

西秦岭临潭-岷县-宕昌断裂带新生代 运动学历史及动力学分析

郭进京¹, 王凯旋¹, 韩文峰¹, 梁收运²

(1. 天津城建大学地质与测绘学院, 天津 300384; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 临潭-岷县-宕昌断裂带是青藏高原东北缘西秦岭腹地具有构造边界性质的区域断裂带之一, 它由多条近于平行的逆冲-走滑断层组成。通过对其主要断层之一的小寨-蒲麻断层(F3)典型断层带内断层岩类型和分带特征、构造要素的几何学-运动学特征及构造截切关系等观测分析, 表明其主要为新生代形成的一条脆性断层, 至少经历了3期具有不同几何学-运动学特征的构造活动历史。第一期表现为向北北东陡倾(倾角为 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$)的自北向南高角度逆冲作用; 第二期表现为向北北东中等倾斜(倾角为 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$)的自北向南逆冲作用; 而第三期则表现为向南西陡倾(倾角为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$)的左旋走滑作用。根据断层卷入的最新地层时代、三期变形构造要素产状及截切关系和青藏高原东北缘新生代以来区域断裂活动、沉积盆地演化和地壳隆升过程分析, 认为第一期挤压逆冲作用起始于始新世中期(45~50 Ma左右)持续到渐新世初期; 第二期挤压逆冲作用发生在中新世末或上新世初, 持续到早第四纪; 而第三期左旋走滑作用只是晚第四纪以来的构造作用。临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-蒲麻断层的三期构造活动可能记录了印度板块与欧亚板块碰撞汇聚过程不同阶段在西秦岭的构造动力学响应。第一期挤压逆冲作用可能与印度-欧亚汇聚碰撞高峰期(55~45 Ma)地壳的挤压缩短作用的远程效应有关; 而第二期的逆冲作用与青藏高原地壳增厚和高原隆升向东北缘的扩展作用相联系; 第三期左旋走滑作用则是晚第四纪以来的构造活动, 明显滞后于5 Ma青藏高原腹地的东西伸展和挤出走滑作用, 这有可能暗示着青藏高原东北缘断裂构造活动及地壳隆升过程与青藏高原腹地并不同步。这为新生代以来印度板块-欧亚板块碰撞作用是逐渐向北扩展生长过程提供了构造地质学约束。

关键词: 西秦岭; 临潭-岷县-宕昌断层系; 小寨-蒲麻断层; 运动学历史; 动力学过程

中图分类号: P511

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2018)03-0080-13

Cenozoic Kinematic History of the Lintan-Minxian-Tanchang Fault in Western Qinling and Its Dynamic Process

GUO Jinjing¹, WANG Kaixuan¹, HAN Wenfeng¹, LIANG Shouyun²

(1. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;

2. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Lintan-Minxian-Tanchang Fault (abbreviation as LMTF) is one of main boundary

收稿日期: 2018-02-25; 修回日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金专项基金项目“西秦岭北缘断裂带新生代构造变形几何学-运动学分析及构造变形演化(41772215)”和“西秦岭北缘断裂带内漳县含盐盆地沉积特征与断裂活动过程研究(41340002)”资助

作者简介: 郭进京(1962-), 河南新安人, 博士, 教授, 主要从事构造地质学、沉积盆地研究工作。E-mail: tjgj@126.com

faults in the hinterland of Western Qinling, which is located at the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau. It consists of several nearly parallel thrusting-strike slipping faults. Taking the typical section of Pu - Ma fault (F3) of the LMTF as the studying object, the detailed investigation has been carried out for the types and zoning of fault rocks, geometry-kinematics characteristics of various structural elements. The results indicated that F3 fault is mainly a typical shallow level brittle fault, which experienced at least three phase deformation with different geometric-kinematic characteristics since the Cenozoic era. The first phase deformation is characterized by high angle thrusting from north to south, with NNE steep dipping (dip angle around $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$); the second by medium angle thrusting from north to south, with NNE medium dipping (dip angle around $30^{\circ} \sim 50^{\circ}$); and the third by sinistral strike-slipping, with NW trending and SW dipping (dip angle around $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$). Based upon comprehensive analysis for the involved strata ages, structural cutting relationship in the fault zone, the regional fault activities, sedimentary basin evolution and crustal uplifting in northeast margin of Qinghai-Tibet plateau since Cenozoic era, it is suggested that the first period high angle thrusting was occurred at beginning of middle Eocene (40~50 Ma), which maybe continued to beginning of Oligocene; the second period medium angle thrusting was occurred at end of Miocene or beginning of Pliocene, which maybe continued to early Quaternary; and the third period sinistral strike-slipping was just the tectonic event occurred since late Quaternary. Three period fault activities of F3 fault in LMTF mentioned above maybe documented the remote tectonic responses of the West Qinling to the three different evolution stages during the collisional converge between India and Eurasian plates. First period high angle thrusting could be related to the compression shortening during India-Eurasia peak collision (55~45 Ma); the second period medium angle thrusting was stood for the out-spreading of crustal thickening and uplifting of Qinghai-Tibet plateau; the third period sinistral strike-slipping was obviously lagged to E - W extension and NW trending strike-slipping, which may indicate the unsynchronized uplifting and strike-slipping in the northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau and the hinterland of Qinghai-Tibet plateau. These results may reflect that the present entire Tibetan plateau has been forming by the gradual propagation to the northeast.

Keywords: Western Qinling; Lintan-Minxian-Tanchang fault Series; Xiaozhai-Puma fault; kinematics history; dynamic processes

西秦岭造山带是青藏高原东北缘重要的构造单元之一,其南以勉略缝合带,北以西秦岭北缘构造带(商丹缝合带之西延)为构造边界,在经历了中一晚三叠世(印支期)主碰撞造山后,进入了陆内地质演化阶段(张国伟等,2001;冯益民等,2003)。新生代以来印度与欧亚板块持续而强烈的碰撞汇聚,使其成为青藏高原构造系统的组成部分(李吉均等,1996;刘少峰等,2007;王成善等,2009;肖序常等,2010;TAPPONIER et al., 2001; YIN et al., 2000)。但包括西秦岭在内的现今青藏高原东北缘新生代沉积盆地演化、区域断层变形历史、构造地貌

过程、岩浆活动、深部构造等,特别是断裂带运动学方式演变,到揭示了西秦岭何时、以何种方式卷入青藏高原构造系统、经历了什么样的地质过程一直是争论的科学问题(李吉均等,1996;张岳桥等,2005;王志才等,2006;张培震等,2007;GUO et al., 2002; FANG et al., 2003, 2005; HORTON et al., 2004; LEASE et al., 2011, 2012; DUPONT - NIVET et al., 2008; CLARK et al., 2010; HOUGH et al., 2011; WANG X X et al., 2011, 2012; WANG Z C et al., 2012; WANG W T et al., 2012)。现今西秦岭构造格架是以北西或北西西向区域性大型逆冲

断裂带为构造边界,自北而南依次推覆叠置的4个带状分布的高角度逆冲推覆体组成,边界断裂自北而南依次为西秦岭北缘断裂带、宕昌-岷县-临潭断裂带、光盖山-迭山断裂带(迭山-舟曲断裂)、迭部-白龙江断裂带和东昆仑南缘-玛曲-文县-康县断裂带(张国伟等,2001,2004)。其中西秦岭北缘断裂带和宕昌-岷县-临潭断裂带是2条重要地震断层,沿这2个断裂带,历史上曾发生了多次强烈地震(袁道阳等,1999,2004;郑文俊等,2007,2013;邵延秀等,2011)。尽管前人对宕昌-岷县-临潭断裂的构造特征做了不少研究,但多限于第四纪以来变形和地震活动特征及地貌特征(袁道阳等,2004;郑文俊等,2013),但该断裂带的组成、结构和变形历史以及不同构造阶段断层活动的几何学-运动学特征尚缺乏系统研究。众所周知,大陆地壳中区域性断裂带作为大陆构造变形的敏感带,每一次构造变动都会在其中留下构造变形几何学和运动学、物质迁移(沉积)、物质结构转换(构造岩)等地质记录,蕴藏着丰富的大陆变形历史和过程的信息。因此,对西秦岭内部的宕昌-岷县-临潭断裂带组成、结构和变形运动学演化研究,对于揭示西秦岭中—新生代以来陆内构造过程和动力学特征具有重要的科学意义。

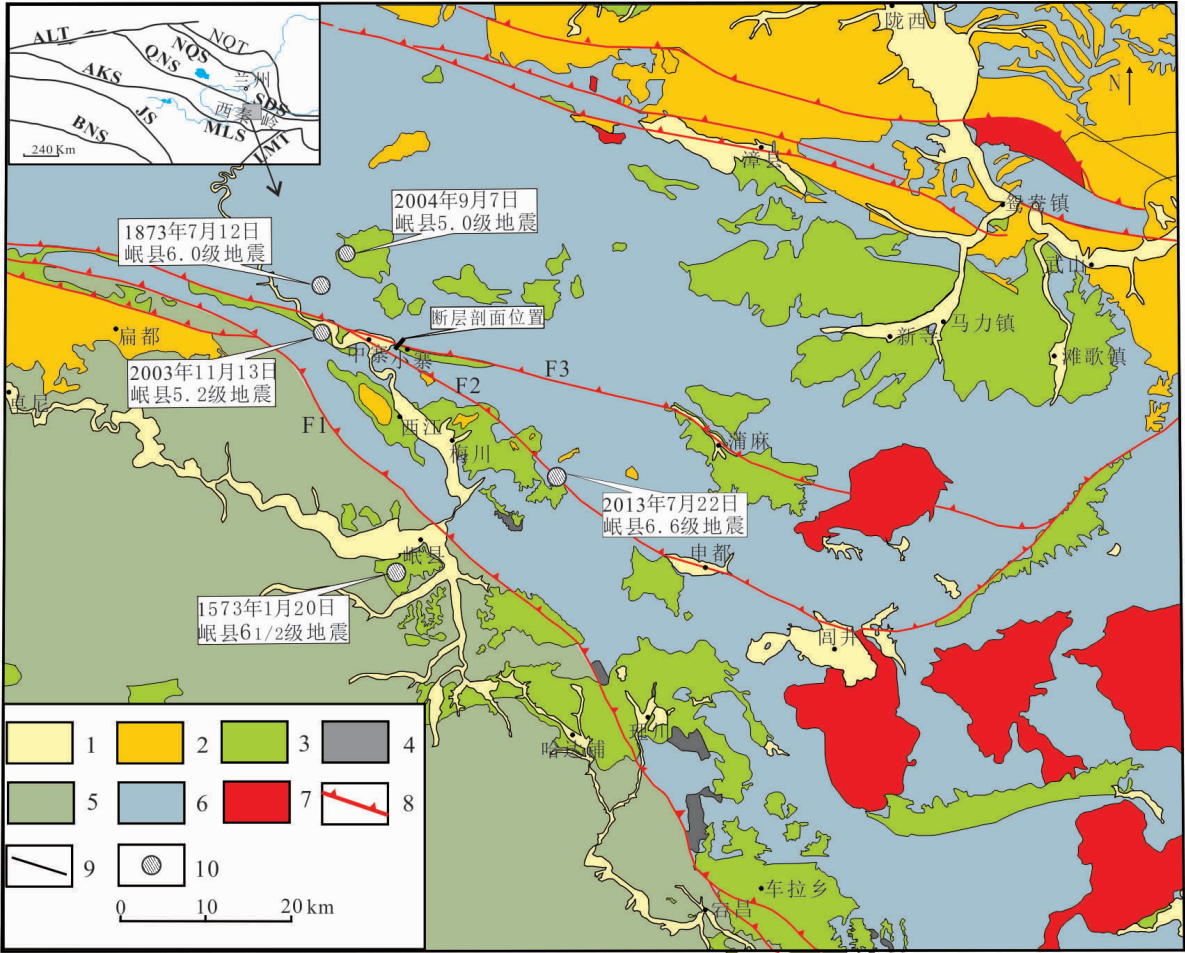
1 宕昌-岷县-临潭断裂带的基本特征

临潭-岷县-宕昌断裂带是由一系列走向北西—北西西,向北东—北北东陡倾(倾角多在 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$)的逆冲断层组成(图1),也被称之为临潭-岷县-宕昌断层系(郭进京等,2009)。该断裂带西起合作,向东经临潭、岷县延伸至宕昌以南,长约250km,东与北东向徽成县盆地西边界断层相连接,平面上呈现出以西和县南为弧顶的向南突出的宽缓弧形构造。该断裂带曾被认为是南部三叠系复理石沉积和北部泥盆系—二叠系之间构造地层分区边界断层(甘肃省地质矿产局,1989)。断裂带内大量不对称褶皱及拉伸线理等运动学标志一致指示自北向南的逆冲叠置,使北侧上古生界泥盆系—二叠系向南逆掩在三叠系之上,记录了印支主造山期地壳挤压缩短背景下的逆冲推覆构造过程(张国伟等,2001)。沿断裂带分布的上白垩统和新近系等中—新生代地层并未显示出受该断裂带控制的特征,并且临潭-岷县-宕昌断裂带主断层(F1)多不截切错断上白垩统(哈达

铺盆地等),说明其晚白垩世时期活动微弱或不活动。但主断层(F1)北面的2条断层(F2,F3)明显截切了上白垩统,特别是沿F3断层北部二叠系向南高角度逆冲在上白垩统之上。虽然地学界普遍而笼统地认为临潭-岷县-宕昌断裂带也是西秦岭主要地震断层,沿该断裂带地震活动频繁,如1573年中寨6.5级地震、1873年岷县北6.0级地震、2003年岷县5.2级地震、2004年岷县5.0级地震、2013年岷县6.6级地震等都与临潭-岷县-宕昌断裂带活动有关(郑文俊等,2007;2013;张元生等,2013),但这些地震活动并未沿临潭-岷县-宕昌断裂带的主断层(F1)发生,相反多沿其北侧的2条断层(F2,F3)发生,特别是F3断层发育的150m宽的由断层角砾岩、断层磨砾岩、碎粉岩、杂色断层泥、石墨化断层泥等碎裂岩组成,并且发育多期断层带、摩擦镜面、运动学标志等。F3断层中丰富的断层岩和构造要素等更能反映西秦岭新生代以来的构造活动历史记录。因此,笔者主要通过对F3断层的构造剖面详细观测研究,以企揭示该断层多期、不同性质的变形历史。

2 小寨-浦麻断层变形期次和几何学-运动学分析

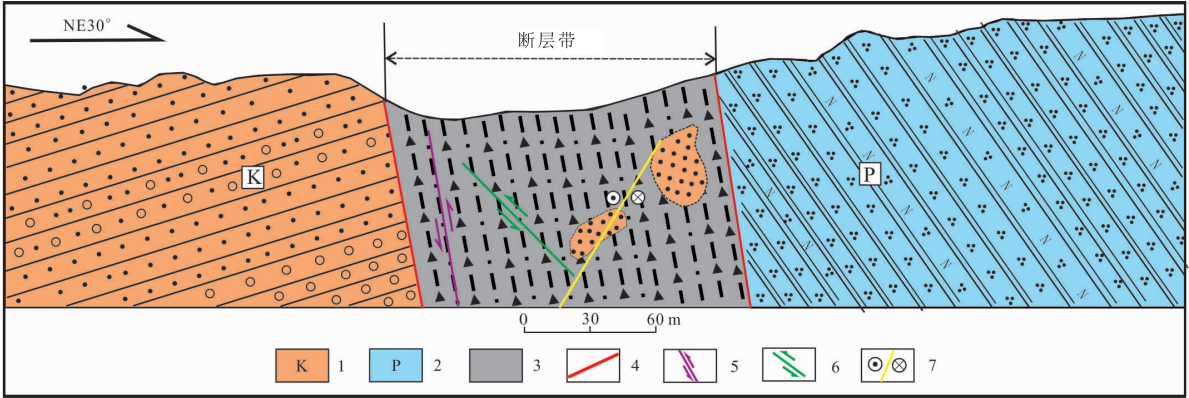
小寨-浦麻断层(F3)西交汇于中寨-申都-间井断层(F2)。断层总体呈北西—南东走向,向北陡倾。在小寨—中寨以西,北盘造山带地层清晰显示出沿该断层逆冲推覆在白垩系红层之上,构成了红层地层的北边界(图1)。在小寨西的大哈山南坡该断层的断层带出露良好,断层带宽度约150m,北盘为二叠系灰色—青灰色石英砂岩、长石石英砂岩、岩屑石英砂岩与粉砂岩、粉砂质板岩互层,地层向北北东陡倾,倾角在 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$;断层南盘为白垩系砖红色砾岩、砂岩,产状平缓,向南东东倾,倾角在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ (图2)。断层带由各种断层角砾岩、碎裂岩和超碎裂岩以及各种颜色断层泥等组成,并且夹裹有白垩系碎裂砂岩和石炭系碎裂石英岩,断层带内不同类型的断层岩、多期不同特征的断层破裂面、摩擦镜面、擦痕线理和构造透镜体斜列或不对称构造运动学标志以及相互截切关系等指示了其至少经历了3期具有不同几何学-运动学特征构造活动(图2、图3)。



1. 第四系;2. 新近系;3. 白垩系;4. 侏罗系;5. 三叠系;6. 前三叠地层;7. 花岗岩;8. 主要断层;9. 一般断层;10. 地震震中;左上角图:NQT. 北祁连前缘逆冲断层带;NQS. 北祁连缝合带;QNS. 柴北缘缝合带;SDS. 商丹缝合带;AKS. 阿尼玛卿缝合带;MLS. 勉略缝合带;JS. 金沙江缝合带;BNS. 班公湖-怒江缝合带;ALT. 阿尔金左旋走滑断裂带;LMT. 龙门山逆冲断裂带

图1 西秦岭区域地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Western Qinling Region



1. 上白垩统砾岩、砂岩;2. 二叠系石英岩、长石石英岩;3. 断层碎裂带、断层泥带;4. 断层带边界;5. 第一期高角度逆冲;6. 第二期中角度逆冲;7. 第3期左旋走滑

图2 临潭-岷县-宕昌断裂带小寨-蒲麻断层(F3)构造剖面图(西秦岭岷县小寨乡)

Fig. 2 Tectonic section of F3 fault of LMTL in Xiaozhai, Minxian County

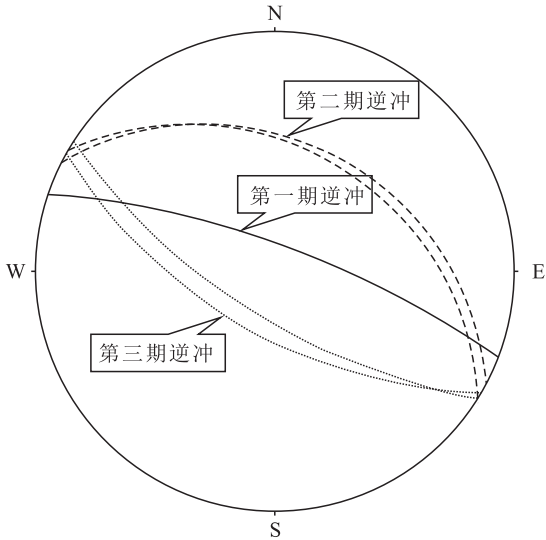


图3 临潭-岷县-宕昌断裂带小寨-浦麻断层(F3)三期变形断层面极射赤平投影图

Fig. 3 Stereonet projection diagram of three phase fault planes within F3 fault of LMTL

2.1 小寨-浦麻断层(F3)北带构造特征

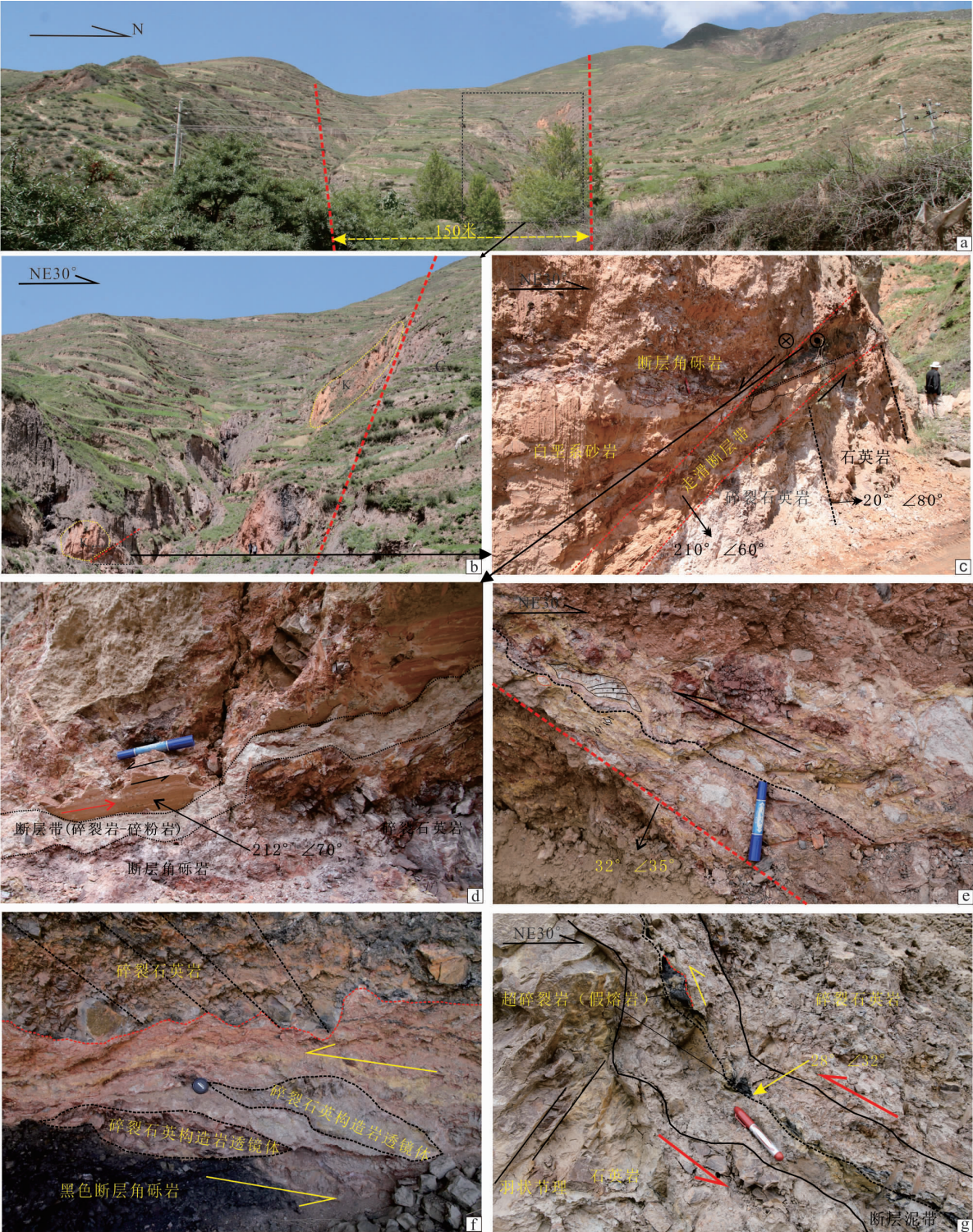
在小寨-浦麻断层北边界之南断层带内,由于断层多期活动中形成了多种断层岩类型。例如,碎裂岩化石英岩、断层角砾岩、碎裂岩、碎斑岩、碎粉岩、红色或灰色或土黄色断层泥等,这些断层岩中蕴含了丰富的有关小寨-浦麻断层构造变形机制、变形历史及几何学-运动学信息(何永年等,1988;孙岩等,1985;SIBSON,1977)。其中还夹裹有被断层肢解破碎的上白垩统砖红色砂岩块体和碎裂的二叠系石英岩块(图4a、图4b)。断层多期活动形成了不同的几何学-运动学特征构造要素。最新一期断层活动形成的向南东中等-陡倾的30 cm宽的上下边界清晰的、主要由碎裂岩-碎粉岩组成小型断层带,它截切了下盘向北东陡倾的早期碎裂石英岩-碎裂带,而且断层带内红色砂岩透镜体斜列所指示的断层运动方向和上盘对应的红色砂岩的错动方向指示其具有一定正断分量(图4c);这期断层活动形成的灰白色断层岩带指示了强烈挤压剪切的特征,但其上边界的摩擦镜面和近水平的擦痕线理却指示了其总体为近水平的左旋走滑运动学特征(图4d),这可能指示沿这条新生的小型断层带经历了向北挤压逆冲作用,晚期叠加左旋走滑作用。该小型断层之南断层带中发育的8~10 cm的特殊的黄色或红色断层岩和黑色超碎裂岩,其中黄色断层岩中透镜状角砾平

行面理的定向排列,不对称性指示了逆冲断层的性质,而其下的黑色超碎裂岩中碎斑却不定向,呈随机排列(图4e、图4f)。如果说碎斑不定向的黑色超碎裂岩是与强烈地震爆裂作用有关,反映了一种快速变形的特征,那么具有面理构造的断层岩则指示断层韧性的缓慢变形过程,形成了类似于糜棱岩中面理和不对称指向构造(GOODWIN,2002;LIN,2001)。虽然小寨-浦麻断层北部断层带主要由各种快速变形的碎裂岩岩系组成,指示了其脆性变形特征,但其中出现的与糜棱岩类似的面理构造和不对称构造的断层岩则说明该断层不仅存在快速的脆性变形,而且也存在缓慢剪切流变变形。

断层带中部碎裂的石英岩-长石石英岩块体中发育一条向北中等倾斜的破裂带,宽度约15 cm左右,下盘为较完整的石英岩-长石石英岩,而上盘则为碎裂岩化的石英岩-长石石英岩,指示了断层的上盘效应;两者之间的破裂带由碎裂岩-碎粉岩和断层泥组成,特别是其中出现了串珠状黑色超碎裂岩(假熔岩)透镜体和石墨化(图4g)。这种超碎裂岩(假熔岩)和石墨化反映了强烈地震过程中沿滑动面的快速剪切和摩擦升温(林爱明,2008;付碧宏等,2008;韩亮等,2010;李海兵等,2013;袁仁茂等,2014)。这期向北东中等倾斜、具有逆冲性质的断层破裂面与前述的向南倾、具有左旋走滑性质断层破裂面产状相反,指示了它们是2期不同构造动力学作用下的构造记录。

2.2 小寨-浦麻断层(南带)构造岩特征

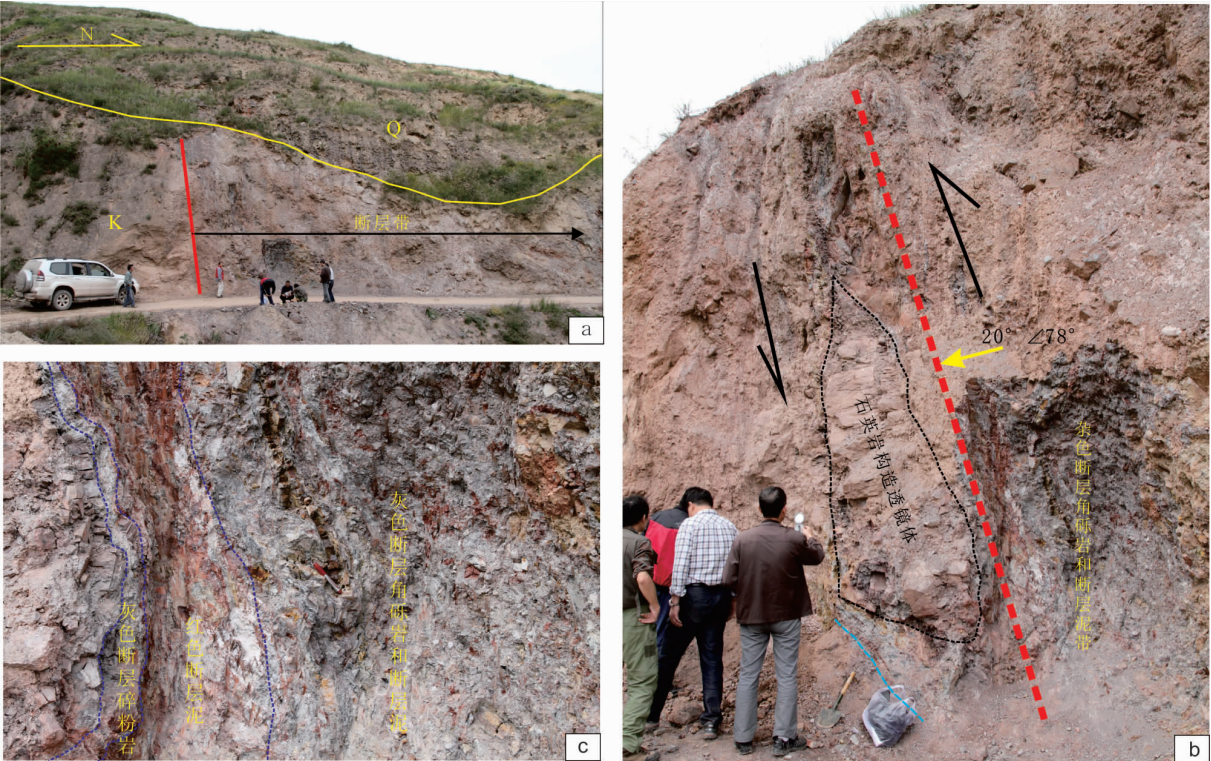
小寨-浦麻断层南边界之南(下盘)为白垩系红色砾岩、砂岩,产状向南东缓倾,其北(上盘)为向北陡倾的碎裂岩、碎粉岩和断层泥以及大小、形态各异的构造透镜体等,其原岩为二叠系薄层状-条带状石英岩、粉砂质板岩等(图2、图5a)。沿石英岩构造透镜体边缘强烈挤压剪切形成了黄色-灰白色断层泥和碎粉岩,脆性的石英岩构造透镜体内部与断层面近直交的构造节理发育,指示了区域构造挤压和断层逆冲剪切的特征(图5b、图5c)。这与小寨-浦麻断层北带中向南东陡倾的左旋走滑破裂带面下盘向北陡倾的碎裂岩的构造性质和产状相同。断层带南带岩性多样、结构复杂,构造透镜体、碎裂岩、红色-灰色-土黄色断层泥和碎粉岩交织在一起,缺乏平直的断层面,厘米级断层泥层和断层角砾岩,并且宽度大,说明这期变形过程持续时间长,规模大,结合北带这期活动的构造岩特征分析,毫无疑问,它是F3断层的基本定型期变形。



a. 小寨-浦麻断层带宽度和地貌特征,北盘为二叠系石英岩,南盘为上白垩统红色砾岩、砂岩;b. 断层带北边界和北部特征;c. 第三期左旋走滑断层带截切了第一期向北陡倾的碎裂岩带;d. 第三期左旋走滑形成的摩擦镜面、擦痕线理及断层带;e. 第二期逆冲断层作用形成的具有韧性变形的黄色断层泥带;f. 第二期逆冲断层作用形成的杂色断层泥和磨砾岩带,其中磨砾斜列指示了逆冲的运动学特征,截切了早期的碎裂岩和黑色断层角砾岩;g. 第二期断层逆冲作用形成的断层带和透镜状石墨化超碎裂

图4 临潭-岷县-宕昌断裂带小寨-浦麻断层(F3)北带构造特征图

Fig. 4 Structural features of northern part of F3 fault of LMTL in West Qinling



a. F3 断层南边界和断层带特征;K: 上白垩统砾岩;Q: 第四系洪积砾岩;b. 第一期逆冲作用形成的杂色碎裂岩、断层泥和碎裂石英岩构造透镜体;c. 第一期逆冲断层带内的形成断层岩分带,自左到右依次为碎裂石英岩、灰色断层碎粉岩、杂色断层泥和角砾岩、灰色断层泥和断层角砾岩

图 5 临潭-岷县-宕昌断裂带小寨-浦麻断层(F3)南带构造特征图

Fig. 5 Structural features of southern part of F3 fault of LMTL in West Qinling

2.3 小寨-浦麻断层(F3)变形期次和几何学-运动学

通过对临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-浦麻断层的断层岩类型、断层面产状、运动学标志和构造截切关系以及卷入的地层时代分析,虽然该断层带总体特征指示了其主要为向北陡倾的高角度逆冲断层,但断层带内丰富的断层岩类型、复杂的结构分带和多期构造要素的几何学-运动学特征等,则揭示了其至少曾经历了 3 期几何学、运动学特征各异的构造变形历史。3 期构造变形的特征如下。

第一期构造变形,是小寨-浦麻断层主变形期,形成了近 150 m 的断层带。断层带主要由各种碎裂岩化石英岩、碎裂岩、粉碎岩和断层泥等组成,并且断层带夹裹有上白垩统的砖红色砂岩透镜体和二叠系石英岩、长石石英岩、板岩等破碎的岩块或透镜体。该期变形的几何学-运动学特征在断层北带清晰显示出向北陡倾或近直立的由北向南高角度逆冲

特征。断层南带之南上白垩统砾岩和砂岩并未显示强烈的碎裂岩化,而是以共轭构造节理和直立的构造劈理形式记录了断层由北东向南西挤压逆冲的构造应力作用,同时也说明断层的北东盘(上盘)是主动盘。

第二期构造变形表现为断层面面向北东倾的由北向南逆冲作用为特征,但逆冲断层面较第一期构造变形形成的逆冲断层面缓。变形记录以小寨-浦麻断层带中心部位的向北中等倾斜的波状起伏的小型断层带为代表。断层带主要有碎粉岩和灰色断层泥组成,断层带中部的串珠状黑色断层泥、超碎裂岩和摩擦镜面上石墨化现象指示了其可能为一次强烈地震快速剪切滑动。同时,还出现同样产状的具有流变特征的断层带,断层带内发育面理和透镜体斜列指示了其缓慢变形的非地震构造作用。小寨-浦麻断层的该期变形既有快速剪切滑动,又有缓慢剪切滑动,前者指示该期强烈地震的粘滑作用,后者则指示该期漫长蠕滑作用。

第三期变形,小寨-浦麻断层第三期变形形成的断层面与第一、二期变形的断层面产状倾向相反,它截切了第一期和第二期变形的构造岩和构造面,以向南倾的左旋走滑并伴有少量正断分量为特征。显然,该期变形应该是与第一、二期变形完全不同的构造动力学体制下断层活动。

2.4 小寨-浦麻断层三期构造活动时代的地质约束

如前所述,临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-浦麻断层主要是一条地壳浅层次的脆性断层,构造分析揭示了其至少经历了3期不同运动学-几何学特征的变形历史。这3期变形发生的时代、变形产生的动力学背景以及它所揭示了西秦岭什么样的新生代以来构造变形过程等问题值得进一步研究探讨。尽管尚没有断层岩直接测年数据约束其变形时代,但从断层卷入的地层时代、构造截切关系以及西秦岭中一新代盆山格局构造转换和青藏高原东北缘主要断裂的活动历史(郭进京等,2009,2013,2014;袁道阳等,1999,2004;张培震等,2007;WANG et al., 2012; DUVALL et al., 2011; TAPPONNIER et al., 2001; YIN et al., 2000; ZHENG et al., 2003, 2007; ZHOU et al., 2007)分析,可以为小寨-浦麻断层三期变形的时代给予一定的地质约束。

第一期变形的时代:可以从小寨-浦麻断层近150 m的断层带中卷入的最新地层上白垩统红色砂岩透镜体和主要为地壳浅层次脆性变形特征看,该断层形成应该是晚白垩世以后的构造事件。尽管断层下盘(南盘)的上白垩统似乎受断层控制,但主要表现为断层带本身逆冲推覆到红色砾岩、砂岩之上,断层逆冲的构造作用主要表现为对上白垩统的产状的掀斜和紧邻断层的脆性构造节理形成。临潭-岷县-宕昌断裂带两侧都有上白垩统的分布,指示了其不可能是上白垩统红层盆地沉积的控制性断层。也就是说该断层应该是上白垩统形成之后形成的新生代断层。结合西秦岭区域普遍缺乏古近系沉积(甘肃省地质矿产局,1989)和西秦岭北缘断裂带逆冲作用起始于50 Ma (DUVALL et al., 2011)和西秦岭地壳45~50 Ma快速隆升事件(CLART et al., 2010)分析,认为小寨-浦麻断层出现和定型应该与这次逆冲构造事件和快速隆升事件相匹配,即第一期活动起始于45~50 Ma和大规模地壳挤压逆冲。另外,渐新世(29 Ma)以来,以西秦岭北缘断裂为南

边界的大型陇中盆地出现(李吉均等,1996;刘少峰等,2007;方小敏等,2007;FANG et al., 2003, 2005)指示的伸展拉张构造环境(郭进京等,2017;WANG W T et al., 2012),标志小寨-浦麻断层主要逆冲作用的停歇。

第二期变形的时代:虽然小寨-浦麻断层的第二期变形同样表现为由北向南逆冲的运动学特征,但这期变形主要是沿第一期变形形成的宽阔断层带的内部产生的向北倾的新断层面的逆冲推覆,且断层面产状相对较缓,截切了第一期变形陡倾或近直立的断层面,形成的断层岩既有地震快速变形形成超碎裂岩或假熔岩,又有缓慢变形形成的类似糜棱岩面理和不对称构造的断层岩,反映这期变形具有粘滑和蠕滑的双重特征。显然,这期变形发生的时代应该是在小寨-浦麻断层第一期变形之后。如果考虑到青藏高原东北缘以陇中盆地为代表的渐新世—上新世红层沉积指示的伸展构造环境(郭进京等,2017;WANG et al., 2012)和之后西秦岭北缘出现的具有磨拉石性质的3.6 Ma的上新世石山砾岩(李吉均等,1996)、甘家砾岩(方小敏等,2007)和韩家沟砾岩(郭进京等,2017)以及天水盆地、临夏盆地、循化-贵德盆地以及西秦岭礼县盆地结束沉积时代在7~8 Ma或4~6 Ma(袁道阳等,2007;张培震等,2007;王志才等,2006;TAPPONNIE et al., 2001;ZHENG et al., 2003, 2007;GE et al., 2010;WANG XX et al., 2011,2012;WANG Z C et al., 2012),认为小寨-浦麻断层第二期逆冲作用很可能与青藏高原东北缘与盆地结束沉积和不整合其上粗砾岩出现相对应,也就是这期逆冲作用起始于5~6 Ma,但持续到砾岩沉积结束,也就是第四纪初。

第三期变形的时代:小寨-浦麻断层的第三期变形与第一、二期变形相比较,不仅几何学特征不同,而且运动学特征也完全不同,前者主要表现为以向南倾的左旋走滑作用为主,间有少量的正断分量,而后者则以由南向北的逆冲作用为主,并且第三期变形截切了第二、三期变形的断层构造要素。这次左旋走滑作用在西秦岭北缘断裂带表现明显,其时代为晚第四纪(袁道阳等,1999,2004;李传友等,2007;郭进京等,2013)。小寨-浦麻断层的这期左旋走滑作用应该与北缘断裂的左旋走滑相对应,其时代也应晚第四纪以来的构造活动。

3 小寨-浦麻断层 3 期构造变形的动力学及其地质意义讨论

西秦岭是现今青藏高原东北缘的组成部分,印度板块-欧亚板块的碰撞汇聚的动力学过程在西秦岭的构造响应时代和方式是一个仍有争议的科学问题(李吉均等,1996;张岳桥等,2005;张培震等,2007;王志才等,2006;郭进京等,2017;YIN et al., 2000; AN et al., 2001; TAPPONNIER et al., 2001; GUO et al., 2002; HORTON et al., 2004; LIU et al., 2007; FANG et al., 2005; DUPONT - NIVET et al., 2008)。青藏高原东北缘的新生代沉积盆地类型、性质和原始空间分布研究和区域主要断裂带新生代以来构造变形的几何学-运动学历史研究,以及古地貌重建等相结合是深化对该科学问题的有效途径。西秦岭内部临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-浦麻断层虽然只是其中一条断层,但其宽达 150 m 的断层带和其中丰富的构造信息所揭示的构造演化过程应该代表了西秦岭乃至青藏高原东北缘的构造变形历史及几何学-运动学转换和动力学过程。

关于印度板块与欧亚板块碰撞的时代尽管仍然存在不同认识(王成善等,2009;肖序常等,2010;万天丰,2014; YIN et al., 2000; TAPPONNIER et al., 2001; ROYDEN et al., 2008),但多认为其初始碰撞时限为 65~60 Ma,碰撞高峰期发生在 55~45 Ma(潘桂堂等,2013),碰撞高峰期的构造缩短作用传递到现今青藏高原北部(YIN et al., 2000),柴达木盆地 50% 缩短发生在 42.8~40.5 Ma(ZHOU et al., 2006),指示了印度-欧亚碰撞引起的岩石圈构造挤压缩短效应在碰撞高峰期之后即传递到高原北部。西秦岭内部的临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-浦麻断层第一期高角度逆冲和西秦岭北缘断裂带起始于 50 Ma 的逆冲作用(DUPONT - NIVET et al., 2008)也应该记录了印度-欧亚碰撞高峰期的构造作用,也就是说,自新生代碰撞汇聚开始,深部的俯冲汇聚导致的地壳的挤压缩短,可能波及到西秦岭而产生了断层逆冲作用,这一挤压构造体制持续到古近纪末期,只是强度逐渐变弱。而临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-浦麻断层第二期由北向南的逆冲作用可能是青藏高原主体隆升后内部开始伸展走

滑的同时向外扩展产生的逆冲构造作用和高原北部的隆升启动。2 期逆冲作用之间,即渐新世—中新世末期,包括西秦岭在内的青藏高原东北缘可能处于构造伸展和盆地发育期。临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-浦麻断层第四纪以来左旋走滑作用可能反映了青藏高原北部的隆升向东部的扩展或构造挤压方向的顺时针旋转,地壳深部物质向南东方向流动的表层构造响应。

4 结论

青藏高原东北缘西秦岭腹地的临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-浦麻断层的断层岩、变形期次及其几何学-运动学等研究揭示了该断层新生代以来至少经历 3 期几何学-运动学特征不同的构造活动历史。第一期活动表现为向北东陡倾(倾角为 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$)的自北向南的高角度逆冲作用;第二期活动表现为向北东中等倾斜(倾角为 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$)的自北向南的逆冲作用;而第三期活动则表现为向南西陡倾(倾角为 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$)的左旋走滑作用。根据断层活动卷入的地层时代、3 期变形的截切关系和青藏高原东北缘新生代以来断裂活动及沉积盆地演化的历史分析,第一期挤压逆冲作用起始于始新世(45~50 Ma 左右)持续到始新世末或渐新世(29 Ma),第二期挤压逆冲作用发生于中新世末或上新世初(5~6 Ma);持续到第四纪初;而第三期左旋走滑作用只是第四纪以来的构造作用。

青藏高原东北缘西秦岭腹地是临潭-岷县-宕昌断裂带的小寨-浦麻断层的 3 期构造活动可能记录了印度板块与欧亚板块碰撞汇聚不同阶段的构造响应。第一期挤压逆冲作用可能是印度-欧亚汇聚碰撞高峰期(55~45 Ma)深部俯冲汇聚导致的地壳的挤压缩短作用已传递到西秦岭,从而产生了断层逆冲作用;而第二期的逆冲作用则与青藏高原地壳增厚和高原隆升向东北缘的扩展作用相联系;第三期左旋走滑作用则是第四纪以来的构造活动,明显滞后于 5 Ma 青藏高原腹地的东西伸展和挤出走滑作用,这可能指示了青藏高原东北缘的构造活动和地壳隆升与青藏高原主体不同步,反映整个青藏高原的形成是逐渐向北扩展的过程。

致谢:本文得到了国家自然科学基金项目(41772215,41340002,41140018)的资助。天津城建

大学惠浪波、王丽丽、毕娜、吉夏、张琛等硕士研究生和兰州大学谌文武教授、刘高教授和张帆宇副教授参加了部分野外工作,在此一并表示感谢。同时感谢论文评审专家提出的建设性意见。

参考文献(References):

方小敏,宋春晖,戴霜,等. 青藏高原东北部阶段性变形隆升:西宁、贵德盆地高精度磁性地层和盆地演化记录[J]. 地学前缘,2007,14(1):230-242.

FANG Xiaomin, SONG Chunhui, DAI Shuang, et al. Cenozoic deformation and uplift of the NE Qinghai-Tibet Plateau: evidence from high-resolution magnetostratigraphy and basin evolution[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(1): 230-242.

冯益民,曹萱泽,张二朋,等. 西秦岭造山带结构造山过程及动力学[M]. 西安:西安地图出版社,2002,1-263.

FENG Yimin, CAO Xuanze, ZHENG Erpeng, et al. Structure, Orogenic Process and Dynamics of West Qinling Orogenic Belt[M]. Xi'an:Xi'an Map Publishing House, 2002,1-263.

付碧宏,王萍,孔屏,等. 四川汶川 5.12 大地震同震滑动断层泥的发现及构造意义[J]. 岩石学报,2008,24(10):2237-2243.

FU Bihong, WANG Ping, KONG Ping, et al. Preliminary study of coseismic fault gouge occurred in the slip zone of the Wenchuan Ms 8.0 earthquake and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(10): 2237-2243.

甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1989,1-692.

Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. Regional Geology of Gansu Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989,1-692.

郭进京,韩文峰,李雪峰. 西秦岭新生代以来地质构造过程对青藏高原隆升和变形的约束[J]. 地学前缘,2009,16(6):215-225.

GUO Jinjing, HAN Wenfeng, LI Xuefeng. The Cenozoic Tectonic Evolution of the West Qinling: Constraints on the Uplift and Deformation of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(6): 215-225.

郭进京,韩文峰,王志强,等. 西秦岭北缘断裂带漳县—车厂

断层的结构及构造演化[J]. 地球学报,2013,34(2):154-162.

GUO Jinjing, HAN Wenfeng, WANG Zhiqiang, et al. The components and structures of the Zhangxian-Chechang fault zone in the north margin of West Qinling and its deformation history[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(2):154-162.

郭进京,韩文峰,胡晓隆,等. 西秦岭北缘新生代伸展断陷盆地确定及地质意义[J]. 地学前缘,2017,24(5):230-244.

GUO Jinjing, HAN Wenfeng, HU Xiaolong, et al. Cenozoic extensional rift basin in the northern margin of Western Qinling: constraints on the remote tectonic responses to the India-Eurasia collision in the northeastern margin of Tibetan Plateau[J]. Earth Science Frontier, 2017, 24(5): 230-244.

郭进京,吉夏,赵海涛,等. 西秦岭北缘漳县韩家沟砾岩对青藏高原东北缘地壳隆升的约束[J]. 地质科学,2017,52(4):1011-1025.

GUO Jinjing, JI Xia, ZHAO Haitao, et al. The Geological Characteristics of Hanjiagou Conglomerates in North Margin of the West Qinling, and Its Geological Constraint on Uplift of the Northeast Margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 2017, 52(4):1011-1025.

韩亮,周永胜,陈建业,等. 汶川地震基岩同震断层泥结构特征[J]. 第四纪研究,2010,30(4):745-758.

HAN Liang, ZHOU Yongsheng, CHEN Jianye, et al. Structural characteristics of coseismic fault gouge in bedrocks during the Wenchuan earthquake[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(4): 745-758.

何永年,林传勇,史兰斌. 构造岩石学基础[M]. 北京:地质出版社,1988,1-169.

HE Yongnian, LIN Chuanyong, SHI Lanbin. Basis of Tectonic Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988,1-169.

李传友,张培震,张剑玺,等. 西秦岭北缘断裂带黄香沟段晚第四纪活动表现与滑动速率[J]. 第四纪研究,2007,27(1):54-63.

LI Chuanyou, ZHANG Peizhen, ZHANG Jianxi, et al. Late Quaternary activity and slip rate of the Western Qinling Fault zone at Huangxianggou[J]. Quaternary Sci-

- ences, 2007, 27(1): 54-63.
- 李传友, 张培震, 袁道阳, 等. 西秦岭北缘断裂带黄香沟段晚第四纪水平位移特征及其微地貌响应[J]. 地震地质, 2013, 28(3): 391-404.
- LI Chuanyou, ZHANG Peizhen, YUAN Daoyang, et al. Late-Quaternary horizontal displacement and its associated microgeomorphology of the western Qinling Fault Zone at Huangxiangguo[J]. Seismology and Geology, 2013, 28(3): 391-404.
- 李海兵, 许志琴, 王焕, 等. 汶川地震主滑移带(PSZ): 映秀—北川断裂带内的斜切逆冲断裂[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 121-139.
- LI Haibing, XU Zhiqing, WANG Huan, et al. The Principal slip zone of the Wenchuan earthquake: a thrust fault oblique cutting the Yingxiu-Beichuan fault zone[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 121-139.
- 李吉均, 方晓敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(4): 316-322.
- LI Jijun, FANG Xiaomin, MA Haizhou, et al. Geomorphologic and environmental evolution in the upper reaches of Yellow River during the Late Cenozoic[J]. Science in China(Series D), 1996, 26(4): 316-322.
- 林爱明. 地震化石: 假熔岩的形成与保存[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008, 1-321.
- LIN Aiming. Fossil Earthquakes: the Formation and Preservation of Pseudotachylytes[M]. Beijing: High Education Press, 2008, 1-321.
- 刘少峰, 张国伟, P. L. Heller. 循化-贵德地区新生代盆地发育及其对高原增生的指示[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2007, 37(增刊): 235-248.
- LIU Shaofeng, ZHANG Guowei, HELLER P. L. Cenozoic basin development and its indication of plateau growth in the Xunhua-Guide district[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(Suppl): 235-248.
- 潘桂棠, 王立全, 张万平, 等. 青藏高原及邻区大地构造图及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- PAN Guitang, WANG Liquan, ZHANG Wanping, et al. Tectonic Map of Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Areas and Specifications[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- 邵延秀, 袁道阳, 王爱国, 等. 西秦岭北缘断裂破裂分段与地震危险性评[J]. 地震地质, 2011, 33(1): 79-90.
- SHAO Yanxiu, YUAN Daoyang, WANG Aiguo, et al. The segmentation of rupture and estimate of earthquake risk along the north margin of western Qinling Fault zone[J]. Seismology and Geology, 2011, 33(1): 79-90.
- 孙岩, 韩克从. 断裂构造岩带划分[M]. 北京: 科学出版社, 1985, 1-163.
- SUN Yan, HAN Kecong. Division of Fault Rock Zone[M]. Beijing: Science Press, 1985, 1-163.
- 万天丰. 中国大地构造学[M]. 北京: 地质出版社, 2011, 1-497.
- WAN Tianfeng. The tectonics of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011, 1-497.
- 王成善, 戴紧根, 刘志飞, 等. 西藏高原与喜马拉雅的隆升历史和研究方法: 回顾与进展[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 1-30.
- WANG Chengshan, DAI Jingen, LIU Zhifei, et al. The uplift history of the Tibetan Plateau and Himalaya and its study approaches and techniques: A review[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 1-30.
- 王志才, 张培震, 张广良, 等. 西秦岭北缘构造带的新生代构造活动—兼论青藏高原东北缘形成过程的指示意义[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 119-135.
- WANG Zhicai, ZHANG Peizhen, ZHANG Guangliang, et al. Tertiary tectonic activities of the north frontal fault zone of west Qinling mountains: implication for the growth of the northeastern margin of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(4): 119-135.
- 肖序常. 青藏高原的碰撞造山作用及效应[M]. 北京: 地质出版社, 2011, 1-603.
- XIAO Xuchang. Collision Orogeny and Its Effect of Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011, 1-603.
- 袁道阳, 杨明. 西秦岭北缘断裂带的位移累计滑动亏损特征及其破裂分段性研究[J]. 地震研究, 1999, 22(4): 382-389.
- YUAN Daoyang, YANG Ming. Research on the features of displacement cumulative slip deficits and segmentation in the northern fault zone of western Qinling[J]. Seismological Research, 1999, 22(4): 382-389.
- 袁道阳, 张培震, 方小敏, 等. 青藏高原东北缘临夏盆地晚新生代构造变形及过程[J]. 地学前缘, 2007, 14(1):

- 243-250.
- YUAN Daoyang, ZHANG Peizhen, FANG Xiaomin, et al. Late Cenozoic tectonic deformation of the Linxia Basin, northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(1): 243-250.
- 袁道阳, 张培震, 刘柏麓, 等. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换[J]. 地质学报, 2004, 78(2): 270-278.
- YUAN Daoyang, ZHANG Peizhen, LIU Bochi, et al. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary active tectonics in Northeastern margin of Qinghai-Tibet plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(2): 270-278.
- 张国伟, 郭安林, 姚安平. 中国大陆构造中西秦岭-松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 23-32.
- ZHANG Guowei, GUO Anlin, YAO Anping. Western Qinling-Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 23-32.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001, 1-855.
- ZHANG Guowei, ZHANG Benren, YUAN Xuecheng, et al. Qinling Continental Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001, 1-855.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 2007, 26(1): 5-13.
- ZHANG Peizhen, ZHENG Dewen, YIN Gongming, et al. Discussion on late Cenozoic growth and rise of Northeastern margin of Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 2007, 26(1): 5-13.
- 张元生, 冯红武, 陈继锋, 等. 基于地震学资料探讨 2013 年岷县 6.6 级地震发震构造[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 419-423.
- ZHANG Yuansheng, FENG Hongwu, CHEN Jifeng, et al. Study on Seismogenic Structure of Minxian-Zhangxian Ms6.6 Earthquake with Seismological Date[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 419-423.
- 张岳桥, 马寅生, 杨农, 等. 西秦岭地区东昆仑-秦岭断裂系晚新生代左旋走滑历史及其向东扩展[J]. 地球学报, 2005, 26(1): 1-8.
- ZHANG Yueqiao, MA Yinsheng, YANG Nong, et al. Late Cenozoic left-slip faulting process of the east Kunlun-Qinling Fault System in the West Qinling region and its eastward propagation[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(1): 1-8.
- 郑文俊, 雷中生, 袁道阳, 等. 1573 年甘肃岷县地震史料考证与发震构造探讨[J]. 中国地震, 2007, 23(1): 5-83.
- ZHENG Wenjun, LEI Zhongsheng, YUAN Daoyang, et al. Textual research on the historical data of the 1573 AD Minxian M6 earthquake in Gansu Province and discussion on its seismogenic structure[J]. Earthquake Research China, 2007, 23(1): 75-83.
- 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 MS6.6 级地震孕震机制[J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4058-4071.
- ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, HE Wengui, et al. Geometric pattern and active tectonics in Southeastern Gansu province: Discussion on seismogenic mechanism of Minxian-Zhangxian Ms6.6 earthquake on July 22, 2013[J]. Chinese J. Geophys., 2013, 56(12): 4058-4071.
- CLARK MK, FARLEY KA, ZHENG D, et al. (2010) Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan Plateau margin from apatite (U-Th)/He ages[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 296: 78-88.
- DUPONT-NIVET G, HOORN C, KONERT M. Tibetan uplift prior to the Eocene-Oligocene climate transition: Evidence from pollen analysis of the Xining Basin[J]. Geology, 2008, 36: 987-990.
- DUVALL AR, CLARK MK, WAN DER PLUIJM BA, et al. Direct dating of Eocene reverse faulting in northeastern Tibet using Ar-dating of fault clays and low-temperature thermochronometry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 304: 520-526.
- FANG XM, GARZIONE C, VAN DER VOO R, et al. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 210(3): 545-560.
- FANG XM, YAN MD, VAN DER VOO, et al. Late Cenozoic deformation and uplift of the NE Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution magnetostratigraphy of the Guide Basin, Qinghai Province, China[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 2005, 117(9-10): 1208-1225.
- GE Junyi, GUO Zhengtang, ZHAN Tao, et al. Magne-

- tostratigraphy of the Xihe loess-soil sequence and implication for late Neogene deformation of the West Qinling Mountains[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189: 1399-1408.
- GOODWIN LB, TIKOFF B. Competency contrast, kinematics, and the development of foliations and lineations in the crust[J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24(6-7): 1065-1085.
- GUO ZT, RUDDIMAN WF, HAO QZ, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China[J]. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- HORTON BK, Dupont-Nivet G, Zhou J, et al. Mesozoic-Cenozoic evolution of the Xining-Minhe and Dangchang basins, northeastern Tibetan Plateau: Magnetostratigraphic and biostratigraphic results[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109.
- HOUGH BG, Garzione CN, Wang Zhicai, et al. Stable isotope evidence for topographic growth and basin segmentation: Implications for the evolution of the NE Tibetan Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123(1-2): 168-185.
- LEASE RO, BURBANK DW, CLARK MK, et al. Middle Miocene reorganization of deformation along the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Geology*, 2011, 39: 359-362.
- LEASE RO, BURBANK DW, HOUGH B, et al. Pulsed Miocene range growth in northeastern Tibet: Insights from Xunhua Basin magnetostratigraphy and provenance[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, 124: 657-677.
- LIN A. S-C fabrics developed in cataclastic rocks from the Nojima fault zone, Japan and their implications for tectonic history[J]. *Journal of Structural Geology*, 2001, 23(6-7): 1167-1178.
- LIN AM. Fossil Earthquakes: the Formation and Preservation of Pseudotachylytes[M]. Beijing: High Education Press (in Chinese), 2008, 1-321.
- LIU Shaofeng, ZHANG Guowei, Heller P. L. Cenozoic basin development and its indication of plateau growth in the Xunhua-Guide district [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(2): 277-291.
- ROYDEN LH, BURCHFIEL BC, VAN DER HILST RD. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2008, 321: 1054-1058.
- SIBSON RH. Fault rocks and fault mechanism[J]. *J. Geol. Soc. London*, 1977, 133: 191-213.
- TAPPONNIER P, XU ZQ, ROGER F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2001, 294: 1671-1677.
- WANG WT, KIRBY E, ZHANG PZ, et al. Tertiary basin evolution along the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Evidence for basin formation during Oligocene transtension[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, 125(3-4): 377-400.
- WANG XX, LI J J, SONG C H, et al. Late Cenozoic orogenic history of Western Qinling inferred from sedimentation of Tianshui Basin, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2012, 101: 1345-1356.
- WANG XX, ZATTIN M, LI J J, et al. Eocene to Pliocene exhumation history of the Tianshui-Huicheng region determined by Apatite fission-track thermochronology: Implication for evolution of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Asian Earth Sci*, 2002, 42: 97-110.
- WANG ZC, ZHANG PZ, GARMALA NC, et al. Magnetostratigraphy and depositional history of the Miocene Wushan basin on the NE Tibetan Plateau, China: Implications for middle Miocene tectonics of the West Qinling fault zone[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 44: 189-202.
- YIN A, HARRISON TM. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 2000, 28: 211-280.
- ZHENG DW, ZHANG PZ, WAN JJ, et al. Rapid exhumation at 8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248(1-2): 183-193.
- ZHOU JX, XU F Y, WANG TC, et al. Cenozoic deformation history of the Qaidam Basin, NW China: Results from cross-section restoration and implications for Qinghai-Tibet Plateau tectonics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243(1-2): 195-210.