J.L.Mercier URA-CNRS : Geophysique et Geodynamique Interne, Universite de Paris-Sud,F-91405,France.

参考文献

- [1] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision [J] . *Sciences*, 1975, 189: 419 ~ 426.
- [2] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and tectonics in China [J] . *J. of Geophys. Res.*, 1977, 82(20): 2905 ~ 2930.
- [3] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts and basins during the Indian-Asia collision: an experimental approach [J] . *J. of Geophys. Res.*, 1988, 93 : 15085 ~ 15117.
- [4] Molnar P, Deng Q D. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in central and eastern Asia [J] . *J. Geophys. Res.*, 1984, 89 : 6203 ~ 6228.
- [5] Ma X Y, Deng Q D, Wang Y P, Liu H F. Cenozoic graben system in north China [J] . *Z. Geomorph. N.F.*, 1982, 42 : 99 ~ 116.
- [6] Ma X Y, Liu G D, Su J. The structure and dynamics of the continental lithosphere in north-northeast China [J] . *Annales Geophysicae*, 1984, 2(6): 611 ~ 620.
- [7] Ma X Y, Wu D N. Cenozoic extensional tectonics in China [J] . *Tectonophysics*, 1987, 133: 243 ~ 255.
- [8] Lithospheric Dynamic Map of China [M] . edited by Ma, X. Y., Geological Press, Beijing, 1986.
- [9] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics [J] . *Nature*, 1976, 264: 319 ~ 324.
- [10] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain A Y , Armijo R. and Cobbold P. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiment with plastine [J] . *Geology*, 1982, 10: 611 ~ 616.
- [11] Tapponnier P, Peltzer G , Armijo R. On the mechanics of the collision between Indian and Asia [A] . Ramsay J G, M P Coward, A Ries, *Collision tectonics* [C] , Spec. Pub. Geol. Soc. London, 1986, 19: 115 ~ 157.
- [12] Armijo R, Tapponnier P, Han T. Late Cenozoic right-lateral strike-slip faulting in southern Tibet [J] . *J. Geophys. Res.*, 1989, 94: 2787 ~ 2838.
- [13] Avouac J P , Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia [J] . *Geophys. Res. Lett.*, 1993, 20(10): 859 ~ 898.
- [14] Gaudemer Y, Tapponnier P, Peltzer G , Meyer B, Guo S, Chen Z, Dai H and Cifuentes I. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in eastern Qilian Shan, and evidence for a major seismic gap, the Tianzhou gap , on the western Haiyuan Fault, Gansu, China [J] . *J. Geophys. Inter.*, 1995, 120: 599 ~ 645.
- [15] Zhang Y Q, Vergely P, Mercier J L. Active faulting in and along the Qinling Range (China) inferred from SPOT imagery analysis and extrusion tectonics of south China [J] . *Tectonophysics*, 1995, 243: 69 ~ 95.
- [16] Zhang Y Q, Mercier J L, Vergely P. Extension in the graben system around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of south China with respect to Gobi-Mongolia [J] . *Tectonophysics*, 1998, 285: 41 ~ 75.
- [17] Cobbold P R, Davy Ph. Indentation tectonics in nature and experiment 2: Central Asia [J] . *Bull. Geol. Inst. Univ. Uppsala, N.S.*, 1988, 14: 129 ~ 141.
- [18] England P, Molnar P. Right-lateral shear and rotation as the explanation of strike-slip

faulting in eastern Tibet [J] .Nature,990:140 ~ 143.

[19] Deng Q D,You H C.The tectonic activity and formation mechanism of the down-faulted basins around the Ordos block [A] .Research on recent crustal movement,1,continental rifts and deep internal processes [C] .Beijing,geological Press,985:58 ~ 78.

[20] Burchfiel B C,Zhang P Z,Wang Y P , Zhang W,Song F,Deng Q D,Molnar P and Royden L.Geology of the Haiyuan fault zone,Ningxia-Hui autonomous region,China,and its relation to the evolution of the northeastern margin of the Tibetan plateau [J] . Tectonics,1991,10(6):1091 ~ 1110.

[21] Zhang P Z,Burchfiel B C,Molnar P,Zhang W,Jiao D,Deng Q,Wang Y P,Royden L, Song F M.Amount and style of late Cenozoic deformation in the Liupan Shan area,Ningxia autonomous region,China [J] .Tectonics,1991,10(6):1111 ~ 1129.

[22] Ye H,Zhang B T,Ma F Y.The Cenozoic tectonic evolution of the great North China: two types of rifting and crustal necking in the great North China and their tectonic implications [J] .Tectonophysics,1987,133:217 ~ 227.

[23] Zhang Y Q,Vergely P,Mercier J L.Fault segmentation,active faulting and oblique extension along the Shanxi graben system (North China):observations from SPOT images [J] . Annales Tectonicae,1994, (1):3 ~ 22.

[24] Zhang B Y,Liao Y,Guo S,Wallace R E,Bucknam R and Hank T.Fault scarps related to the 1739 earthquake and seismicity of the Yinchuan graben,Ningxia Hui Zuzhiqu [J] .Bull.of Seism.Am.,1986,76(5):1253 ~ 1287.

[25] Xu X W,Ma X Y.Geodynamics of the Shanxi rift system,China [J] . Tectonophysics.1992,208:325 ~ 340.

[26] Bellier O,Mercier J,Vergely P,Long C X,Ning C Z.Evolution sedimentaire et tectonique du graben cenozoique de la Weihe (Province du Shaanxi,Chine du Nord) [J] .Bull. Soc.Geol.France,1988, (6):979 ~ 994.

[27] Bellier O,Vergely P,Mercier J, Ning C Z,Deng N G,Yi M C,Long C X.Analyse tectonique et sedimentaire dans les Monts Li Shan(Province du Shaanxi,Chine du Nord); datation des regimes tectoniques extensifs dans le graben de la Weihe [J] .Bull.Soc.Geol. France,1991,162:101 ~ 112.

[28] Xue H Y,Yang J Q.Recent crustal stress field around the Ordos block [J] .Acta Geophysica Sinica,1984,27(2):144 ~ 152.

[29] Wesnousky S G,Jones L M,Scholz C H and Deng Q.Historical seismicity and rate of crustal deformation along the margins of the Ordos block,North China [J] .Bull.Seis.Soc. Am.,1984,74(5):1767 ~ 1783.

[30] Chen W P,Nabelek J.Seismological strike-slip faulting and the development of North China basin [J] .Tectonics,1988,7:975 ~ 989.

[31] Peltzer G,Tapponnier P,Zhang Z T,Xu Z Q.Neogene and Quaternary faulting in and along the Qinling Shan [J] .Nature,1985,317:500 ~ 505.

[32] Binelli-Chahin M,Vergely P,Masson Ph.Computer processing of Landsat and SPOT images for the morpho-structural analysis of the Weihe graben [J] .ISPRS J.,Photogrammetry and remote sensing,1990,45:297 ~ 315.

[33] Zhang P Z,Molnar P,Burchfiel B C.Royden L,Wang Y P,Deng Q and Song F M. Bounds on the Holocene slip-rate on the Haiyuan fault,north-central China [J] .Quaternary

Reserch,1988,30:151 ~ 164.

[34] Shentu G M,Song F M,Cao Z Q.Wang Y P.Preliminary study on late Quaternary fault scarps on the northern piedmont of the Qinling mountain [J] .Seismology and Geology,1991,13(1):15 ~ 25.

收稿日期：1999-07-20