

文章编号: 1006-6616 (2003) 04-0313-17

太行山隆起南段新构造变形过程研究

张岳桥, 杨 农, 马寅生

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 基于 TM 遥感影像解译和断裂滑动矢量资料的野外观测, 结合年轻地质体热同位素和放射性同位素年代学测试结果分析, 重点描述了太行山隆起南段构造地貌特征, 划分了新构造变形阶段, 确定了新构造应力场及其转换历史。研究表明, 新近纪以来, 太行山南段经历了两期重要的引张变形时期。中新世中晚期, 伴随华北地区广泛的基性火山喷溢活动, 太行山南段受近 NE-SW 向引张应力作用, 构造变形集中在南段东缘和南缘断裂带上。上新世至早更新世时期, 强烈的 NW-SE 向地壳引张导致太行山隆起南段夷平地貌的解体 and 地堑盆地的形成。自中晚更新世以来, 太行山南缘断裂带成为新构造变形的的主要边界带。断面滑动矢量分析和山前年轻冲积扇体和小冲沟沿断裂错移特征分析, 表明太行山南缘断裂带是一条斜张左旋走滑边界断裂带, 引张方向为 NW-SE 至 NNW-SSE。从区域大地构造角度, 中新世中国东部 NE-SW 向拉伸作用与东部太平洋板块向西俯冲导致的弧后扩张动力过程有关; 而上新世以来新构造变形是与青藏高原快速隆升及其向东构造挤出作用有关。

关键词: 太行山隆起; 新构造变形; 构造应力场; 华北地区

中图分类号: P546

文献标识码: A

新构造变形序列是新构造研究的重要内容, 是新构造运动时期不同变形阶段的时间序列^[1]。研究表明, 中国大陆处于不同岩石圈动力作用之下, 新构造变形历史复杂, 变形过程显示非平稳性特征^[2-6]。

华北地区属于中国大陆 I 级新构造运动分区。位于华北地区中部的太行山隆起是华北东部重要的构造地貌单元, 其东缘和南缘构成了重要构造地貌边界带。地球物理探测资料和盆地新生代地层厚度资料表明^[7,8], 太行山东缘是一条岩石圈尺度的构造变异带, 深部对应地壳和岩石圈厚度的陡变带, 称为太行山东麓断裂带。与中国大陆其他岩石圈尺度的深断裂相比(如郯庐断裂带、阿尔金断裂、红河断裂等), 这条断裂带并没有地表贯通的破裂构造, 其构造地貌形态不规则, 浅部受一组平原区地壳拆离正断层控制^[8-10]。对太行山东缘地貌边

收稿日期: 2003-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 49972076)资助项目

作者简介: 张岳桥(1963-), 男, 研究员。1984年毕业于原武汉地质学院, 1994年获得巴黎南方大学地质学博士学位, 现任中国地质科学院地质力学研究所研究员, 主要从事新构造和盆地分析的研究工作。通讯地址: 北京市海淀区民族大学南路11号, 100081。联系电话: 010-68412311, E-mail: zhangyueqiao@yahoo.com

界带形成历史和构造性质的认识存在较大的分歧。许多学者强调这是一条重要的边界断裂带,它的形成和发展控制了中国东部断块构造的演化历史^[1]。也有学者提出,太行山东缘断裂带是一条岩石圈拆离断裂^[2]。活动构造研究表明,太行山东麓断裂带不是一条严格意义上的地震构造带^[3]。

本文以豫西北太行山隆起南段为主要研究地区,在TM遥感影像图解译的基础上,通过对区内构造地貌分析和主要断裂滑动矢量的野外观测,重点剖析太行山隆起南段新构造活动特征、新构造变形的阶段性和构造应力场转换,探讨新构造变形的区域动力学意义。

1 太行山隆起南段构造地貌与山前沉积物

地形地势特征分析结合漳河水系中上游坡降比特征,太行山南段由西向东总体上分为三级构造地貌阶梯,它们分别对应山地侵蚀构造地貌、山间盆岭构造地貌和山缘过渡构造地貌(图1,图2)。

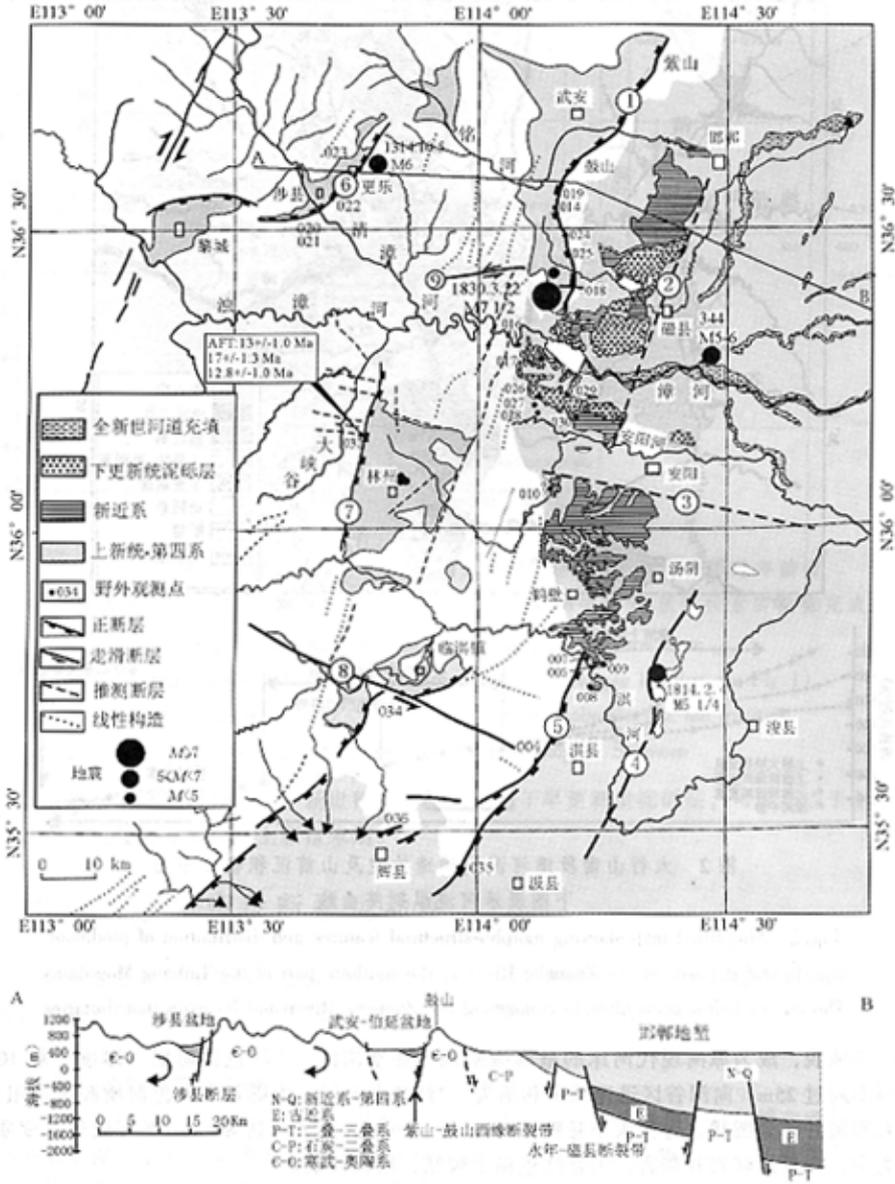
山地侵蚀构造地貌构成了太行山隆起主体,遭受河流的强烈下切作用,在漳河上游形成三大支流(清漳河、浊漳河和大峡谷),河道深切到下古生界和中新元古界之中,在大峡谷谷地局部有太古宙变质岩出露。在山地侵蚀地貌残留两级主夷平面。最高一级位于地形高程1800m以上,以太行山南缘王屋山和林州盆地西部大峡谷以西的山体为代表,与山西五台山地区古近纪初的北台面可对比。形成于中新世末至上新世初的唐县期夷平面,因上新世以来地块伸展作用,所处的高程不一,在山地地区一般为800~1200m,在山麓东缘一般位于150~200m。

山间盆岭构造地貌主要由林州盆地、武安—伯延、临淇镇盆地等及其相邻的中间山地构成,盆地地形平坦,海拔高程在500m左右,中间山地海拔高程为550~700m之间,主体由早古生代碳酸盐岩组成,在鼓山为800m,可能代表唐县期夷平面。根据山间盆地充填物类型和时代,该构造地貌开始发育于上新世,并持续到第四纪早期。

山缘过渡构造地貌带是山地侵蚀地貌向平原堆积地貌的过渡带,呈狭窄带状展布,该带主要由晚新生代沉积物组成,以砂岩、砾岩为主,河流侵蚀作用不强烈,海拔高程小于500m。受近东西向横向构造影响,山缘过渡构造地貌带被分成南北几段。

位于安阳河和淇河之间的鹤壁构造地貌带由新近系砂砾岩组成。根据区测资料,新近系下部地层称为彰武组,厚约70m,主要由砂岩、含砾砂岩、砾岩、杂色粘土等组成,砾岩成分以灰岩和二叠系砂岩为主。中部地层称为鹤壁组,也称鹤壁集砾岩,对应一套砂岩和砾岩,砾石成分以灰岩为主,磨圆度好,砾径1~10cm,胶结紧密。上部为庞村组,是一套黑褐色至浅灰色中基性火山角砾岩和凝灰岩,分布局限。该带于中新世末期整体隆升,伴随中新世晚期基性火山喷溢活动,在淇河地区形成数个古火山口,其形态保存完好。我们获得了两个玄武岩K-Ar和全岩⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素测年结果,指示基性火山喷溢活动发生在7~17Ma(图3),相当于中新世中、晚期。

安阳河以北地区的狭长地带是漳河山前沉积物发育区。据野外观测,该带发育几套砾岩层。下部砾岩层出露于山缘一带,岩层发生翘倾,局部倾角达20°。砾石成分以变质砂岩和灰岩为主,磨圆度高,分选一般,砾径一般5~10cm,胶结致密,在所夹的砂岩层中,见交错层理,指示典型的河流冲积扇体沉积环境。这套砾岩层与鹤壁地区的鹤壁集砾岩层具有相似的沉积特征。在砾岩层之上普遍覆盖一层“红色泥砾岩”,主要分布在地貌高地,构成



主要断裂名称：① 紫山-鼓山西缘断裂；② 永年-磁县断裂；③ 安阳河断裂；④ 汤东断裂；⑤ 汤西断裂；
 ⑥ 沙县断裂；⑦ 林州西断裂；⑧ 临淇镇南断裂；⑨ 南山村-叉口活动断层
 Main faults: ① Western Zishan-Gushan marginal fault; ② Yongnian-Cixian fault; ③ Anyanghe fault; ④ Tangdong fault;
 ⑤ Tangxi fault; ⑥ Shexian fault; ⑦ Linzhouxi fault; ⑧ Linqizhenan fault; ⑨ Nanshancun-Chakou active fault.

图 1 太行山隆起南段新构造图
 Fig. 1 Neotectonic map of the southern part of the Taihang Mountains

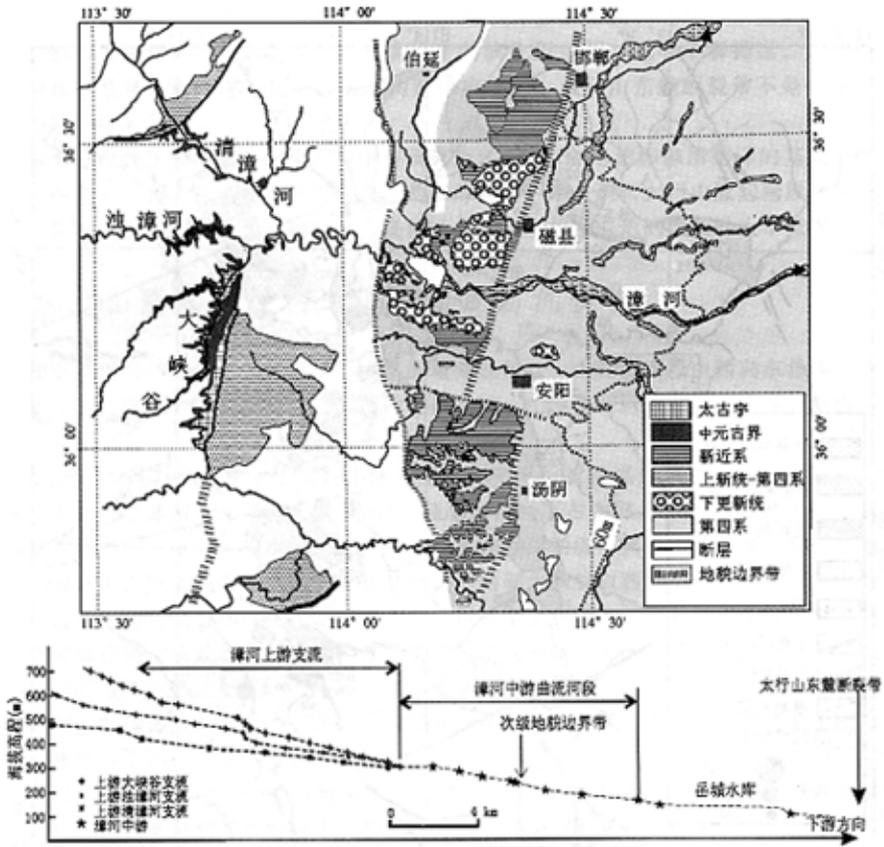


图 2 太行山南段漳河流域构造地貌及山前沉积物分布图

下图表示河流纵剖降曲线

Fig. 2 Simplified map showing morpho-structural features and distribution of piedmont range-frontal deposits of the Zhanghe River in the southern part of the Taihang Mountains.

The curves below show altitude changes of the Zhanghe River and its main distributaries

垄岗型地貌，成为漳河现代河床的最高级阶地。在垄岗区，“红色泥砾层”厚度一般 10m，最厚不超过 25m，向河谷区迅速减薄和消失。“红色泥砾层”由砾石和红色泥质胶结物组成，砾石磨圆好，呈圆状，砾径大小悬殊，一般 20~50cm，大者可达 80cm。砾石成分以变质砂岩为主，少量片麻岩和灰岩，为紫红色粘土胶结，结构松散。

在胶结紧密的砾岩层与上覆松散泥砾层之间，局部地区尚发育一套河流相砂砾岩层。在靠近垄岗区的一个采沙场（图 1 观察点 26，27，28），我们观察到泥砾层底部一个重要的侵蚀界面（图 4）。该层之下为一套河流相沉积。下部是一套砂砾岩，砾石成分以变质砂岩为主，磨圆好，砾径大小混杂，一般 10~15cm；向上相变为交错层理发育的含砾砂岩，灰白色的砂岩胶结程度差，当地老百姓开采作建材之用。砂岩层顶部发育一层水平状褐红色的粘土，厚约 1.5m，可能代表了太行山山前古风化壳沉积。古风化壳已遭受侧向侵蚀，发育不

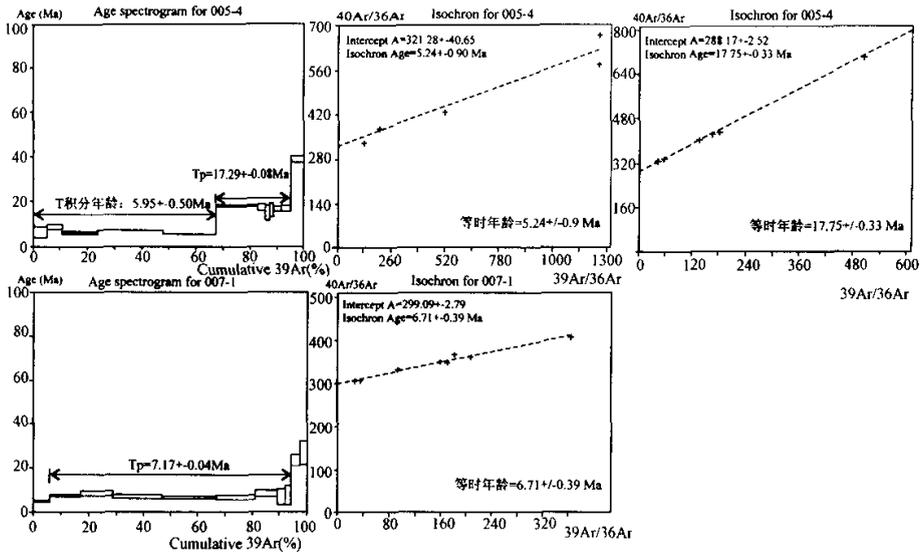


图 3 2 个玄武岩样品 (005-4 和 007-1) 全岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄和等时年龄谱 (样品位置见图 1)。样品测试由中国地质科学院地质研究所氩-氩同位素实验室完成。

Fig.3 Whole rock ^{40}Ar - ^{39}Ar Ar plateau and isochron ages of two basalt samples taken from the studied area (for sample location see Fig.1).
The dating was made in the Argon-Argon Isotopic Laboratory of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences

全。这套地层的沉积时代晚于中新世鹤壁集砾岩，早于早更新世泥砾层，可能形成于上新世时期，顶部的侵蚀面发生在上新世末期。

2 太行山隆起南段断裂运动学

太行山隆起南段发育多条正倾滑断层，它们控制了该区上新世至第四纪山间断陷盆地的发育。这些断陷盆地的沉积充填和边界断裂运动很好地记录了该区新构造变形历史和运动过程。

2.1 地堑盆地边界断裂构造

这些断裂构造有：紫山—鼓山西缘断裂、林州西断裂、涉县断裂、临淇镇南断裂等。其共同特征是控制了上新世-第四纪半地堑盆地的发育。同时，断层翘倾运动伴随着下盘陡峻构造地貌的形成和基底岩系的出露。在林州西断裂下盘，出露一套华北地块太古宙基底岩系，中元古界变质砂岩和变质砾岩不整合覆盖其上。我们从断裂下盘太古宙基底岩系中采集了 3 块样品进行磷灰石裂变径迹年龄测试，结果显示其暴露时代分别为 $13 \pm 1\text{Ma}$ ， $17 \pm 1.3\text{Ma}$ 和 $12.8 \pm 1\text{Ma}$ 。在涉县盆地东缘，产状平缓的中元古代变质石英砂岩（常州沟组和串岭沟组）构成陡峻的地形，与盆缘地形高差大于 700m。紫山—鼓山西缘断裂两侧地形高差达 400m（表 1）。

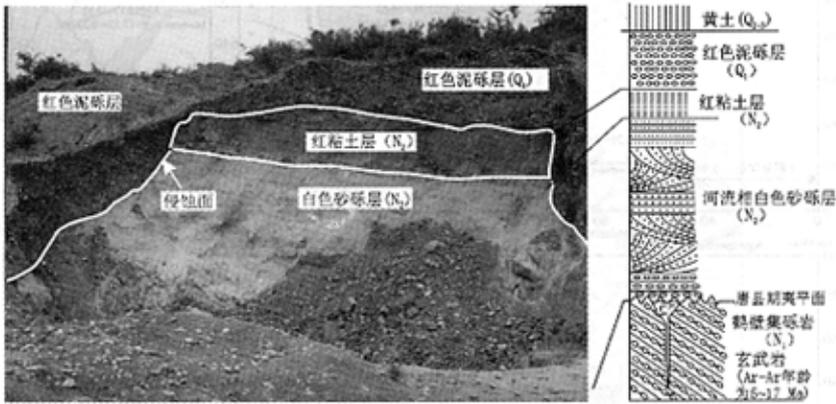


图4 垆岗区早更新世红色泥砾层野外特征及其与下伏上新世河流相沉积层之间的侵蚀不整合接触关系(观测点027)(右侧为新近系-第四纪地层柱状简图)

Fig.4 Field view of the early Pleistocene red mud and pebble layer underlain unconformably by the Pliocene fluvial sediments (right side: simplified Neogene to Quaternary stratigraphic column)

表1 太行山南段上新世-第四纪盆地主边界断裂垂直断距一览表

Table 1 Vertical throws of graben-bounding faults in the southern Mts. Taihangshan

断陷盆地	主边界断裂	断裂长度 (km) 和倾向	盆地沉积厚度 (m)	盆缘地势高差 (m)	推测断裂垂直断距 (m)
林州盆地	林州西断裂	30, E	300	700 ~ 800	1000 ~ 1100
武安-伯延盆地	紫山-鼓山西缘断裂	> 40, W	50 ~ 300	250 ~ 446	300 ~ 746
涉县盆地	涉县断裂	23, W	50 ~ 200	500 ~ 600	550 ~ 800

据钻孔资料揭示^[13], 这些地堑盆地下部充填一套上新世河流相沉积为主的红色砾岩和粗砂岩和早更新世河流相沉积物, 上部为晚更新世冲、洪积次生黄土堆积所覆盖。最大沉积厚度位于林州盆地的西侧, 重力资料反演充填物厚度为300m左右。

紫山-鼓山西缘断裂构成了武安-伯延盆地的东界。野外断层滑动矢量观测表明, 伴随盆地形成的断裂活动经历了运动方向的变化, 早期运动指示 NWW-SEE 向引张, 晚期指示 NNW-SSE 方向的引张。野外调查还发现, 沿紫山-鼓山西缘断裂带发育的晚第四纪溶洞塌陷角砾岩(图1观察点14)没有被主边界断裂错动; 对溶洞塌陷角砾岩中发育的方解石矿物和断层面上方解石矿物分别作 ESR 年代学分析(表2), 结果表明至少 0.45Ma 以来, 即中更新世以来, 紫山-鼓山西缘断裂没有明显的活动。

地震地质研究表明^[14,15], 现今的地震活动并不受盆缘断裂构造的控制。

2.2 太行山东缘断裂带

太行山东缘断裂带主体隐覆于第四系之下, 地表没有直接出露。在遥感图像上, 显示为一明显的线形影像特征。根据盆地钻探资料, 断裂活动控制了古近纪-新近纪盆地的沉降历史, 汤阴地堑是较典型的例子。汤西断裂(也称青羊口断裂)是汤西地堑盆地的西界断裂,

该断裂上新世活动较强,可能持续到中更新世,垂直错距达 80m^[16]。晚更新世以来活动减弱,可能转为右旋走滑活动。

表2 紫山—鼓山西缘断裂带方解石 ESR 年龄测定结果

Table 2 Calcite ESR dating for the Zishan-Gushan fault zone

样品号	D (mGy/y)	TD (Gy)	年龄 (Ka)	样品位置
014-1	0.41	184.35	449	岩溶崩塌角砾
014-2	0.43	586.15	1363	断层面上
018-1	0.41	88.78	216	断裂下盘岩溶裂隙

安阳河以北地区,太行山东缘主断裂称为永年-磁县断裂,它控制了古近纪-新近纪邯郸地堇的西缘(图1)。新近纪以来,该断裂活动控制了太行山东缘构造地貌形态特征和山前冲积物的分布特征。漳河山前冲积扇体的发育和迁移反映了该断裂带的活动历史。上新世和早更新世冲积扇体主要发育在该断裂带的西侧,表明当时有另一条山前断裂活动控制了冲积扇体的发育,与太行山南段上新世地堇盆地的发育是同步的。晚第四纪以来,漳河山前扇体位置向东迁移,主要受永年-磁县断裂活动的控制。位于断裂西侧的由早更新世红色泥砾层组成的漳河高阶地被断裂错断下沉,表明晚第四纪以来断裂活动。据许桂林和朱得俞^[11]报道,在岳城镇西发育的一条 NNE 走向的正断裂,垂直断距达 50~60m,断裂活动影响到早更新世红色泥砾层。中国地震局地震地质大队通过浅钻、地貌和历史遗迹资料的分析对比,认为该断裂带是一条晚更新世和全新世明显活动的断裂。韩慕康等^[16]从早期卫片影像特征已经注意到位于永年—磁县断裂东盘的漳河晚第四纪冲积扇体向北东方向偏扭,新的 TM 图象清晰显示漳河晚第四纪冲积扇体的不对称性,可能指示断裂右旋活动迹象(图2)。

2.3 NWW-SEE 向左旋走滑活动断裂与 1830 年磁县地震

太行山隆起南段东麓地带, NWW-SEE 向断裂较发育。这组断裂横切 NNE-SSE 向断裂,显示左旋走滑活动。在临淇镇南部,一条 NWW-SEE 断裂展示了活动的地貌特征;在观测点 034(图1),平直的活动断面上观测到一组细长的左旋走滑擦痕。

太行山南段东麓 NWW-SEE 向断裂是重要的控震及发震构造。根据江娃利等^[14,15]野外调查和研究,发生于 1830 年 M7 1/2 的河北磁县强震是与近 E-W 向南山村-义口活动断裂带左旋活动有关(图1)。该活动断裂向东延伸横切 NNE 走向的紫山—鼓山西缘断裂,地表形成显著的地形陡崖。

2.4 太行山南缘边界断裂带及其左旋斜张走滑活动

太行山南缘断裂近 E-W 向延伸,是一条重要的地质构造分界带,它分隔了南部豫皖断块区和北部太行山断块区,两者基底性质不同,构造样式不一样。南部构造区内构造线以 E-W 向至 NWW-SEE 向为主;而北部构造区构造线以 NNE-SSE 至 NE-SW 向为主,基底还发育 NW-SE 向构造。

太行山南缘断裂带遥感影像十分醒目,是一条新构造运动显著的构造边界带(图5)。根据断裂带地形地貌特征,该断裂可以分为东西两段。西段由 NWW-SEE 至 E-W 走向断裂组成,这些断裂包括封门口断裂、邵原北断裂等,它们构成了北侧王屋山陡峻山脉和南侧丘陵地貌的边界。王屋山最高海拔 1800m,平均海拔 1500m 以上,而南侧丘陵一般为 300m。东段位于济源以东,构成了太行山和南部黄河平原的边界断裂。遥感 TM 图象解译和野外观察表明,太行山南缘断裂带是一条活动断裂带,根据地形地貌和年轻地质体错动特征以及活动断

面滑动矢量的测量资料, 该断裂带是一条左旋斜张性质的走滑断裂。

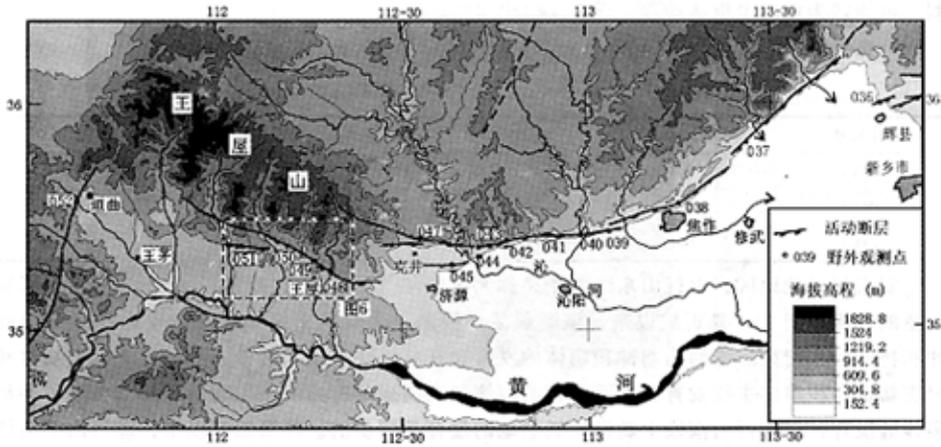


图 5 太行山南缘断裂带构造地貌简图

Fig.5 Simplified morpho-structural map of the southern Taihang Mountains marginal fault zone

断裂带西段, NWW-SEE 走向的封门口断裂显示了左旋走滑的活动特征 (图 6)。在清虚宫 (图 5 观测点 48), 活动主断面平直, 擦痕构造细, 指示其为左旋斜张活动。沿断裂左旋平移导致年轻冲沟水系的错动。在王屋地区, 王屋冲积扇体是一个晚第四纪河流冲积形成的山前扇体, 其形态发育完整, 遥感影像清晰。该扇体下部由河流冲积相砾石组成, 成分主要来源于太行山区前寒武纪变质岩系和火山喷发岩系, 砾石呈圆状或次圆状, 分选差, 砾径一般 10~20cm, 最大超过 80cm, 表明砾石具有一定距离的搬运过程。扇体上部岩层为红色粘土、亚粘土和次生黄土, 夹砾石层和薄层钙质结核, 属于坡积和冲、洪积相沉积。冲积扇体已遭受后期流水侵入作用。扇体的端部位于阳台宫, 被太行山南缘主边界断裂所截切。野外调查发现, 在断裂破碎带中可见扇体上部红色粘土层的卷入, 粘土层中的钙质结核呈垂向排列。一个重要的现象是, 在阳台宫北部的太行山地区, 扇体端部所对应的不是一条深切的河谷, 而是一般的地貌斜坡, 指示该冲积扇体已远离其上游河道。联系到断裂带左旋斜张活动特征, 可以合理地推测扇体早期的物源应位于现今的铁山河, 铁山河出口与王屋山扇体之间相距 3400m, 指明王屋山冲积扇体自形成以来大致向东错动了 3400m。

邵原北断层是一条近东西走向的断裂 (图 6), 它控制了邵原地区古近纪陆相地层分布。在断层西段西阳河以东的下淤泊一带, 野外见到活动断面出露, 镜面和擦痕构造发育, 据方解石生长晶体方向判断断裂左旋走滑活动。沿断裂谷地, 见巨型白色“漂砾”, 直径往往大于 1m, 最大者超过 2.5m。这些“漂砾”成分主要是中元古界常州沟组石英砂岩和砾岩, 组成了西阳河山前冲积扇体。由此推断冲积扇体沿断裂向东错移了约 1300m。

太行山南缘断裂带向东延伸逐渐转变为 NE-SW 走向, 断裂运动也转变为以正向倾滑活动为主。在克井以北 (图 5 观察点 047), 近 E-W 走向的活动断面被山区公路施工而开挖出来, 断面平直, 擦痕细, 指示斜张活动。沿着山麓主断裂带可见一系列水系冲沟被左旋错移。焦作以东山麓边缘断裂显示正向滑动为主的运动学特征。在辉县北 (图 7 观察点 036),

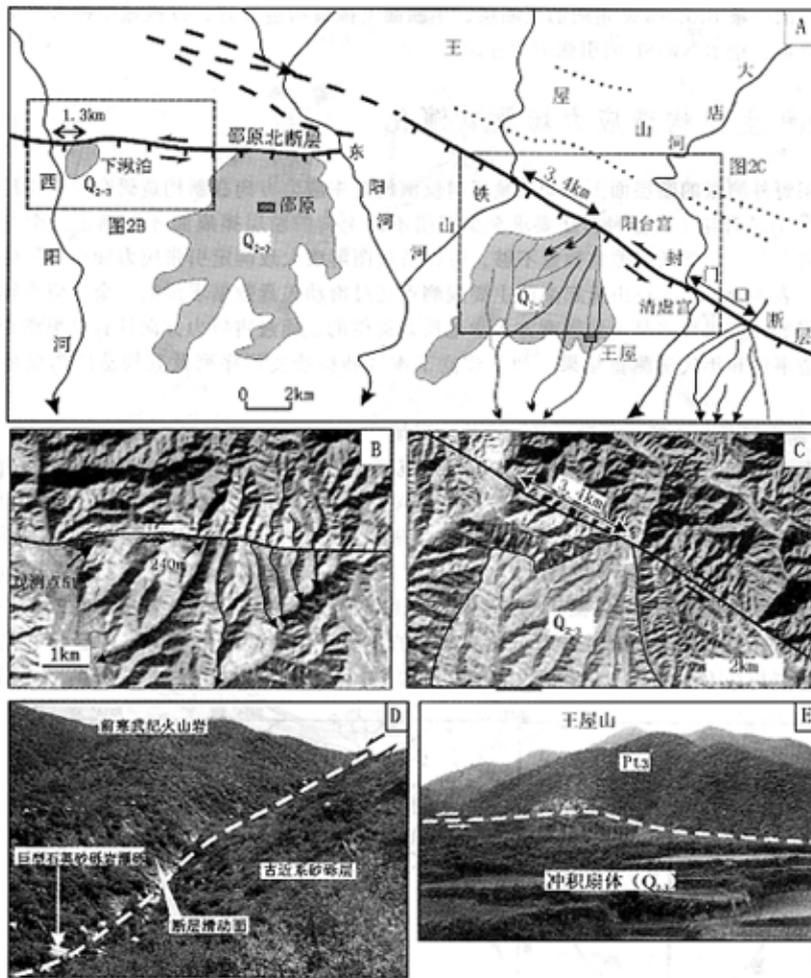


图 6 (A) 太行山南缘断裂带西段构造简图展示山前冲洪积扇体左旋走滑错移特征。(B) 邵原北活动断层 TM 影像特征。(C) 封门口断层 TM 遥感影像特征。(D) 邵原北断层左旋走滑活动的野外特征 (图 5 观测点 051)。(E) 封门口断层下盘晚第四纪冲积扇体错移的野外特征。

Fig.6 (A) Simplified map showing the left-lateral strike-slip offset of late Quaternary alluvial fans along the western segment of the southern Taihang Mountains marginal fault zone; (B) close-up view of the TM image of the Shaoyuanbei active fault; (C) close-up view of the TM image of the Fengmenkou fault; (D) field view (in Fig.5, site 051) of sinistral strike-slip movement of the Shaoyuanbei fault; (E) field view of displacement of the late Quaternary alluvial fan along the footwall of the Fengmenkou fault.

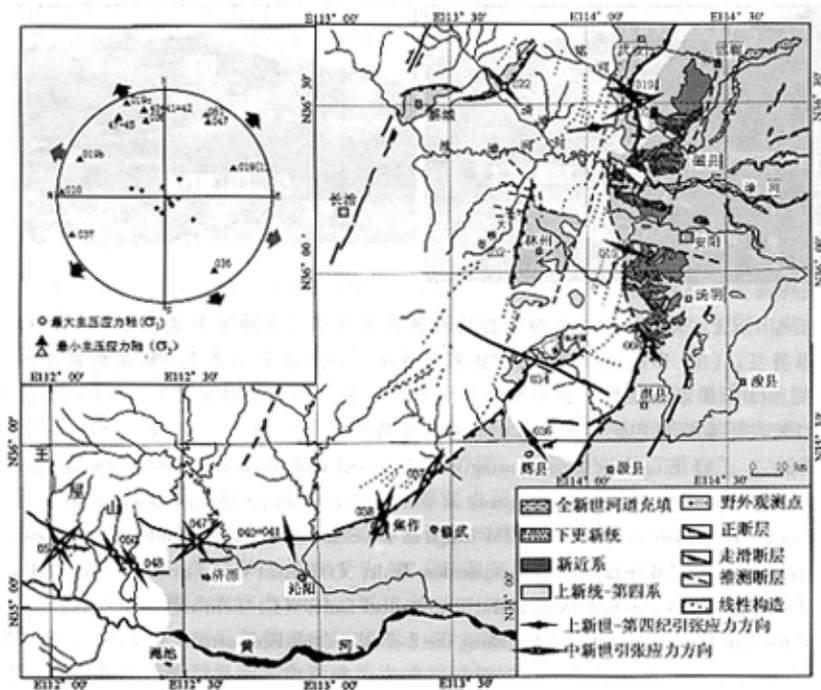
出露良好的一条 NEE-SWW 走向的正断层，主断面上擦痕构造发育，以机械摩擦形成的擦沟擦槽为特征，指示 NW-SE 向引张应力作用。

3 晚新生代构造应力场及其演化

利用野外测量的断层面上滑动矢量资料反演构造主应力方向在新构造研究中获得广泛的应用^[17-22]。从理论上，这种方法要求至少四组不同走向的断层擦痕面才能确定三个主应力轴的方向^[17,20]。如果断层擦痕数量不够，可以通过图解法大致确定引张应力轴或挤压应力轴的方位。表 3 列出了太行山隆起南段主要观测点通过滑动矢量数据求得的三个主应力轴的方向，使用的计算机程序是由法国南方大学地质系提供的。通过古应力方向计算结果结合区域地质构造事件和年代学测量结果，初步建立了本区新构造变形序列及其构造应力场的转换(图 7)。

3.1 中新世基性火山喷溢活动及其构造应力环境

中新世时期，华北断陷盆地发生区域性热沉降，中国北方地区发生大规模的玄武岩喷溢活动^[23]。中新世玄武岩主要沿郟庐断裂带和大兴安岭-太行山重力梯度带两侧分布。在淇河，玄武岩侵入到中新世鹤壁集砾岩层中。在这项研究工作中，我们获得了两个玄武岩样品的 K-Ar、全岩 Ar-Ar 同位素测年数据。K-Ar 测年结果表明玄武岩喷溢活动主要发生在 9~13Ma，即中新世晚期。而全岩 Ar-Ar 测年结果获得了两组不同年龄数据，一组为 5~7Ma，另一组为 17Ma。这些年龄数据与中国北方新近纪玄武岩的主要活动期基本一致^[23]。中新世玄武岩变形弱，断裂构造不甚发育。在淇河发育的玄武岩中，仅见到一条较大的断层，断面走向 NE，



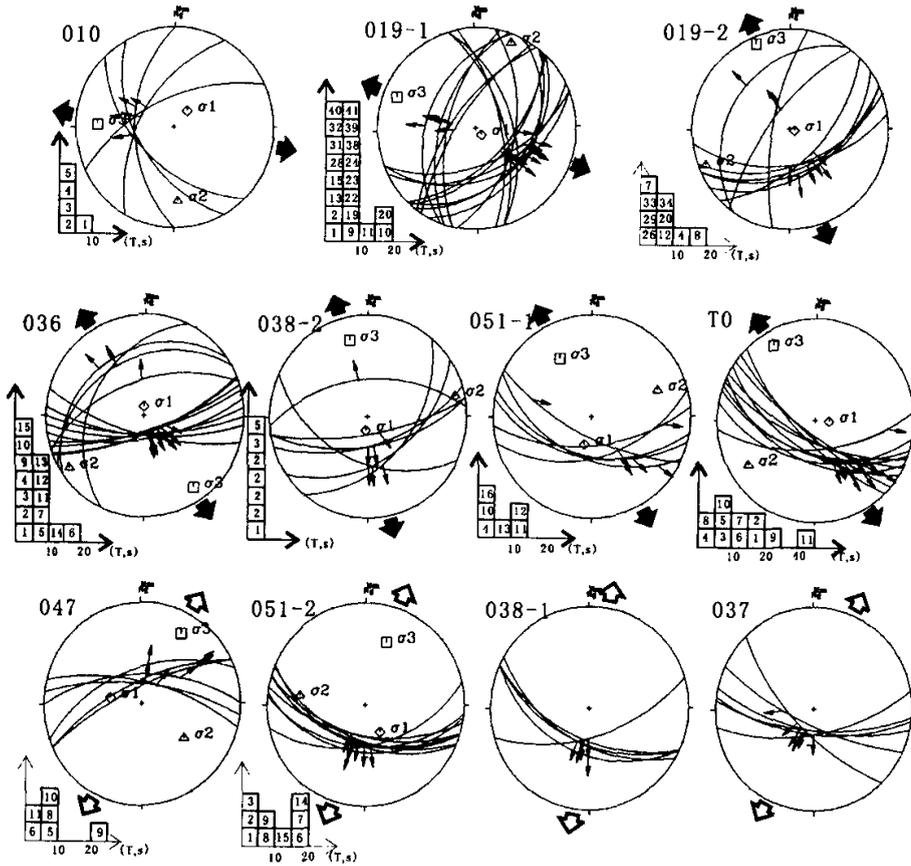


图 7 太行山南段构造应力场 (左上角为古应力轴方向在吴氏网上投影)

下面是野外观测点断层滑动矢量资料吴氏网投影 (下半球) 以及构造主应力方向计算反演结果。小箭头指示断层面上测量的擦痕运动方向, 实心箭头指示计算的引张应力轴方向; 空心箭头指示推测的引张应力轴方向。 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 代表三个主应力轴。左下角直方图给出了实测的断层滑动方向 (s) 与理论计算的剪切应力方向 (T) 之间的偏差角度。直方图框内数字对应滑动矢量资料编号。Nm、Ng 分别代表磁性北极和地理北极。T0 是观测点 047-051 活动断层滑动矢量资料的综合及其构造应力反演。

Fig.7 Neotectonic stress field in the southern part of the Taihang Mountains
(the upper left corner presents Wulff projection of paleostress axes)

Below the stereo projection (Wulff net, lower hemisphere) of the fault slip vector data and computation of tectonic stress axes. Small arrows indicate the striations measured on fault planes; heavy arrows indicate computed orientation of extension and hollow arrows deduced orientation of extension. σ_1 , σ_2 and σ_3 represent three principal stress axes. Histogram at the lower left corner gives deviation between measured (s) and predicted (T) slip vectors. Nm and Ng correspond to the magnetic north and geographic north respectively. T0 presents slip vector data measured on active faults at sites from 047 to 051 and inversion of their tectonic stresses.

在断面上见两组擦痕, 分别指示断层左旋走滑和正倾滑。沿太行山南缘断裂带, 断层滑动矢量指示 NE-SW 向引张, 这与渭河地堑盆地中新世引张应力方向是一致的^[24,25]。因此, 我们推断该区中新世玄武岩喷溢活动可能受控于区域 NE-SW 向引张应力作用。

3.2 上新世以来构造应力机制及其转换

许多事实表明, 中新世末期或上新世初期 (9~5Ma), 华北地区构造应力场发生重大转换。最显著的构造变动事件是山西地堑系的形成和发展, 断陷盆地主边界断裂受 NW-SE 向引张应力场控制。在太行山隆起南段, 小型山间断陷盆地起始于上新世 (图 1 和图 7), 盆缘断层主体受 NW-SE 向引张应力场的控制。滑动矢量叠加分析和反演结果表明, 中更新世前后, 地壳引张应力方向可能又经历过一次转换, 中更新前引张方向为 NWW-SEE 向, 引张作用控制了上新世地堑盆地的发育; 中更新以来引张方向为 NW-SE 至 NNW-SSE 向, 引张作用伴随地堑盆地的整体抬升。地震震源机制解指示, 太行山东缘现今构造应力场以 NEE-SWW 向挤压和 NNW-SSE 向引张应力占主导地位^[26]。根据控制武安—伯延盆地的紫山—鼓山西缘断裂 ESR 年代学分析, 我们推断中更新世前后应力场转换可能发生在约 0.45Ma。

太行山南缘断裂新构造活动受 NW-SE 至 NNW-SEE 引张应力场的控制, 该应力场与太行山东缘断裂构造应力场存在一定的差异。

表 3 太行山南段根据断层滑动矢量确定的晚新生代主应力方向结构参数
Table 3 Parameters of deviatoric stress tensors derived from fault slip vectors measured in the southern Taihang Mountains

测量点	擦痕数	影响地层	经度	纬度	σ_1 (倾伏向/ 倾伏角)	σ_2 (倾伏向/ 倾伏角)	σ_3 (倾伏向/ 倾伏角)	$R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$
008		中新世玄武岩	114°13.71'	35°44.76'	—	—	NW-SE	
010	5	中新世砂岩	114°08.25'	36°04.46'	40°/67°	177°/17°	272°/4°	0.42
019-2	1	寒武系灰岩	114°09.05'	36°32.22'	143°/80°	24°/5°	293°/9°	0.618
	9							
019-3	9	寒武系灰岩	114°09.05'	36°32.22'	112°/84°	248°/4°	338°/4°	0.80
019-1		寒武系灰岩	114°09.05'	36°32.22'	284°/65°	163°/14°	68°/21°	0.123
036	1	寒武系灰岩	113°48.05'	35°29.90'	358°/80°	235°/6°	145°/9°	0.733
	4							
037	6	寒武系灰岩	113°24.08'	35°23.11'	138°/79°	337°/11°	247°/4°	0.738
038-2	12	寒武系灰岩	113°13.53'	35°15.84'	188°/74°	77°/6°	346°/15°	0.72
038-1					68°/58°	312°/16°	213°/28°	0.30
047	6	寒武系灰岩	112°33.08'	35°11.88'	281°/55°	129°/32°	30°/13°	0.398
051-2	9	古近系砂岩	112°02.32'	35°11.14'	195°/59°	69°/19°	331°/23°	0.53
051-1					130°/51°	290°/37°	27°/10°	0.709
40 + 41 + 42	5	寒武系灰岩	—	—	216°/74°	78°/12°	346°/11°	0.813
47 - 51	11	主断面	—	—	95°/74°	238°/12°	330°/9°	0.412

4 晚新生代引张应力方向转变的区域动力学意义

新生代时期, 华北地区构造变形和盆地发育受到来自两个不同岩石圈动力学作用的影

响。一方面，太平洋板块向亚洲大陆之下俯冲导致亚洲大陆环太平洋弧后盆地的形成和发展，古近纪华北裂谷盆地应属于弧后盆地性质^[27-30]，另一方面，印度大陆和欧亚大陆的碰撞和持续的陆内汇聚作用^[31-33]，导致中国大陆内部复杂的新构造变形图象，表现为中国西部地区地壳挤压增厚和青藏高原的快速隆升，伴随巨型左旋走滑断裂而发生地块向东构造挤出^[32,33]。活动构造、地震地质研究和 GPS 观测结果表明，华北地区新构造变形主要受到来自西部印度大陆和欧亚大陆持续的陆内汇聚动力作用的影响^[34,35]，一个重要的问题是，这种大陆之间碰撞动力作用何时及如何影响到远离碰撞带的华北地区的。

根据新生代渭河盆地断裂变形分析结果^[24,25]，盆地在发展演化过程中经历了三期引张构造应力方向的转换，古近纪引张应力方向为 NW-SEE，中新世转变为 NE-SW 向，上新世以来为 NW-SE 向（图 8）。沿郯庐断裂带南段控制古近纪盆地发育的断层滑动历史叠加分析结果，指示了三期相同的新生代引张应力方向的转换^[36]。太行山南段控制沉积盆地的断裂变形较好地记录了新近纪以来 2 期主要引张应力场的转换历史，即中新世 NE-SW 向引张和上新世以来 NW-SE 至 NW-SEE 向引张。这些应力场资料表明，华北新生代断陷盆形成和发展受不同岩石圈动力作用的影响。具体地说，古近纪时期，裂谷盆地的形成和发展主要起源于东部太平洋板块向亚洲大陆俯冲导致的弧后扩张，这个动力学过程一直持续到中新世。中新世末期或上新世初期构造应力场发生重大转变，华北地区地壳变形主要受到来自西部印度大陆和欧亚大陆持续的陆内汇聚动力作用的影响。但是，目前对古近纪 NW-SE 向引张到中新世 NE-SW 向引张方向转换的区域动力学机制尚不清楚。

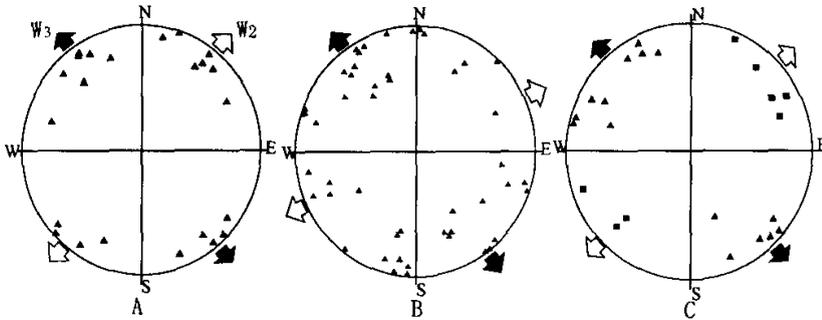


图 8 根据断层滑动矢量资料反演的引张应力轴方向吴氏网投影

A. 渭河地堑两期引张应力方向， W_2 为中新世， W_3 为上新世（根据 Bellier et al., 1988, 1991）^[24,25]；B. 大别山地区古近纪—新近纪两期引张应力方向（根据 Ratschbacher et al., 2000）^[37]；C. 郯庐断裂带南段古近纪—新近纪两期引张应力方向（根据 Zhang et al., 1999）^[36]。

Fig. 8 Wulff projection of extensional stress axes determined from fault slip vector data analysis

A: Two extensions of Miocene (W_2) to Pliocene (W_3) age in the Weihe graben (after Bellier et al., 1988, 1991) ^[24,25]; B: two extensions of Paleogene to Neogene age in the Dabie region (after Ratschbacher et al., 2000) ^[37]; C: two extensions of Paleogene to Neogene age along the southern Tan-Lu fault zone (from Zhang et al., 1999) ^[36].

青藏高原新近纪以来快速隆升如何影响华北地区新构造变形一直是大陆动力学和新构造研究的重要内容，围绕这个学术问题曾引起广泛的争论^[30-34]。争论的焦点是围绕两条主要左旋走滑断裂（即海原断裂和昆仑—秦岭断裂）的快速走滑变形及其向东的延伸和消减过

程。根据左旋扩展构造模式^[38] (图9), 鄂尔多斯地块以东的华北地区新构造变形(包括汾渭地堑系、华北盆地斜张右旋断裂系和郑庐右旋走滑断裂系等)与其南界东西走向的秦岭左旋走滑断裂系共同构成了一个弥散型的左旋扩展变形系统, 调节了华南地块相对于蒙古地块的左旋走滑运动。太行山南缘断裂带是这个左旋扩展变形系统的重要组成部分。上新世-第四纪时期, 太行山隆起南段引张应力方向的变化可能指示了东西向秦岭断裂系左旋扩展变形系统阶段性发展特征以及边界条件的调节和地块运动方式的变化。可以推断, NW-SE 引张方向可能指示华北地区块体运动以向东蠕散的方式占主导地位, 而 NNW-SSE 向引张反映了东西向主边界断裂左旋走滑活动以及伴随的地块反时针旋转运动方式的主导性。

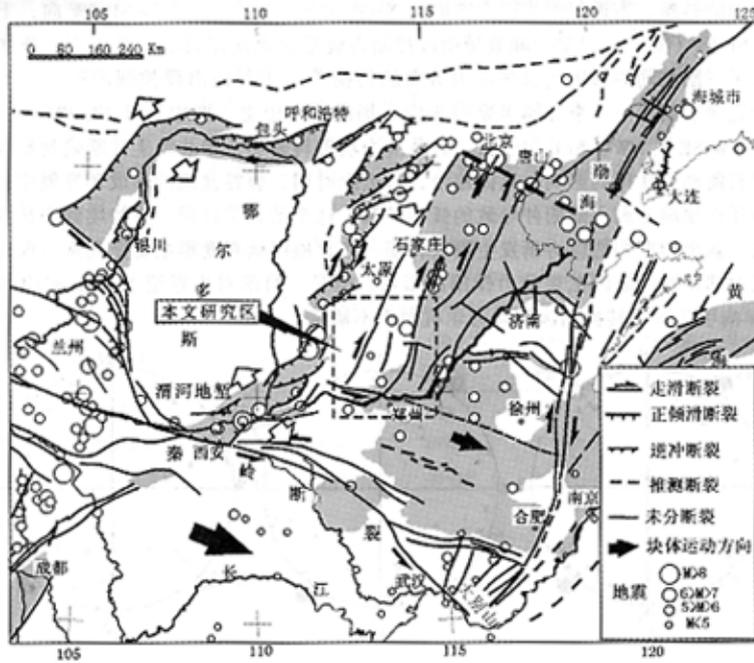


图9 华北地区活动构造与块体运动学模式

Fig.9 Active tectonics and block kinematics of North China

在太行山隆起南段地区, 理解太行山南缘断裂斜张左旋走滑与太行山东麓断裂带之间的运动学联结与耦合关系具有重要的区域动力学意义。太行山南段新生代断陷盆地和断裂构造变形特征分析表明, 太行山南缘断裂带斜张左旋走滑变形起始于上新世时期, 晚第四纪左旋走滑活动增强。根据华北盆地石油地质资料, 太行山南缘断裂带向东延伸与北华北和南华北之间重要构造边界带相联, 这条构造边界带大体沿沁阳-开封-商丘延展, 地貌上大体对应于古黄河。这个构造边界带将华北盆地一分为二。构造带以北的华北地区, 构造变形以 NNE 至 NE 向断裂的斜张右旋走滑活动为主; 以南的河淮地区, 活动构造变形以近东西走向断裂斜张左旋走滑变形为主, 与南缘秦岭断裂系属于一个变形系统。从历史地震分布特征分析, 这条近 W-E 向构造边界带不是一条强震活动带。强震活动主要集中在北华北菱形断块

区,历史上曾发生过9次 $M \geq 7$ 强震,发震构造大多与NNE至NE向右旋走滑断裂有关^[39],其次与NW-SEE向断裂活动有关。而河淮地区地震活动强度较小,震级不超过7级。华北地区南北盆地的新构造活动差异反映了在统一的向东左旋走滑扩展系统中,由于地块基底结构和岩石力学性质的差异,导致构造变形方式的不同。

致谢:野外工作得到河南省国土资源厅徐东明研究员的协助。K-Ar和Ar-Ar同位素年代测试由中国地质科学院地质研究所陈文奇研究员完成。中国地震局地质研究所邓起东研究员和中国地质科学院地质力学研究所邓乃恭研究员对本文进行了严格评审,提出了宝贵和建设性的意见,在此一并致谢。本文使用的断层擦痕反演构造应力场计算机程序由巴黎南方大学地质与地球动力学实验室提供。

参 考 文 献

- [1] 刘光勋,新构造学研究趋势的展望[J].地学前缘,1995,2(2):203~211.
- [2] 邓起东,范福田.华北断块新生代、现代地质构造特征[A].华北断块区的形成和发展[C].北京:科学出版社,1980,192~205.
- [3] 马杏垣.中国岩石圈动力学地图集[M].北京:中国地图出版社,1989.
- [4] Wang Yipeng. Basic characteristics of active tectonics in China [J]. Episodes, 1995, 18 (1&2): 73~76.
- [5] 冯希杰.中国大陆第四纪地壳运动过程[J].地质论评,1992,38(3):210~214.
- [6] 张培震.中国大陆岩石圈最新构造变动与地震灾害[J].第四纪研究,1999,5:404~411.
- [7] 陈国英,宋仲和,安昌强,等.华北地区三维地壳上地幔结构[J].地球物理学报,1991,34(2):172~181.
- [8] 杨主恩,陈国星,周伟新,赵瑞斌,郭芳.太行山东缘及临近地区的深部结构与浅部的关系探讨[A].构造地质学——岩石圈动力学研究进展[C].北京:地震出版社,1999.322~329.
- [9] 江娃利,聂宗笙.太行山山前断裂带活动特征及地震危险性讨论[J].华北地震科学,1984,3(2):21~27.
- [10] 徐杰,高战武,宋长青,孙建宝.太行山山前断裂带的构造特征[J].地震地质,2000,22(2):111~122.
- [11] 张步春,蔡文伯.华北断块区构造单元的划分及其边界问题[A].华北断块区的形成与发展[C].北京:科学出版社,1980.9~22.
- [12] 刘和甫,梁慧社,李晓清,殷进根,朱德丰,刘立群.中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制[J].地学前缘,2000,7(4):477~486.
- [13] 许桂林,朱得俞.太行山南段的活动断裂[A].中国活动断裂[C].北京:地震出版社,1982.9~66.
- [14] 江娃利,张英礼.河北磁县北西向南山村-义口活动断裂带活动特征与1830年磁县地震[J].地震地质,1996,18(4):349~357.
- [15] 江娃利,刘仲温,李威业.1830年河北磁县强震区活动构造初步研究[J].华北地震科学,1994,12(1):21~27.
- [16] 韩慕康,赵景珍.河南汤阴地堑的地震地质特征与地震危险性[J].地震地质,1980,2(4):47~58.
- [17] Carey, E. Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles [J]. Rev. Geol. Dyn. Geogr. Phys., 1979, 21: 57~66.
- [18] Mercier, J. L. Extension-compression tectonics associated with the Aegean Arc: comparison with the Andean Cordillera of South Peru-North Bolivia [J]. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 1981, 30, 337~355.
- [19] Etchecopar, A., G. Vasseur, M. Daignières. An inverse problem in microtectonics for determination of stress tensors from fault striation analysis [J]. J. Struct. Geol., 1981, 3: 51~65.
- [20] Angelier, J. Tectonic analysis of fault slip data sets [J]. J. Geophys. Res., 1984, 89, 5835~5848.
- [21] Mercier, J. L., R. Armijo, P. Tapponnier, and E. Carey Gailhardis. Change from late Tertiary compression to Quaternary extension in southern Tibet during the India-Asia collision [J]. Tectonics, 1987, 6(3): 275~304.
- [22] 谢富仁.利用断层滑动资料确定构造应力主方向的方法[A].活动断裂研究—理论与应用[C].1994,3:191~

- 200.
- [23] 刘若新, 陈文奇, 孙建中, 李大明. 中国新生代火山岩的 K-Ar 年代与构造环境 [A]. 中国新生代火山岩年代学与地球化学 [C]. 北京: 地震出版社, 1992. 1~43.
- [24] Bellier, O., J. L. Mercier, P. Vergely, C. X. Long, C. Z. Ning. Evolution sédimentaire et tectonique du graben cénozoïque de la Weihe (Province du Shaanxi, Chine du Nord) [J]. Bull. Soc. Geol. France, 1988, IV (6): 979~994.
- [25] Bellier, O., P. Vergely, J. L. Mercier, C. Z. Ning, N. G. Deng, M. C. Yi, C. X. Long. Analyse tectonique et sédimentaire dans les Monts Li Shan (Province du Shaanxi, Chine du Nord): datation des régimes tectoniques extensifs dans le graben de la Weihe [J]. Bull. Soc. Geol. France, 1991, I (162): 101~112.
- [26] 张存德, 向家翠. 华北地区的现代构造运动 [J]. 地震地质, 1990, 12 (3): 265~271.
- [27] Ma, X. Y., and D. N. Wu. Cenozoic extensional tectonics in China [J]. Tectonophysics, 1987, 133: 243~255.
- [28] Tian, Z. Y., P. Han, K. D. Xu. The Mesozoic-Cenozoic east China rift system [J]. Tectonophysics, 1992, 208: 341~363.
- [29] Hilde, T. W. C., S. Uyeda, and L. Kroenke. Evolution of the western Pacific and its margin [J]. Tectonophysics, 1997, 38: 145~165.
- [30] Uyeda, S., and H. Kanamori. Back-arc opening and the mode of subduction [J]. J. of Geophys. Res., 1979, 84: 1049~1061.
- [31] Molnar, P. and P. Tapponnier. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision [J]. Sciences, 1975, 189: 419~426.
- [32] Tapponnier, P., G. Peltzer, A. Y. Le Dain, R. Armijo, P. Cobbold. Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiment with plastine [J]. Geology, 1982, 10: 611~616.
- [33] Tapponnier, P., G. Peltzer, R. Armijo. On the mechanics of the collision between Indian and Asia [A]. in: Collision Tectonics, edited by Ramsay [C]. J. G., M. P. Coward and A. Ries, Spec. Pub. Geol. Soc. London, 1986. 115~157.
- [34] 任金卫, W. E. Holt, 申屠炳明. 中亚及东南亚变形运动学及动力学问题 [A]. 活动断裂研究—理论与实践 [C]. 7, 1999, 109~146.
- [35] Holt, W. E., Li M., A. J. Haines. Earthquake strain rates and instantaneous relative motions within central and eastern Asia [J]. J. Geophys. Int., 1995, 122: 569~593.
- [36] Zhang Yueqian, Pierre Vergely, Jacques-Louis Mercier, Wang Yongmin, Zhang Yong, Huang Dezhi. Kinematic history and changes in tectonic stress regime during the cenozoic along the Qinling and southern Tanlu fault zones [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73, 3, 264~274.
- [37] Ratschbacher L., Hacker B. R., Webb L. E., Mewilliams M., Ireland T., Dong S., Calvert A., Chateigner, D., Wenk, H. R. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. J. Geophys. Res., 2000, 105, B6, 13303~13338.
- [38] Zhang Y, P. Vergely, J. L. Mercier. Pliocene-Quaternary faulting pattern and left-slip propagation tectonics in north China [J]. Episodes, 1999, 22 (2): 84~88.
- [39] Chen W. P., and J. Nabelek. Seismological strike-slip faulting and the development of north China basin [J]. Tectonics, 1988, 7: 975~989.

NEOTECTONICS IN THE SOUTHERN PART OF THE TAIHANG UPLIFT, NORTH CHINA

ZHANG Yue-qiao, YANG Nong, MA Yin-sheng

(*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract: Based on TM remote-sensing image interpretation and field observation of slip vectors of faults, coupled with the thermal isotope and radioactive isotope chronological studies of younger geologic bodies, this paper mainly describes the morpho-structural features in the southern segment of the Taihang uplift, defines the phases of neotectonic deformation and determines the neotectonic stress field and its transition history. Studies indicate that in the Neogene the southern segment of the Taihang Mountains experienced two major phases of extension. In the mid-late Miocene the area was subjected to nearly NE-SW extension, concomitantly with extensional eruption of basic volcanic rocks in North China. The extension was concentrated in fault zones on the eastern and southern margins of the area. During the Pliocene to early Pleistocene strong NW-SE crustal extension resulted in disintegration of the planation geomorphology and formation of a graben basin in the area. Since the mid-late Pleistocene the southern Taihang Mountain marginal fault zone has become a main boundary zone of neotectonic deformation. Analyses of fault plane slip vectors and displacement features of younger piedmont alluvial fans and small gullies along the fault suggest that the fault zone is an oblique-extensional, sinistral strike-slip boundary fault zone, with the extension oriented in a NW-SE to NNW-SSE direction. In the tectonic context, the NE-SW extension in eastern China in the Miocene is related to the dynamic process of back-arc spreading resulting from westward subduction of the Pacific plate to the east, while the neotectonic deformation since the Pliocene is related to the rapid uplift of the Qinghai-Tibet Plateau and eastward tectonic extrusion due to the late-stage India-Eurasia collision.

Key words: Taihang uplift; neotectonics; stress field; North China