

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.978>



# 华北克拉通破坏区最新构造运动起始时间讨论

徐锡伟<sup>1</sup>, 白鸾曦<sup>2</sup>, 魏雷鸣<sup>2</sup>, 陈桂华<sup>2</sup>, 于贵华<sup>2</sup>

1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2. 中国地震局地质研究所活动构造与火山重点实验室, 北京 100029

**摘要:** 华北克拉通破坏区是历史破坏性地震频发区, 震源机制解和地震地表破裂带等反映出历史地震的发震断层为新生走滑断层, 很难用地壳的伸展构造系统来合理解释。首先对1679年三河—平谷M8.0级地震的大厂隐伏凹陷西边界夏垫断裂进行高分辨率地震勘探和上盘钻孔地层进行标定, 然后在河套断陷盆地带大青山南麓晚更新世湖相地层中识别出2期角度不整合面(UC1和UC2), 并进行了系统测年, 综合近年来活动断层比例尺填图和城市活动断层探测成果, 明确指出, 在华北克拉通破坏区, 代表新生代早期地壳伸展运动的铲形正断层的活动性在上新世至第四纪早期逐渐减弱, 到晚更新世早期基本停止活动; 晚更新世中期以来大青山构造运动为华北克拉通破坏区最新一期构造运动, 主要表现为区域剪切应变条件下新生走滑断层形成和扩展, 并伴随相关地震活动。最新构造运动的主要动力来源于青藏高原物质东向挤出, 以及其对鄂尔多斯块体西南缘强烈东向推挤作用。这些新认识对深化华北克拉通破坏区地震发震机理研究, 理解板内最新变形动力学, 均具有十分重要的科学价值。

**关键词:** 华北克拉通; 三河—平谷地震; 地震发震机理; 青藏高原; 鄂尔多斯块体; 构造地质。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1647-14

收稿日期: 2019-05-05

## Discussion on Initiation Time of the Latest Tectonic Movement in Break-up Region of the North China Craton

Xu Xiwei<sup>1</sup>, Bai Luanxi<sup>2</sup>, Wei Leiming<sup>2</sup>, Chen Guihua<sup>2</sup>, Yu Guihua<sup>2</sup>

1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2. Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

**Abstract:** The break-up region of the North China craton is an area where historically destructive earthquakes have frequently occurred. The focal mechanism solutions and earthquake surface rupture zones indicate that these historical earthquakes were dominated by the newly-formed seismogenic strike-slip faults, which are incompatible with the crustal extensional tectonics. This research firstly examines the high-resolution seismic reflection profile and borehole stratigraphy on the hanging wall of the Xiadian fault, which resulted in the 1679 Sanhe-Pinggu M8.0 earthquake ruptures along the western boundary of the Dachang concealed sag. Then, two unconformity contacts (UC1 and UC2) are distinguished by careful checks on structural and stratigraphic features from a cross section of the Late Pleistocene lacustrine at the southern piedmont of the Daqingshan. Combined with the results of active fault mappings with 1:50 000 scale and urban active fault detection in recent years, we conclude that the listric normal faults, which represent crustal extension in the Early Cenozoic, had been weakening in the Pliocene to the Early Quaternary, and had ceased activity by the early Late Pleistocene. The Daqingshan tectonic movement has initiated since the middle of the Late Pleistocene, representing the latest tectonic movement in break-up region of the North China craton, in which new strike-slip faults have formed under a shear-strain crustal condition owing to continuous eastward extrusion of the Qinghai-Tibet Plateau and strong eastward push on the southwestern margin of the Ordos block. These new points of view have

基金项目: 国家自然科学基金项目(No.91214201); 国家公益性重大行业科研专项(No.200908001).

作者简介: 徐锡伟(1962—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事活动构造与地震研究。ORCID: 0000-0002-8301-7347. E-mail: xiweixu@vip.sina.com

引用格式: 徐锡伟, 白鸾曦, 魏雷鸣, 等, 2019. 华北克拉通破坏区最新构造运动起始时间讨论. 地球科学, 44(5): 1647—1660.

important academic value for understanding mechanism of earthquake occurrence and dynamics of the latest crustal deformation in intra-plate.

**Key words:** North China craton; Sanhe-Pinggu earthquake; mechanism of earthquake occurrence; Qinghai-Tibet Plateau; Ordos block; tectonics.

已有研究资料表明,华北克拉通岩石圈破坏发生的峰值年代为距今 125 Ma(早白垩世),形成了华北平原强破坏区和鄂尔多斯弱破坏区(Menzies and Xu, 1998; Wu *et al.*, 2005; 吴福元等, 2008; 朱日祥和郑天愉, 2009; He, 2015; 朱日祥, 2018)。华北平原克拉通强破坏区经历了中生代晚侏罗纪—早白垩纪首次裂谷作用、白垩纪末期燕山挤压构造运动、古近纪始新世—新近纪中新世再次裂谷作用、新近纪上新世—第四纪整体沉降和距今 0.73 Ma 以来新构造期构造事件;鄂尔多斯弱破坏区发生了白垩纪末期燕山挤压构造运动、新生代古近纪至新近纪持续隆升和鄂尔多斯周缘弱伸展运动,形成了鄂尔多斯块体周缘河套、吉兰泰—银川、渭河和山西等断陷盆地带,以及海拔介于 2 400~3 000 m 的古新世北台期夷平面、海拔介于 1 800~2 100 m 的渐新世甸子梁期夷平面和海拔介于 300~500 m 的新近纪唐县期夷平面等隆升层状构造(马杏垣, 1982; 马杏垣等, 1983; 张文佑等, 1983; 万天丰和曹瑞萍, 1992; 万天丰, 1994; Ren *et al.*, 2002; 徐锡伟等, 2002; 朱日祥, 2018),相继提出了“地台活化”假说(陈国达, 1956)、“断块构造”、“伸展构造”、“岩石圈减薄”等概念来解释克拉通破坏现象,建立了克拉通破坏的理论体系和中生代晚期以来古太平洋板块向西俯冲、后撤、在地幔过渡带滞留脱水和弧后拉张是导致华北克拉通破坏最直接的外部驱动力等认识(吴福元等, 2008; 朱日祥等, 2011, 2012; 朱日祥, 2018)。

美国西部盆地山脉曾经历过白垩纪—早新生代挤压逆断层作用,正经历着距今 17 Ma 以来弧后或弧内扩展成因的近东西向地壳伸展作用(Allmendinger *et al.*, 1987; Wernicke and Axen, 1988),高角度和低角度正断层发育,正断层型破坏性地震多发(Eaton, 1982; Zoback, 1989; DePolo *et al.*, 1991; Suter and Contreras, 2002)。与美国西部盆地山脉相比,尽管有学者认为华北克拉通破坏区新近纪以来存在着 NWW 至 SEE 向地壳伸展,表现为部分铲形正断层继承性活动(李涛和王宗秀, 2009),但新生性构造特征明显,例如在华北平原北缘出现左旋走滑的 NWW 向张家口—蓬莱断裂带、右旋张剪切性质的山西断陷盆地带,郯庐断裂带转

化为右旋挤压性质,且存在陡倾角走滑断层切割铲形正断层等构造现象(马杏垣等, 1983; Xu and Ma, 1992; 徐锡伟等, 2002; Qi and Yang, 2010);历史破坏性特大地震频发,曾于公元 1303 年、1556 年、1668 年、1679 年和 1739 年发生过洪洞 8 级地震、华县 8 级地震、郯城 8.5 级地震、三河—平谷 8 级地震和平罗 8 级地震(图 1);发震断层均为带有正断倾滑分量的正走滑断层,郯城 8.5 级地震地表破裂出现挤压剪切破裂性质(徐锡伟和邓起东, 1990; 晁洪太等, 1995; 徐锡伟等, 2002; 鄢少英等, 2011);震源机制解反映出华北克拉通破坏区现代地震( $M \geq 6$ )的发震断层以走滑断层为主,兼有少量逆断层和正断层,最大主压应力轴方位 NE 至 NEE 向,最小主压应力轴 NW 至 NNW 向,所有这些现象均为发育走滑断层的应力—应变环境(许忠淮等, 1983; Chen and Na'belek, 1988; 武敏捷等, 2011; 高彬等, 2016)。活动构造和地震地质深入研究进一步表明,中国大陆晚第四纪(距今 12 万年)和现今构造变形以块体运动为主要特征,7 级以上板内地震与块体周缘距今 12 万年以来不同性质活动断层密切相关(徐锡伟等, 1994; 邓起东等, 2002; Xu *et al.*, 2003; 张培震等, 2003),但由于尚未开展详细的研究,晚第四纪时期有利于发育走滑断层的最新一次构造运动起始时间仍处于未知状态,其构造特征不清。

本文结合 2002 年以来牵头开展的国家自然科学基金资助重点计划项目、国家公益性行业重大专项和城市活动断层探测等国家级资助项目成果,对华北克拉通破坏区最新构造变动特征和最新构造运动起始时间等作详细分析,探讨最新构造运动的动力来源,以便深刻理解华北克拉通破坏区新构造运动规律与地震灾害的空间分布特征,丰富现今板内变形动力学的构造内涵。

## 1 华北克拉通破坏区活动块体划分

### 1.1 活动块体定义

“活动块体”指受晚第四纪(距今 10~12 万年)活动构造切割、围限,至今仍活动着的构造单元,是脆性地壳在最新构造变动期间变形局部化的产物,

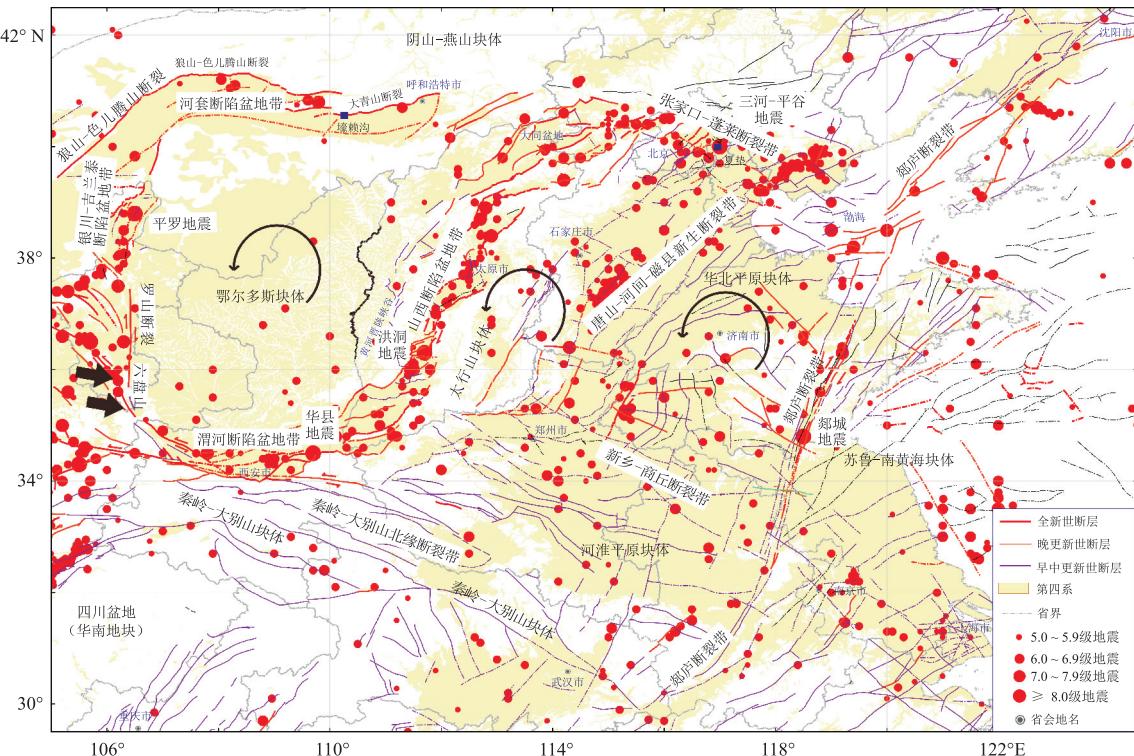


图 1 华北克拉通破坏区活动构造分布

Fig.1 Distribution of active tectonics in break-up region of the North China craton  
左下方黑色箭头代表青藏高原东北缘对鄂尔多斯块体向东作用力;半圆圈箭头代表块体转动方向

具有运动的整体性、边界类型的多样性、多种构造运动的相互协调性等特征,与现今地表破裂型地震的发生密切相关(Xu *et al.*, 2003),也称为活动地块(张培震等,2003).活动地块的运动是通过不同类型边界活动构造带,特别是活动断层破裂和滑动及其附近较窄范围内柔塑性变形实现的,块体边界活动断层对历史、现今和未来破坏性地震具有明显的空间限制作用(Xu *et al.*, 2003).活动地块边界可以是一条宽度较窄的单一活动断层,也可以是具有一定宽度的复杂活动构造带;断陷盆地带或多条断裂和多个盆地组成的活动构造带(徐锡伟等,1994;邓起东等,2002; Xu *et al.*, 2003; 张培震等,2003).据统计,中国大陆几乎所有 8 级和 80%~90% 的 7 级以上的强震发生在活动地块的边界带上(张培震等,2003).

## 1.2 华北克拉通破坏区活动块体划分

根据活动块体定义,综合历史地震的空间分布、主干活动构造,特别是活动断层的空间展布等,中国大陆及其邻区可划分为青藏高原、新疆—阿拉善、东北、华北、华南、南海等 6 个板内 I 级活动块体(邓起东等,2002).华北克拉通破坏区作为 I 级活动块体,发育着类型众多、分布广泛的活动断层及其组合而成的活动构造带,包括山西断陷盆地带、唐山—河

间—磁县新生断裂带、郯庐断裂带、新乡—商丘断裂带等,将华北克拉通破坏区进一步切割成鄂尔多斯、太行山、华北平原、河淮平原和苏鲁—南黄海等 II 级活动块体,第四纪时期表现为块体隆升、坳陷和逆时针转动等运动特征(图 1; Xu *et al.*, 1993; 徐锡伟等,1994; 邓起东等,2002; 张培震等,2003).这些不同级别活动块体,具有不同的边界活动断层及其相关的地震活动性.

## 2 不同级别活动块体边界活动断层滑动习性

### 2.1 I 级活动块体边界活动断层

华北克拉通破坏区作为 I 级活动块体,其北边界包括受近 EW 向左旋正走滑断裂控制的河套断陷盆地带、山西断陷盆地带北东端晋冀蒙盆岭构造区大同盆地、宣化盆地、延怀盆地和华北平原区北部北京凹陷、武清凹陷、歧口凹陷、渤海凹陷等,边界宽度约为 100 km. 狼山—色尔腾山山前断裂、乌拉山山前断裂、大青山山前断裂等河套断陷盆地带主边界断裂垂直滑动速率为 2.20~6.47 mm/a, 大青山断裂左旋走滑速率约为 5 mm/a, 但近期研究表明

这些断裂的垂直滑动速率约为  $1.5 \text{ mm/a}$ (公王斌等,2013; 董绍鹏等,2018); 张家口—蓬莱断裂带由一系列 NWW 向左旋走滑断层及其控制的第四纪断陷盆地组成(徐杰等,1998; 索艳慧等,2013), 其中新保安—沙城断裂晚更新世以来发生过 4 次古地震事件, 平均复发间隔约为 7 600 a; 北京地区南口—孙河断裂全新世时期还有地表破裂型地震事件发生(徐锡伟等,2002), 平均左旋走滑速率为  $0.6\sim1.2 \text{ mm/a}$ ; 天津海河断裂全新世早期有活动; GPS 监测数据显示张家口—蓬莱断裂带现今左旋滑动速率为  $2\sim4 \text{ mm/a}$ .

华北克拉通破坏区南界为 NWW 向至近 EW 向渭河断陷盆地带和秦岭一大别山北缘断裂带, 渭河断陷盆地带包括近 EW 向渭河断裂、骊山山前断裂、华山山前断裂、秦岭北缘断裂等, 华山山前断裂和秦岭北缘断裂垂直滑动速率分别为  $0.4\sim1.5 \text{ mm/a}$  和  $1.5\sim2.2 \text{ mm/a}$ ; 向东主要由铁炉子断裂、商丹断裂、羊册—固始—肥中断裂等系列 NW 向断裂组成, 其中铁炉子断裂晚更新世左旋滑动速率推测为  $2.25\sim4.75 \text{ mm/a}$ (邓起东等,2002), GPS 监测到左旋速率约为  $3.5 \text{ mm/a}$ (张培震等,2002); 其他断裂均为早中更新世断层.

华北克拉通破坏区西界包括鄂尔多斯块体西南缘近 SN 向多条逆断裂—褶皱带和银川—吉兰泰断陷盆地带(图 1). 青藏高原北东缘物质向东逃逸主要表现为 NWW 向烟筒山、天景山、海原断裂左旋走滑运动及其在与鄂尔多斯块体接壤处受到强烈阻挡, 烟筒山、天景山、海原断裂等走向被迫向南偏转至 NNW 至近 SN 向, 形成多条弧形构造带, 将走滑运动转换为 NNW 至近 SN 向逆断裂—褶皱带上地壳的缩短隆升和东向推挤作用. 例如, NW 向海原断裂左旋滑动速率为  $8.0\pm2.0 \text{ mm/a}$ (Cavalié *et al.*, 2008), 向东到近南北向六盘山—小关山逆断裂—褶皱带则以地壳缩短和隆升为主, 近 EW 向地壳缩短速率达  $6\pm2 \text{ mm/a}$ , 而东南部 NW 向岐山—马召断裂左旋滑动速率介于  $0.5\sim1.0 \text{ mm/a}$ , 说明海原断裂左旋走滑没有完全被位于两条走滑断裂挤压阶区的六盘山—小关山逆断裂—褶皱带吸收(Li *et al.*, 2018), 显示出青藏高原东向挤出对鄂尔多斯块体西南角施加了向东偏南的持久作用力, 导致鄂尔多斯块体逆时针转动(徐锡伟等,1994); 青藏高原东北缘弧形构造带东侧近 NS 向罗山断裂右旋走滑速率约为  $4.3 \text{ mm/a}$ , 在构造上归属鄂尔多斯块体周缘断裂系(图 1), 是鄂尔多斯块逆时针转动的构造响应(Middleton *et al.*, 2016). 银川—吉兰泰断陷盆地带

由银川盆地、贺兰山地垒和吉兰泰盆地等右行斜列而成, 以发育右旋走滑正断层、地堑盆地和地垒山地为主要特征, NNE 向主控边界断裂右旋滑动速率为  $2.58\sim4.37 \text{ mm/a}$ , 垂直滑动速率为  $0.23\sim2.1 \text{ mm/a}$ (邓起东等, 2002), 公元 1739 年平罗地震( $M_{8.0}$ )地表破裂带错断明代长城, 右旋走滑位移为  $1.45 \text{ m}$ , 正断垂直位移为  $0.35\sim0.95 \text{ m}$ , 显示出以右旋走滑为主.

由于对黄海内部活动构造缺乏详细勘探与研究, 华北克拉通破坏区东部边界很难确定, 但依据历史破坏性地震分布推测为地震频发的菲律宾海板块俯冲带及其邻近的琉球群岛.

## 2.2 II 级活动块体边界活动断层

鄂尔多斯和太行山 2 块体位于华北克拉通西部弱破坏区, 以整体缓慢隆升和逆时针转动为主(徐锡伟等, 1994; 程绍平等, 1998). 山西断陷盆地带为鄂尔多斯块体与太行山块体分界带, 由 10 余个不连续斜列盆地及相关正走滑断层组合而成(图 1), 是一条第四纪右旋剪切拉张带, NNE 向断裂右旋滑动速率为  $1.3\sim5.7 \text{ mm/a}$ , 垂直滑动速率为  $0.15\sim0.69 \text{ mm/a}$ ; 南北两端盆岭构造区 NEE 向正断层垂直滑动速率为  $0.12\sim1.48 \text{ mm/a}$ (Xu and Ma, 1992; Xu *et al.*, 1993; Si *et al.*, 2014); GPS 监测数据显示, 山西断陷盆地带现今具有  $3\sim4 \text{ mm/a}$  的拉张速率, 北段拉张速率增大到  $5 \text{ mm/a}$ (张培震等, 2002).

华北平原、河淮平原、苏鲁—南黄海等块体位于华北克拉通强破坏区, 新生代存在逆时针转动, 除胶东和泰山地区外, 以整体性缓慢沉降为特征(徐锡伟等, 1994). 作为华北平原、河淮平原等块体与太行山块体分界的唐山—河间—磁县新生断裂带(图 1), 又称唐山—河间—磁县地震带, 对应于华北平原滦县、唐山、宁河、大成、河间、束鹿、隆尧、邢台、邯郸至磁县一线地震密集带, 总体走向为  $N40^\circ E$ 、长 600 余 km, 地壳浅部可见 NNE 向唐山断裂、大成东断裂、新河断裂、邯郸断裂、汤东断裂等, 曾发生过 17 次 6 级以上破坏性地震, 包括 1830 年磁县  $M7.5$  级地震、1966 年邢台  $M7.2$  级地震、1976 年唐山  $M7.8$  级地震, 震源机制解反映发震断层走向为  $N15^\circ\sim35^\circ E$ , 倾角为  $80^\circ$  以上, 右旋走滑性质(徐杰等, 1996). 郑庐断裂带为苏鲁—南黄海块体与华北平原块体和河淮平原块体之间边界带, 走向为  $N15^\circ\sim20^\circ E$ , 莱州湾以南又称沂沐断裂带, 包括安丘—莒县断裂和沂水—汤头断裂, 其中沂水—汤头断裂晚更

新世早期有活动, 安丘—莒县断裂为全新世断层, 右旋逆走滑性质, 速率约为  $0.7 \text{ mm/a}$ , 1668 年  $8^{1/2}$  级地震地表破裂带长约为  $230 \text{ km}$ , 右旋走滑位移为  $7\sim9 \text{ m}$  (张鹏等, 2007; 李康等, 2016), 也有作者认为郯庐断裂带右旋滑动速率大于  $2.0 \text{ mm/a}$  (Huang, 1993; Jiao *et al.*, 2016)。河淮平原块体北界新乡—商丘断裂带总体走向为 NWW 向, 长约为  $400 \text{ km}$ , 由磁县一大名断裂、新乡—商丘断裂、东明—成武断裂、无锡—宿迁断裂等组成的一条宽阔断裂带, 其中磁县一大名断裂和东明—成武断裂曾分别发生过 1830 年磁县 7.5 级地震和 1937 年菏泽 7 级地震, 它们形成的地震地表破裂带显示左旋走滑性质(赵宪超, 1991; 江娃利和张英礼, 1997), 新乡市和宿迁市活动断层探测表明, 新乡—商丘断裂和无锡—宿迁断裂为中更新世断层。

### 2.3 活动块体内部活动断层

鄂尔多斯块体内部不存在明显的活动构造, 整体显示出刚性运动特性(张培震等, 2002), 第四纪时期以持续隆升为主。其他活动块体内部均存在着晚第四纪弱活动断层。太行山块体以缓慢隆升为主, 内部发育着晋城—获鹿断裂、太行山山前断裂、孙庄子—乌龙沟断裂、南口山前断裂等活动断层(图 1)。NNE 向晋城—获鹿断裂长治以南段为晚更新世断层, 水准测量表明(1971~1991)上盘下降, 速率为  $0.2 \text{ mm/a}$ ; 据晋城市地震局和山西省地震工程勘察研究院(2007)在晋城郜匠开挖的探槽揭露, 晚更新世至全新世晋城—获鹿断裂发生过 3 次古地震事件, 事件 1 发生于距今  $2.0 \pm 0.3 \text{ ka}$  之前的全新世晚期, 事件 2 发生于距今  $12.5 \pm 1.4 \text{ ka}$  的晚更新世晚期, 事件 3 发生于距今  $50\sim31 \text{ ka}$  的晚更新世中晚期。孙庄子—乌龙沟断裂总体走向为 NNE, 倾向为 NW 或 SE, 倾角为  $60^\circ\sim70^\circ$ , 南段可见断错晚更新世地层, 表现为以正断层活动为主, 兼具少量的右旋走滑分量, 平均垂直位移速率为  $0.03 \text{ mm/a}$ ; 北段晚更新世中期以来平均右旋滑动速率为  $0.09 \text{ mm/a}$ , 垂直位移速率为  $0.08 \text{ mm/a}$ 。太行山山前断裂由八宝山断裂、保定—石家庄断裂、徐水断裂、晋县断裂、邯郸断裂、汤西断裂和汤东断裂等组成, 总体走向为  $N40^\circ\sim45^\circ\text{E}$ , 倾向为 SE, 均为上陡下缓的铲形正断层, 控制着顺义、丰台、涿州、廊坊、保定、石家庄、晋县、任县、邯郸、汤阴等新生代早期盆地发育(徐杰等, 2000); 据河北省地级城市活动断层探测可知, 保定—石家庄断裂、徐水断裂切割了距今  $110 \text{ ka}$  堆积的粉砂质粘土层, 但被距今  $100 \text{ ka}$  灰白色钙板层覆盖, 最

新活动时代为晚更新世早期(高战武等, 2014); 邯郸断裂具有右旋滑动性质, 控制邯郸凹陷的发育, 在石家庄附近浅层地震勘探显示错断了晚更新世地层, 但未发现全新世活动迹象; 汤西断裂为汤阴地堑西边界断裂, 右旋正断斜滑性质, 最新一期活动可能发生在中更新世末期或晚更新世早期; 汤东断裂为汤阴地堑东边界断裂, 长约为  $100 \text{ km}$ , 走向为  $N30^\circ\text{E}$ , 倾向为 NW, 活动年代为晚更新世(徐增波等, 2019)。华北平原、河淮、苏鲁—南黄海等块体也存在着若干弱活动断层, 但大部分为早中更新世断层。例如, 华北平原南部 NNE 向聊城—兰考断裂为华北盆地与鲁西隆起分界断裂, 晚更新世以来垂直滑动速率平均为  $0.19 \text{ mm/a}$ (向宏发等, 2000); 河淮平原内部 NNE 向茅山东麓断裂长度约为  $134 \text{ km}$ , 地层学和年代学研究证实部分段落晚更新世有活动(胡连英等, 1994); 海阳断裂、沧口断裂等为苏鲁—南黄海块体内部更新世晚期弱活动断层。

综上所述, 华北克拉通破坏区 I 级和 II 级块体边界主要由 NWW-NW 向左旋走滑断层和 NNE-NE 向右旋走滑断层两组活动断层组成, 二组断层具有共轭关系, 兼有少量的倾滑运动分量, 显示出华北克拉通破坏区地壳为水平挤压与剪切变形环境。

## 3 最新构造运动起始时间的确定

### 3.1 地震活动断层世代交替

不同级别活动块体边界和块体内部活动断层长期滑动速率、活动时代等特征分析表明, 华北克拉通破坏区最新构造变动集中发生在 I 级和 II 级块体边界构造带活动断层上, 块体内部断层活动性相对较弱。除华北平原与河淮平原 2 块体之间 NWW 向新乡—商丘断裂带外, 其他边界带历史上均发生过 M8 级地震和多次  $M7\sim7.9$  级地震, 块体内部早中更新世断层很少有 M7 级以上地震发生, 发震断层主要为 NNE-NE 向和 NWW 向带有倾滑分量的走滑断层(Xu and Deng, 1996)。

1679 年三河—平谷 M8 级地震的发震断层为华北平原北部大兴隐伏凸起与大厂隐伏凹陷之间 NE 向夏垫断裂(徐锡伟等, 2002), 地震期间形成了由 7 条次级断层左阶羽列状组成长大于  $10 \text{ km}$  的地表断层陡坎, 同震垂直位移平均值约为  $1.74 \text{ m}$ ; 全新世平均垂直滑动速率为  $0.45 \text{ mm/a}$ , 右旋走滑速率约为  $0.54 \text{ mm/a}$ 。夏垫断裂整体走向为  $N42^\circ\text{E}$ , 东南盘下降、西北盘上升, 正右旋走滑性质,

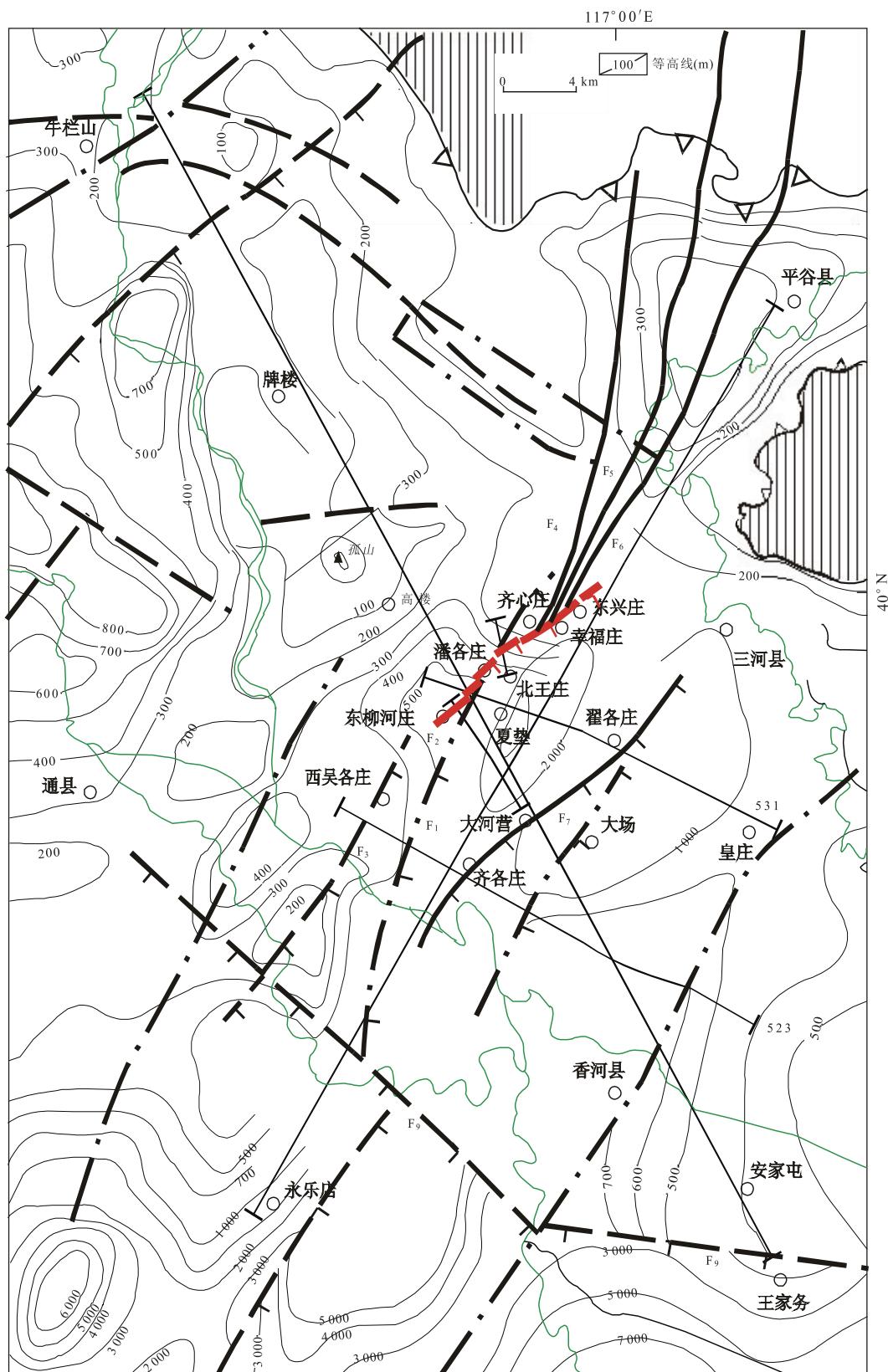


图 2 三河—平谷 M8.0 级地震区新生走滑断层与隐伏铲形正断层关系

Fig.2 Map demonstrating relation between newly-formed strike-slip fault and hidden listric normal fault in the epicenter of the Sanhe-Pinggu M8.0 earthquake

红线为地震地表断层;被红线切割的黑粗线为夏垫铲形断裂;虚线代表隐伏断层;长黑细线为深地震反射测线;短细线为浅层地震勘探线;绿线代表河流;阴影区为前新生代基岩分布区;带三角的线为盆地边界,三角指向盆地侧;细线上数字代表新生代地层厚度(m)

与控制早第三纪大厂隐伏凹陷发育的边界断裂走向上存在  $15^{\circ}\sim20^{\circ}$  的夹角,显示出在二维平面上斜切先存断裂的新生性特征(图 2).由于特殊的地理位置,通过解剖地震深部结构可以揭示特大地震发震机理.迄今为止已有香山—牛栏山、凤河营—平谷和昌平—宝坻等 3 条深地震反射勘探剖面跨越三河—平谷 M8 级地震区,不仅揭示出地壳浅部大厂隐伏凹陷内部半地堑状盆地内西倾的沉积反射层、铲形正断层系和上覆近于水平的上新世—第四纪地层等地壳浅部结构特征,还在大兴隐伏隆起与大厂隐伏凹陷之间发现了倾角明显不同的两组断层(图 3):一组为上陡下缓的铲形正断层(称之为夏垫铲形断层  $F_1$ ),上部倾角为  $40^{\circ}\sim45^{\circ}$ ,向下变缓,在埋深  $\sim 10$  km 收敛到近水平滑脱带上,控制着古近纪—中新世大厂隐伏凹陷半地堑状盆地结构形态,限制了古近系和中新统分布;另一组为东倾陡直断层(称之为夏垫断裂  $F_2$ ),向上与 1679 年三河—平谷 8 级地震地表断层陡坎相连,切割了铲形正断层,向下追踪到深  $16\sim18$  km 的上、下地壳分界面附近,并可能与其下切穿莫霍面的深断裂相关联(徐锡伟等,2002;刘保金等,2011).上述两组断层的切割关系和相关盆地沉积结构等说明,在大兴隐伏隆起与大厂隐伏凹陷之间在上新世至第四纪时期曾发生过边界断层的世代交替,空间上切割古近纪—中新世夏垫铲形断裂( $F_1$ )的陡倾角夏垫断裂( $F_2$ )应为最新构造运动产物.

为确定夏垫铲形断层与夏垫断裂近地表切割关系和断层世代交替的发生时期,沿昌平—宝坻深地震反射剖面揭示夏垫铲形断裂位置和夏垫断裂地表陡坎地段,开展了长约 1 100 m 浅层 SH 波反射勘探和上盘的钻孔探测,浅层 SH 波反射叠加时间和深度剖面清楚地显示出,夏垫铲形断裂( $F_1$ )上断点及其与陡直夏垫断裂( $F_2$ )切割点埋深在 50 m 附近(图 3),ZK4 钻孔岩心古地磁显示该处地层已经属于上更新统下段,即夏垫铲形断裂( $F_1$ )已经切割了上更新统底界,可见陡倾角夏垫断裂( $F_2$ )应是晚更新世以来发育、形成的新生断层,是华北克拉通破坏区最新构造运动的产物,同时也说明象征华北克拉通破坏的新生代早中期地壳伸展构造运动及其构造后续效应可延续到第四纪中更新世末期,晚更新世中期以来进入了华北克拉通破坏区最新构造运动时期,以发育陡倾角走滑断层为主.华北平原区普遍存在陡倾角走滑断层切割新生代早期铲形正断层现象(Qi and Yang, 2010),邢台地震、唐山地震等发震断层为中下地壳中向上扩展的陡倾角走滑断层(王

椿墉等,1993;徐锡伟等,2000;刘保金等,2011),加上 1900 年以来 M4 级以上地震高倾角走滑断层型震源机制(武敏捷等,2011;高彬等,2016),以及三河—平谷 8 级地震区发育高倾角走滑断层等事实,说明晚更新世中期以来在有利于发育高倾角走滑断层的区域构造应力场(NE-NEE 向最大主应力和 NNW-NW 向最小主应力)所代表的最新构造运动在华北克拉通破坏区是广泛存在的.上述结果可用来解释前人用伸展构造理论无法回答的现今板内地壳变形状态和破坏性地震发震机理等科学问题.

### 3.2 晚更新世大青山构造运动起始时间

河套断陷盆地带是鄂尔多斯块体北缘边界带的重要组成部分,广泛分布着第四纪中晚期湖相地层,它们记录了河套古大湖形成与消亡历史和可能的构造运动(程绍平等,1998;贾铁飞等,2001;李建彪等,2007;陈发虎等,2008).野外考察发现,在大青山南麓包头市东河区壕赖沟湖相地层剖面中,存在着能够反映最新构造运动信息的 2 个角度不整合面(图 4),至少证实大青山及其邻区存在着一期最新构造运动,我们称之为“大青山构造运动”.

在壕赖沟湖相地层剖面上,埋深约 2.20 m 和 6.28 m 处分别为 UC2 和 UC1 角度不整合面所在位置(图 4).UC1 角度不整合面之下(埋深为 9.45~6.28 m)为黄褐色粗砂层、中细砂层、灰白色半胶结粘土质砂层、紫红色砂砾石层和灰棕色夹钙板条带的中砂层等滨湖相沉积地层,地层倾向南至南东,倾角介于  $6.0^{\circ}\sim8.5^{\circ}$ ,明显大于上覆湖相地层;UC1 和 UC2 角度不整合面之间(埋深为 6.28~2.20 m)为黄棕色、灰绿色、灰白色、浅棕红色细砂、粘土、粉砂等呈互层状湖相地层,在 UC1 角度不整合面之上堆积了厚约 38 cm、交错层理明显的砂砾石层,最底部一层连续展布的钙(Ca)板层,一致地向南倾斜,倾角介于  $2^{\circ}\sim3^{\circ}$ (产状为  $190^{\circ}\angle2.5^{\circ}$ );UC2 角度不整合面之上(埋深为 2.20~1.15 m)为浅棕红色滨湖相含砾粉砂质粘土沉积,地层近于水平(产状为  $103^{\circ}\angle0.5^{\circ}$ ),底部含 20 cm 厚砾石层覆盖在不整合面上,顶部(埋深为 1.15~0.00 m)为浅黄棕色、褐色残坡积层、坡洪积和河流相砾石层等.

区域地层对比可知,壕赖沟剖面以湖相地层为主,夹杂一些滨湖相沉积,对应于鄂尔多斯块体北缘广泛分布的晚更新世萨拉乌苏组和城川组湖相地层(de Chardin and Licent, 1924; 苏志珠等, 1997; 李建彪等, 2007).壕赖沟剖面地层样品 ESR 系统测年表明,埋深 6.28 m 附近 UC1 角度不整合面之下为距

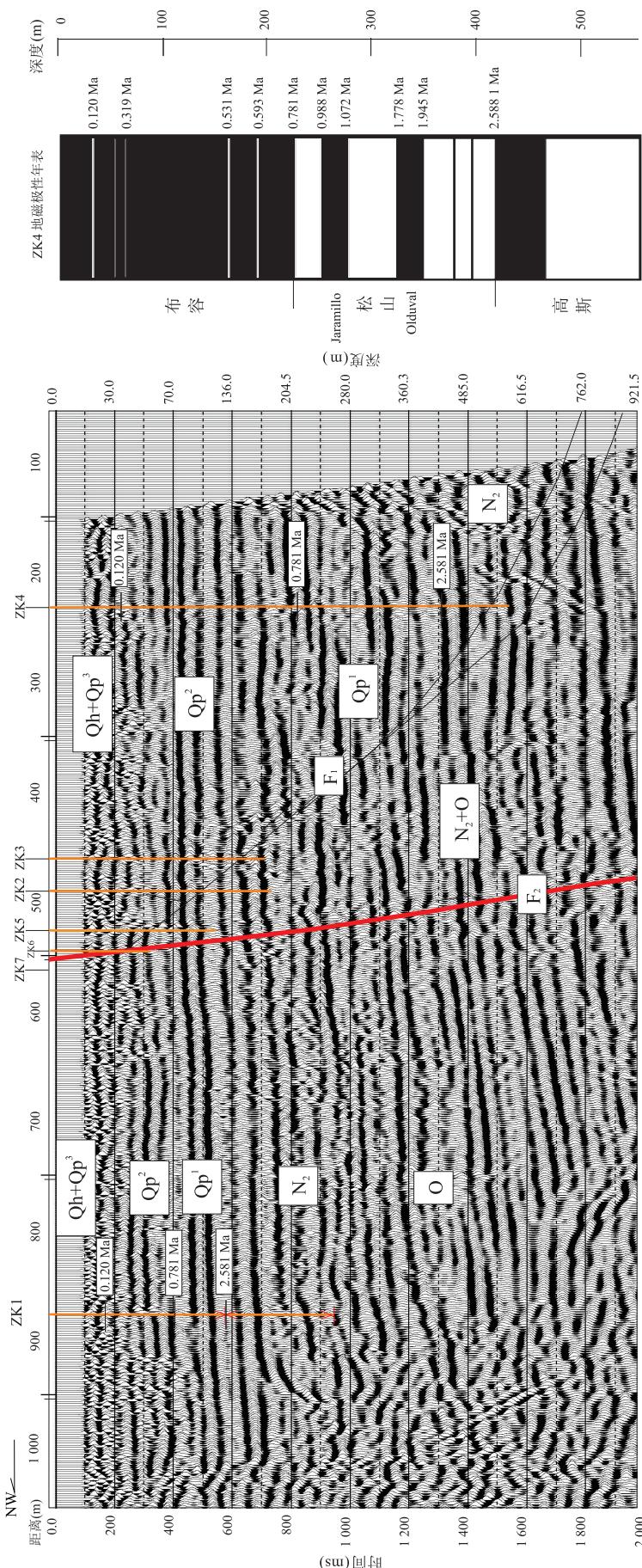


图 3 三河-平谷 M8.0 级地震区跨地震断层浅层 SH 波地震反射叠加时深解剖面  
Fig. 3 Stacked time-depth section of the shallow seismic SH wave reflection across the earthquake fault in the epicenter of the Sanhe-Pinggu M8.0 earthquake zone  
F<sub>1</sub>、夏垫铲形正断裂；F<sub>2</sub>、夏垫断裂；数字代表距离或深度(m)；Qh、奥陶纪灰岩；ZK1~ZK7、钻孔编号

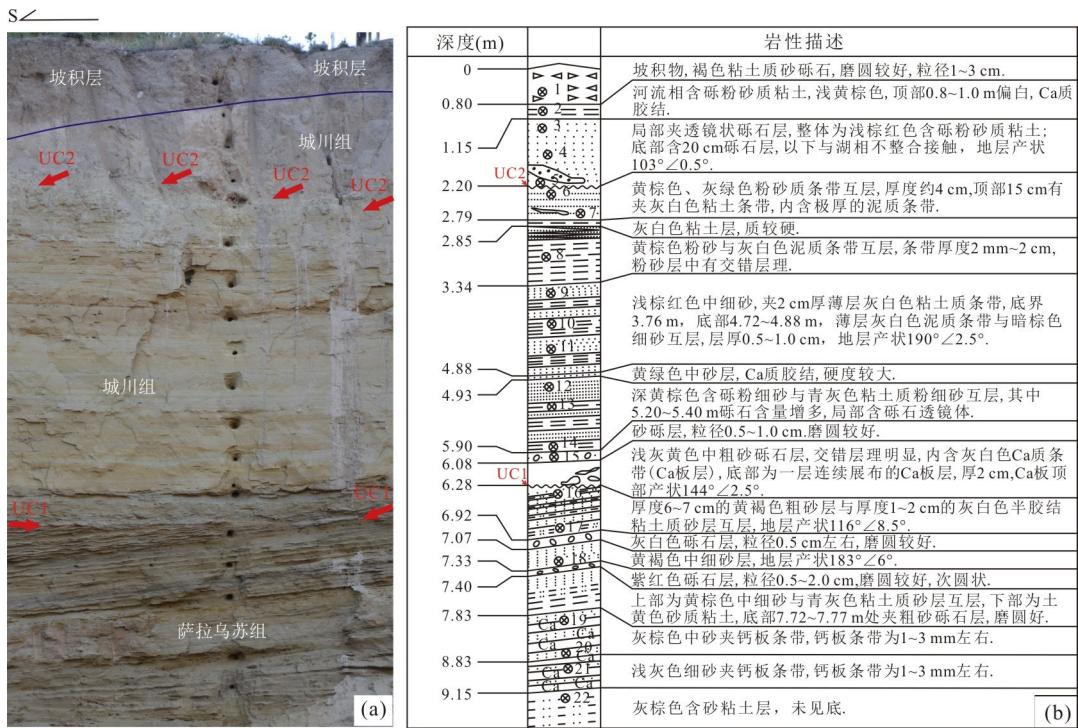


图 4 大青山南麓包头壕赖沟第四纪湖相地层剖面

Fig.4 Quaternary lacustrine-stratigraphic section at the Haolai Gully, the southern Daqingshan

a. 湖相地层剖面照片;b. 岩性柱状图与岩性分层特征;红色箭头指向角度不整合面 UC1 和 UC2 位置;柱状图中 1~22 为年代样品编号

今 79 ka 之前堆积的湖相地层,区域上对应于晚更新世萨拉乌苏组河套古大湖主体堆积地层;UC1 和 UC2 角度不整合面之间(埋深为 6.28~2.20 m)为距今 59~40 ka 期间堆积的湖相地层,区域上对应于晚更新世城川组中下段湖相堆积地层;UC2 角度不整合面之上(埋深为 2.20~1.15 m)为距今 33~28 ka 期间堆积的湖滨相地层,区域上对应于晚更新世城川组上段湖相地层。

因此,壕赖沟湖相地层剖面上,代表强烈构造运动的 2 期角度不整合面(UC1 和 UC2)分别发生在距今 80~60 ka 期间和距今 40~33 ka 期间,其中 UC1 角度不整合面发生在晚更新世中期萨拉乌苏组与城川组之间,UC2 角度不整合面发生在晚更新世晚期城川组内部,均表现为沉积地层短期缺失、上下地层产状明显差异和古大湖萎缩或消亡。值得指出的是,壕赖沟湖相地层剖面显示,除 2 期角度不整合面上下萨拉乌苏组和城川组湖相地层有产状突变外,整个剖面上所有地层均有不同程度倾斜,说明晚更新世中晚期以来的最新构造运动,即大青山构造运动具有脉动性和持续性特征,目前大青山构造运动仍在进行过程中。

### 3.3 大青山构造运动的区域性问题讨论

构造运动常常是区域性的。从河套断陷盆地带

包头市东河区壕赖沟地层剖面发现的 2 期角度不整合面代表的大青山构造运动至少在华北克拉通破坏区具有普遍性。已有的野外考察表明,河套断陷盆地带北部沿大青山南麓、狼山南麓等地均有与壕赖沟剖面相似的湖相地层和角度不整合面记录(白鸾羲, 2017);东南部托克托台地湖相地层剖面也显示厚约 2.6 m、距今约 82 ka 堆积、含钙质结核的黄土层与下伏萨拉乌苏组地层和上覆城川组地层均呈角度不整合接触(李建彪等, 2007),且黄土堆积本身反映出萨拉乌苏组与城川组之间存在沉积地层的缺失;鄂尔多斯块体南缘渭河断陷盆地带断裂活动反映出在距今 12 万年左右也存在一次强烈的断层作用,并形成角度不整合面(田勤俭等, 2003),尽管渭河断陷盆地带晚更新世构造事件在时间上有一定的差距,但可以认为壕赖沟剖面发现的晚更新世中期以来大青山构造运动并不是局部的,而是广泛分布在鄂尔多斯块体周缘地区,即大青山运动具有区域性构造运动的基本特征。另外,山西断陷盆地 NNE 向系舟山西麓断裂、霍山山前断裂、贺兰山东麓断裂、黄河断裂、罗山断裂等右旋走滑运动、NWW 向大青山山前断裂、铁炉子断裂、磁县一大名断裂、张家口—蓬莱断裂带等左旋走滑运动(徐锡伟和邓起东, 1990; Xu et al., 1993; 江娃利和张英礼, 1997; Middleton

*et al.*, 2016), 以及华北平原区一系列铲形断裂在中更新世中晚期至晚更新世早期逐步停止活动和华北平原历史大地震发震断层大部分为 NNE-NE 向和 NWW-NW 向新生走滑断层等(徐锡伟等, 2015), 可能均与大青山构造运动密切相关。因此, 大青山构造运动是华北克拉通破坏区晚更新世中期以来最新 1 期构造运动。

## 4 大青山构造运动的动力来源讨论

代表华北克拉通破坏区铲形正断层活动逐渐停止和距今 8 万年以来新生走滑断层形成且目前正在进行中的大青山构造运动, 在时间上刚好与黄河南北向晋陕峡谷河段距今 76.4 ka 宽谷阶地形成以来鄂尔多斯块体区域隆升速率从之前小于 0.23 mm/a 明显加速到大于 0.77 mm/a 相对应(程绍平等, 1998), 在时间上略晚于距今 150 ka 以来青藏高原东缘兰州盆地和中卫黑山峡附近黄河阶地反映出的“共和运动”晚更新世加速隆升时段(Li *et al.*, 1997; 陈发虎等, 2008), 说明鄂尔多斯块体加速隆升和大青山构造运动与青藏高原共和运动中后期强烈加速隆升时间段较为吻合, 反映出在共和运动期间青藏高原物质挤出过程中, 在与鄂尔多斯块体碰撞地带受阻隆升, 相当于对鄂尔多斯块体推挤作用不断加强, 可见华北克拉通破坏区, 特别是鄂尔多斯块体及其邻区距今 8 万年以来的大青山构造运动在时间上较青藏高原共和运动有延迟, 正好反映出青藏高原与鄂尔多斯块体的相互作用和鄂尔多斯块体非刚性应变响应过程。因此, 起始于晚更新世距今 80 ka 以来大青山构造运动及其相关 NEE-SWW 向最大主压应力和 NNW-SSE 向最小主压应力这一区域构造应力场形成的主要动力来源于青藏高原物质东向挤出及其对鄂尔多斯块体西南缘强烈东向推挤作用(图 1), 东部太平洋板块和菲律宾海板块向西俯冲作为一种边界约束力学条件肯定也起到了一定作用, 但作用有多大需要进一步地研究(朱日祥, 2018)。

## 5 结论

综上所述, 华北克拉通破坏区代表新生代早期地壳伸展运动的铲形正断层的活动性在上新世至第四纪早期逐渐减弱, 到第四纪中更新世或晚更新世

早期停止活动; 距今 80 ka 以来大青山构造运动为华北克拉通破坏区最新 1 期构造运动, 其相关区域构造应力场形成的主要动力来源于青藏高原物质东向挤出及其对鄂尔多斯块体西南缘东向推挤作用, 大青山构造运动主要表现为 NNE-NE 向新生右旋走滑断层和 NWW-NW 向新生左旋走滑断层的形成和扩展, 这些新认识对深化华北克拉通破坏区特大地震发震机理研究和理解板内最新变形动力学具有十分重要的学术价值。

## References

- Allmendinger, R.W., Oliver, J., Hauge, T.A., et al., 1987. Tectonic Heredity and the Layered Lower Crust in the Basin and Range Province, Western United States. *Geological Society, London, Special Publications*, 28 (1): 223 – 246. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1987.028.01.16>
- Bai, L.X., 2017. The Age of the Latest Tectonic Movement in Daqingshan and Its Influence on Tectonic Evolution of Hetao Basin (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 75 (in Chinese with English abstract).
- Cavalié, O., Lasserre, C., Doin, M.P., et al., 2008. Measurement of Interseismic Strain across the Haiyuan Fault (Gansu, China), by InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(3–4): 246 – 257. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.057>
- Chadin, T.D., Licent, F., 1924. On the Discovery of a Palaeolithic Industry in Northern China. *Bulletin of the Geological Society of China*, 3(1): 45 – 50. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.1924.mp3001005.x>
- Chao, H.T., Li, J.L., Cui, Z.W., et al., 1995. Active Faults in Tanlu (Tancheng-Lujiang) Fault Zone and the Hazards Produced by the 1668 Tancheng Earthquake ( $M=8.5$ ). *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15(3): 69 – 80 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F.H., Fan, Y.X., Madsen, D.B., et al., 2008. Preliminary Study on the Formation Mechanism of the “Jilantai-Hetao” Megalake and the Lake Evolutionary History in Hetao Region. *Quaternary Sciences*, 28(5): 866 – 873 (in Chinese with English abstract).
- Chen, G.D., 1956. Examples of “Activizing Region” in the Chinese Platform with Special Reference to the “Cathaysia” Problem. *Acta Geologica Sinica*, 30(3): 239 – 271 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W.P., Nábelek, J., 1988. Seismogenic Strike-Slip Faulting and the Development of the North China Basin. *Tectonics*, 7(5): 975 – 989. <https://doi.org/10.1029/97TC0001>

- tc007i005p00975
- Cheng, S.P., Deng, Q.D., Min, W., et al., 1998. Yellow River and Quaternary Tectonic Movements of the Ordos Plateau. *Quaternary Sciences*, (3): 238—248 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q.D., Zhang, P.Z., Ran, Y.K., et al., 2002. Basic Characteristics of Active Tectonics of China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 32(12): 1020—1030 (in Chinese).
- DePolo, C.M., Clark, D.G., Slemmons, D.B., et al., 1991. Historical Surface Faulting in the Basin and Range Province, Western North America: Implications for Fault Segmentation. *Journal of Structural Geology*, 13(2): 123—136. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(91\)90061-m](https://doi.org/10.1016/0191-8141(91)90061-m)
- Dong, S.P., Zhang, P.Z., Zheng, W.J., et al., 2018. Paleoseismological Research on the Langshan Range-Front Fault, Hetao Area, China: Insights for Studies on Tectonics and Seismic Risk. *Seismology and Geology*, 40(6): 1216—1239 (in Chinese with English abstract).
- Eaton, G.P., 1982. The Basin and Range Province: Origin and Tectonic Significance. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 10: 409—440. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.10.050182.002205>
- Feng, S.Y., Gao, R., Long, C.X., et al., 2011. The Compressive Stress Field of Yinchuan Graben: Deep Seismic Reflection Profile. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(3): 692—697 (in Chinese with English abstract).
- Gao, B., Zhou, S.Y., Jiang, C.S., 2016. Estimate of Dip Angles of Faults around Ordos Block Based on Earthquakes. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(7): 2444—2452 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Z.W., Wu, H., Li, G.T., et al., 2014. Late Quaternary Activity of the Central-North Segment of Taihang Mountain Piedmont Fault Zone. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 9(2): 159—170 (in Chinese with English abstract).
- Gong, W.B., Hu, J.M., Li, Z.H., et al., 2013. The Sediment Features of Lower Piedmont Platforms along Western Hetao Basin and Implication for Subsiding Process and Controlling Factors of “Jilantai-Hetao” Megalake. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 190—198 (in Chinese with English abstract).
- He, L.J., 2015. Thermal Regime of the North China Craton: Implications for Craton Destruction. *Earth-Science Reviews*, 140: 14—26. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.10.011>
- Hu, L.Y., Xu, X.S., Sun, S.C., 1994. Geomorphological Characteristics of the Modern Movement of the Maoshan Fault. *Jiangsu Geology*, 18(1): 3—9 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W., 1993. Morphologic Patterns of Stream Channels on the Active Yishi Fault, Southern Shandong Province, East-ern China: Implications for Repeated Great Earthquakes in the Holocene. *Tectonophysics*, 219(4): 283—304. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90179-n](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90179-n)
- Li, J.B., Ran, Y.K., Guo, W.S., et al., 2007. Division of Quaternary Beds and Environment Evolution in Hubao Basin in China. *Quaternary Sciences*, 27(4): 632—644 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.J., Fang, X.M., van der Voo, R., et al., 1997. Magnetostratigraphic Dating of River Terraces: Rapid and Intermittent Incision by the Yellow River of the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau during the Quaternary. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 102(B5): 10121—10132. <https://doi.org/10.1029/97jb00275>
- Li, K., Xu, X.W., Jiang, G.Y., et al., 2016. Evidence of Southward Extend of the 1668 Tancheng Earthquake Surface Rupture from Trench Profiles. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 11(2): 199—206 (in Chinese with English abstract).
- Li, T., Wang, Z.X., 2009. Tectonic Division of the Upper Crust of the North China Block. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 215—224 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.N., Zhang, P.Z., Zheng, W.J., et al., 2018. Kinematics of Late Quaternary Slip along the Qishan-Mazhao Fault: Implications for Tectonic Deformation on the Southwestern Ordos, China. *Tectonics*, 37(9): 2983—3000. <https://doi.org/10.1029/2018tc005043>
- Liu, B.J., Zhang, X.K., Chen, Y., et al., 2011. Research on Crustal Structure and Active Fault in the Sanhe-Pinggu Earthquake (M8.0) Zone Based on Single-Fold Deep Seismic Reflection and Shallow Seismic Reflection Profiling. *Chinese J. Geophys.*, 54(5): 1251—1259 (in Chinese with English abstract).
- Jia, T.F., Yin, S., Zhao, M., et al., 2001. A Study on the Lake Deposits on the Tuoketuo Section of Yellow River in the Early and Middle Stage of Pleistocene. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 30(1): 74—78 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Q.S., Jiang, W.L., Zhang, J.F., et al., 2016. Identification of Paleoearthquakes Based on Geomorphological Evidence and Their Tectonic Implications for the Southern Part of the Active Anqiu-Juxian Fault, Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 132: 1—8. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.10.012>
- Jiang, W.L., Zhang, Y.L., 1997. Characteristics of NW Trending Surface Fractures of Strong Earthquakes and Activity of the Holocene Faults of the Boundary of North China Plain. *Earthquake Research in China*, 13(3): 263—270 (in Chinese with English abstract).

- Ma, X. Y., 1982. On Extensional Tectonics. *Earth Science*, 7(3):15—22 (in Chinese with English abstract).
- Ma, X.Y., Liu, H.F., Wang, W.X., et al., 1983. Meso-Cenozoic Taphrogeny and Extensional Tectonics in Eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 22—32 (in Chinese with English abstract).
- Menzies, M., Xu, Y.G., 1998. Geodynamics of the North China Craton. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lee, T. Y., eds., Mantle Dynamics and Plate Interations in East Asian. *Amer. Geophys. Union, Washington D.C., Geodyn. Ser.*, 27:155—165.
- Middleton, T.A., Walker, R. T., Rood, D. H., et al., 2016. The Tectonics of the Western Ordos Plateau, Ningxia, China: Slip Rates on the Luoshan and East Helanshan Faults. *Tectonics*, 35(11):2754—2777. <https://doi.org/10.1002/2016tc004230>
- Qi, J.F., Yang, Q., 2010. Cenozoic Structural Deformation and Dynamic Processes of the Bohai Bay Basin Province, China. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4): 757—771. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.08.012>
- Ren, J. Y., Tamaki, K., Li, S. T., et al., 2002. Late Mesozoic and Cenozoic Rifting and Its Dynamic Setting in Eastern China and Adjacent Areas. *Tectonophysics*, 344(3—4):175—205. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(01\)00271-2](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(01)00271-2)
- Si, S.P., Li, Y.L., Lü, S.H., et al., 2014. Holocene Slip Rate and Paleoearthquake Records of the Salt Lake Segment of the Northern Zhongtiaoshan Fault, Shanxi Province. *Science China Earth Sciences*, 57(9): 2079—2088. <https://doi.org/10.1007/s11430-014-4887-3>
- Su, Z.Z., Dong, G.R., Jin, H.L., 1997. A Geochronological Study of the Salawusu Strata in North China. *Journal of Geomechanics*, 3(4):90—96 (in Chinese with English abstract).
- Suo, Y.H., Li, S.Z., Liu, X., et al., 2013. Structural Characteristics of NWW-Trending Active Fault Zones in East China: A Case Study of the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 953—966 (in Chinese with English abstract).
- Suter, M., 2002. Active Tectonics of Northeastern Sonora, Mexico (Southern Basin and Range Province) and the 3 May 1887 Mw 7.4 Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(2): 581—589. <https://doi.org/10.1785/0120000220>
- de Chardin, P.T., Licent, E., 1924. On the Discovery of a Paleolithic Industry in Northern China. *Bulletin of the Geological Society of China*, 3(1):45—50.
- Tian, Q.J., Shen, X.H., Feng, X.J., et al., 2003. Primary Study on Quaternary Tectonic Events Based on Variation of Fault Activity in Weihe Basin. *Seismology and Geology*, 25(1): 146—154 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T.F., 1994. Tectonic Event and Stress Field of Quaternary in China. *Quaternary Sciences*, 14(1): 48—55 (in Chinese with English abstract).
- Wan, T.F., Cao, R.P., 1992. Mesozoic-Early Pleistocene Tectonic Events and Stress Fields in China. *Geoscience*, 6(3):275—284 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C.Y., Wang, G.M., Lin, Z.Y., et al., 1993. A Study on Fine Crustal Structure in Xingtai Earthquake Area Based on Deep Seismic Reflection Profiling. *Chinese Journal of Geophysics*, 36(4):445—452 (in Chinese with English abstract).
- Wernicke, B., Axen, G.J., 1988. On the Role of Isostasy in the Evolution of Normal Fault Systems. *Geology*, 16(9): 848—851. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016<0848:otroii>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016<0848:otroii>2.3.co;2)
- Wu, F., Lin, J.Q., Wilde, S.A., et al., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233(1—2):103—119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>
- Wu, F. Y., Xu, Y. G., Gao, S., et al., 2008. Lithospheric Thinning and Destruction of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6):1145—1174 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M.J., Lin, X.D., Xu, P., 2011. Analysis of Focal Mechanism and Tectonic Stress Field Features in Northern Part of North China. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31(5):39—43 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, H.F., Wang, X.C., Guo, S.M., et al., 2000. Integrated Survey and Investigation on the Quaternary Activity of the Liaocheng-Lankao Buried Fault. *Seismology and Geology*, 22(4):351—359 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Gao, Z. W., Song, C. Q., et al., 2000. The Structural Characters of the Piedmont Fault Zone of Taihang Mountain. *Seismology and Geology*, 22(2): 111—122 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Niu, L.F., Wang, C.H., et al., 1996. Tangshan-Hejian-Cixian Newly-Generated Seismotectonic Zone. *Seismology and Geology*, 18(3):193—198 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Song, C.Q., Chu, Q.Z., 1998. Preliminary Study on the Seismotectonic Characters of the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone. *Seismology and Geology*, 20(2): 146—154 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.W., Cheng, G.L., Ma, X.Y., et al., 1994. Rotation Model and Dynamics of Blocks in North China and Its Adjacent Areas. *Earth Science*, 19(2):129—138 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.W., Deng, Q.D., 1990. The Features of Late Quaternary Activity of the Piedmont Fault of Mt. Huoshan, Shanxi Province and 1303 Hongdong Earthquake ( $M_s=8$ ). *Seismology and Geology*, 12(1):21—30 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract).
- Xu, X.W., Deng, Q.D., 1996. Nonlinear Characteristics of Paleoseismicity in China. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 101(B3): 6209—6231. <https://doi.org/10.1029/95jb01238>
- Xu, X.W., Ma, X.Y., 1992. Geodynamics of the Shanxi Rift System, China. *Tectonophysics*, 208(1—3): 325—340. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90353-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90353-8)
- Xu, X.W., Ma, X.Y., Deng, Q.D., 1993. Neotectonic Activity along the Shanxi Rift System, China. *Tectonophysics*, 219(4): 305—325. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90180-r](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90180-r)
- Xu, X.W., Wen, X.Z., Zheng, R.Z., et al., 2003. Pattern of Latest Tectonic Motion and Its Dynamics for Active Blocks in Sichuan-Yunnan Region, China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 33(S1): 210—226.
- Xu, X.W., Wu, W.M., Zhang, X.K., et al., 2002. Latest Crustal Tectonic Movement and Related Earthquakes in the Capital Region, China. Seismological Press, Beijing, 376 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.W., Yu, G.H., Ran, Y.K., et al., 2015. Introduction to Fault Activity in the Urban Region, China—Results from Active Fault's Survey and Detection in 20 Cities. Seismological Press, Beijing, 484 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X.W., Yu, G.H., Wang, F., et al., 2000. Seismogenic Model for the 1966 Xingtai Earthquakes—Nucleation of New-Born Fault or Strick-Slip of Pre-Existing Fault?. *Earthquake Research in China*, 16(4): 364—378 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.B., Liu, B.J., Ji, J.F., et al., 2019. Imaging for Shallow Velocity Structure and Buried Faults in the Southern Margin of Taihang Mountains. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 39(1): 88—92 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.H., Yan, M., Zhao, Z.H., 1983. Evalution of the Direction of Tectonic Stress in North China from Recorded Data of a Large Number of Small Earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 5(3): 268—279 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Wang, L.S., Zhong, K., et al., 2007. Research on the Segmentation of Tancheng-Lujiang Fault Zone. *Geological Review*, 53(5): 586—591 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P.Z., Deng, Q.D., Zhang, G.M., et al., 2003. Active Tectonic Blocks and Strong Earthquakes in Continent of China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 33 (Suppl.): 12—20 (in Chinese).
- Zhang, P.Z., Wang, Q., Ma, Z.J., 2002. Present-Day Velocity Field of the Continent of China and Active Blocks. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 430—441 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.Y., Zhang, K., Zhao, Y.G., et al., 1983. The Mesozoic and Cenozoic Geotectonic Characteristics and Dynamical Model of the Lithosphere in North China Fault Block Region. *Acta Geologica Sinica*, 57(1): 33—42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X.C., 1991. Fissures and Its Characteristics of Heze Earthquake M7.0 in 1937. *Crustal Deformation and Earthquake*, 11(1): 93—96 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.X., 2018. Review of the Achievements of Major Research Plan on “Destruction of North China Craton”. *China Science Foundation*, 3: 282—290 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R.X., Chen, L., Wu, F.Y., et al., 2011. Timing, Scale and Mechanism of the Destruction of the North China Craton. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 41(5): 583—592 (in Chinese).
- Zhu, R.X., Xu, Y.G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 42(8): 1135—1159 (in Chinese).
- Zhu, R.X., Zheng, T.Y., 2009. Destruction Geodynamics of the North China Craton and Its Paleoproterozoic Plate Tectonics. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 1950—1961 (in Chinese).
- Zoback, M.L., 1989. State of Stress and Modern Deformation of the Northern Basin and Range Province. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 94(B6): 7105—7128. <https://doi.org/10.1029/jb094ib06p07105>
- ## 附中文参考文献
- 白鸾羲, 2017. 大青山最新构造运动的时代厘定及其对河套盆地构造演化影响(硕士学位论文). 北京: 中国地震局地质研究所, 75.
- 晁洪太, 李家灵, 崔昭文, 等, 1995. 郯庐活断层与 1668 年郯城 8.5 级地震灾害. *海洋地质与第四纪地质*, 15(3): 69—80.
- 陈发虎, 范育新, Madsen, D.B., 等, 2008. 河套地区新生代湖泊演化与“吉兰泰—河套”古大湖形成机制的初步研究. *第四纪研究*, 28(5): 866—873.
- 陈国达, 1956. 中国地台“活化区”的实例并着重讨论“华夏古陆”问题. *地质学报*, 30(3): 239—271.
- 程绍平, 邓起东, 闵伟, 等, 1998. 黄河晋陕峡谷河流阶地和鄂尔多斯高原第四纪构造运动. *第四纪研究*, (3): 238—248.
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 等, 2002. 中国活动构造基本特征. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 32(12): 1020—1030.
- 董绍鹏, 张培震, 郑文俊, 等, 2018. 河套地区狼山山前断裂的古地震研究——构造及地震危险性启示. *地震地质*, 40(6): 1216—1239.
- 酆少英, 高锐, 龙长兴, 等, 2011. 银川地堑地壳挤压应力场: 深地震反射剖面. *地球物理学报*, 54(3): 692—697.
- 高彬, 周仕勇, 蒋长胜, 2016. 基于地震活动性资料估计鄂尔

- 多斯块体周缘构造断层面倾角. 地球物理学报, 59(7): 2444—2452.
- 高战武, 吴昊, 李光涛, 等, 2014. 太行山山前断裂带中北段晚第四纪活动性研究. 震灾防御技术, 9(2): 159—170.
- 公王斌, 胡健民, 李振宏, 等, 2013. 河套盆地西缘山前低台地沉积特征对“吉兰泰—河套”古湖消退过程及其控制因素的指示意义. 地学前缘, 20(4): 190—198.
- 胡连英, 徐学思, 孙寿成, 1994. 茅山东侧断裂现代运动的地貌学特征. 江苏地质, 18(1): 3—9.
- 李建彪, 冉勇康, 郭文生, 2007. 呼包盆地第四纪地层与环境演化. 第四纪研究, 27(4): 632—644.
- 李康, 徐锡伟, 江国焰, 等, 2016. 基于探槽剖面证据探讨年郯城地震地表破裂南延问题. 震灾防御技术, 11(2): 199—206.
- 李涛, 王宗秀, 2009. 华北上地壳构造单元划分. 地学前缘, 16(4): 215—224.
- 刘保金, 张先康, 陈颤, 等, 2011. 三河—平谷 8.0 级地震区地壳结构和活动断裂研究——利用单次覆盖深反射和浅层地震剖面. 地球物理学报, 54(5): 1251—1259.
- 贾铁飞, 银山, 赵明, 等, 2001. 黄河托克托段早中更新世湖相地层剖面的建立及其意义. 内蒙古师大学报(自然科学汉文版), 30(1): 74—78.
- 江娃利, 张英礼, 1997. 华北平原周边北西向强震地表地震断层及全新世断裂活动特征. 中国地震, 13(3): 263—270.
- 马杏垣, 1982. 论伸展构造. 地球科学, 7(3): 15—22.
- 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等, 1983. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造. 地质学报, 57(1): 22—32.
- 苏志珠, 董光荣, 靳鹤龄, 1997. 萨拉乌苏组地层年代学研究. 地质力学学报, 3(4): 90—96.
- 索艳慧, 李三忠, 刘鑫, 等, 2013. 中国东部 NWW 向活动断裂带构造特征: 以张家口—蓬莱断裂带为例. 岩石学报, 29(3): 953—966.
- 田勤俭, 申旭辉, 冯希杰, 等, 2003. 渭河盆地断层活动反映的第四纪构造事件初步研究. 地震地质, 25(1): 146—154.
- 万天丰, 1994. 中国第四纪的构造事件与应力场. 第四纪研究, 14(1): 48—55.
- 万天丰, 曹瑞萍, 1992. 中国中始新世—早更新世构造事件与应力场. 现代地质, 6(3): 275—284.
- 王椿镛, 王贵美, 林中洋, 等, 1993. 用深地震反射方法研究邢台地震区地壳细结构. 地球物理学报, 36(4): 445—452.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等, 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论. 岩石学报, 24(6): 1145—1174.
- 武敏捷, 林向东, 徐平, 2011. 华北北部地区震源机制解及构造应力场特征分析. 大地测量与地球动力学, 31(5): 39—43.
- 向宏发, 王学潮, 虢顺民, 等, 2000. 聊城—兰考隐伏断裂第四纪活动性的综合探测研究. 地震地质, 22(4): 351—359.
- 徐杰, 高战武, 宋长青, 等, 2000. 太行山山前断裂带的构造特征. 地震地质, 22(2): 111—122.
- 徐杰, 牛变芳, 王春华, 等, 1996. 唐山—河间—磁县新生地震构造带. 地震地质, 18(3): 193—198.
- 徐杰, 宋长青, 楚全芝, 1998. 张家口—蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨. 地震地质, 20(2): 146—154.
- 徐锡伟, 程国良, 马杏垣, 等, 1994. 华北及其邻区块体转动模式和动力来源. 地球科学, 19(2): 129—138.
- 徐锡伟, 邓起东, 1990. 山西霍山山前断裂晚第四纪活动特征和 1303 年洪洞 8 级地震. 地震地质, 12(1): 21—30.
- 徐锡伟, 吴卫民, 张先康, 等, 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震. 北京: 科学出版社, 376.
- 徐锡伟, 于贵华, 冉勇康, 等, 2015. 中国城市活动断层概论——20 个城市活动断层探测成果. 北京: 地震出版社, 484.
- 徐锡伟, 于贵华, 王峰, 等, 2000. 1966 年邢台地震群的发震构造模型——新生断层形成? 先存活断层摩擦粘滑? 中国地震, 16(4): 364—378.
- 徐增波, 刘保金, 姬计法, 等, 2019. 太行山南端浅层速度结构成像和隐伏断裂探测. 大地测量与地球动力学, 39(1): 88—92.
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和, 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向. 地震学报, 5(3): 268—279.
- 张鹏, 王良书, 钟锵, 等, 2007. 郑庐断裂带的分段性研究. 地质论评, 53(5): 586—591.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D辑: 地球科学), 33(S1): 12—20.
- 张培震, 王琪, 马宗晋, 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, 9(2): 430—441.
- 张文佑, 张抗, 赵永贵, 等, 1983. 华北断块区中、新生代地质构造特征及岩石圈动力学模型. 地质学报, 57(1): 33—42.
- 赵宪超, 1991. 1937 年菏泽 7.0 级地震的地裂缝特征. 地壳形变与地震, 11(1): 93—96.
- 朱日祥, 2018. “华北克拉通破坏”重大研究计划结题综述. 中国科学基金, 3: 282—290.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制. 中国科学(D辑: 地球科学), 41(5): 583—592.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等, 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学(D辑: 地球科学), 42(8): 1135—1159.
- 朱日祥, 郑天渝, 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系. 科学通报, 54(14): 1950—1961.