

# 鲁西隆起晚中生代以来伸展断裂特征及形成机制

胡秋媛 李 理 唐智博 时秀朋

(中国石油大学(华东)地球资源与信息学院,山东 东营 257061)

**摘要:**野外地质调查表明,鲁西隆起的伸展断裂十分发育,其构造样式复杂,主要形式为陡倾斜的伸展断裂和缓倾斜的滑脱断层组成的复合伸展断裂系统。陡倾斜的伸展断裂构成鲁西伸展断裂系的主体,是控制其南部凹陷沉积的边界断裂。断裂带中构造角砾岩、断层泥发育,并有小褶皱、擦痕等显示断裂活动的标志。缓倾斜的滑脱断层在鲁西隆起区广泛发育,分为深、浅两个层次,浅层次中最具规模的位于下寒武统与太古宇之间。滑脱面上盘的寒武系底部产生强烈的构造变形,褶皱和破碎带发育,下盘构造相对简单,仅挤压破碎。深层次滑脱断层发育在中地壳低速层处,控制着浅层次滑脱断层的形成与分布。构造应力场数值模拟结果显示,鲁西隆起的伸展断裂系统是由晚中生代以来两次大规模的伸展运动形成的,形成机制上,与中、新生代郯庐断裂的走滑活动、太平洋板块的俯冲以及岩浆上涌密切相关。

**关键词:**伸展断裂;晚中生代;形成机制;鲁西隆起;数值模拟

**中图分类号:**P548      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-3657(2009)06-1233-12

鲁西隆起是一个相对独立的断块,20 世纪 90 年代以来,前人对鲁西隆起的性质、组成、构造样式和岩浆活动等做了大量的野外地质调查和综合分析,并在此基础上取得了重要认识。燕守勋等<sup>[1]</sup>将鲁西隆起中、新生代的复合伸展构造系统划分为伸展断层、调整断层和滑脱断层,认为其伸展运动与幔源岩浆活动有着密切的成生联系。牛树银等<sup>[2]</sup>依据鲁西区域地层的环状分布,断裂构造的展布形式以及幔源岩浆活动与区域岩石学、岩石化学、同位素地质学等方面的详细研究,提出鲁西断裂活动是地幔柱和岩石圈层伸展的综合结果。李三忠等<sup>[3]</sup>研究表明,鲁西地区中生代早—中期主要为挤压构造,其中印支期为近东西走向的宽缓—紧闭褶皱及逆冲构造,燕山中期为北北东或南北走向的一系列高角度陡倾逆冲断层,成为本区晚中生代以来伸展断裂的基础。吕朋菊等<sup>[4]</sup>对鲁西泰山周围及肥城、莱芜等地的研究首先发现寒武系与泰山群不整合面上存在着滑脱构造,其后研究表明鲁西隆起沿寒武系/太古宇不整

合面发生的滑脱断层主要在泰山—鲁山—沂山以北发育<sup>[1,5]</sup>。李理等<sup>[6]</sup>对鲁西地区沿寒武系/太古宇不整合面滑脱构造的特征、滑动方向和时间等进行了详细研究,并将其形成归因于华北东部晚中生代的构造变革。

前人对鲁西隆起的地质研究程度颇高,但对于该区晚中生代以来伸展断裂系统的形成演化机制,尚缺少实际变形方面的支持。本文在前人工作的基础上,结合野外地质工作,总结并论述了鲁西隆起晚中生代以来伸展断裂系统的组成和特征,并在此基础上通过构造应力场数值模拟方法探讨了该区晚中生代以来伸展断裂系统的形成演化机制,为该区的研究提供了实际变形的支持,对进一步深入理解鲁西隆起的地质特征及构造演化,具有重要的理论和实践意义。

## 1 区域地质概况

鲁西隆起位于华北板块的东南部,东、西分别以

NNE 向的郟庐断裂带和聊城—兰考断裂带为界,北抵齐河—广饶断裂,与济阳拗陷毗邻,南达丰沛断裂,总体形态呈不规则的圆弧形(图 1)。鲁西隆起区现存构造形迹以 NW—NNW 向伸展断裂为主,并控制着分布其间的中、新生代沉积。

鲁西隆起属于华北板块的一部分,具有典型的华北型地层,由前寒武系结晶基底和其上的沉积盖层组成。基底主要由太古宇泰山岩群、TTG 岩系和古元古代造山花岗岩岩体组成,而盖层则由新元古界、古生界、中生界和新生界组成。

新元古界青白口系、南华系和震旦系土门群为海相碎屑岩,仅在鲁西隆起南部和郟庐断裂带附近有所分布 [7]。古生界仅有寒武系、中—下奥陶统、中—上石炭统和二叠系,缺失上奥陶统、志留系、泥盆系和下石炭统。同整个华北板块一样,鲁西隆起的地壳运动在古生代主要表现为整体升降,晚奥陶世至早石炭世,鲁西隆起区整体抬升遭受了 140 Ma 的风化剥蚀,从而造成了奥陶系和石炭系之间的平行不整合。中生界为下侏罗统—下白垩统火山碎屑岩和碎屑岩,发育三台组、止凤庄组、水南组、城山后组、马连坡组和八亩地组。三叠纪,印支运动南北向的挤

压作用主要产生了近北西向的宽缓褶皱及逆冲断裂,并使本区剥蚀了厚达 2000 m 的下、中三叠统<sup>⑧</sup>。燕山中期,近 NW—SE 向的挤压使本区形成了 NE 走向的紧闭—宽缓褶皱和强烈的逆冲推覆。至燕山晚期,开始形成了一系列冲断—走滑带,并控制了一系列张扭、箕状盆地<sup>⑨</sup>。新生界包括古近系和第四系,主要以湖相碎屑岩为主,包括始新世常路组、朱家沟组。古近纪和新近纪,鲁西隆起区发生过较为明显的构造运动,从而造成了古近系和第四系之间的不整合。基底和沉积盖层之间的角度不整合,即古生界与太古宇之间角度不整合面是全区重要的不整合,该不整合面较前述几个不整合面分布更为广泛,总体走向 NW—SE,倾向北,倾角较缓。上述一系列不整合面,为本区滑脱断层的发育提供了滑脱面。

本区沉积盖层中断裂构造十分发育,是在晚侏罗世之前的区域地质构造背景上形成的,在先期 NEE 与 NW 两组压性、压扭性结构面基础上发育一系列陡倾斜的伸展断裂,自北向南依次为泰山—铜冶店断裂、新泰—垛庄断裂、蒙山断裂、汶泗断裂、甘霖断裂和尼山断裂(图 1),多为本区凸起与凹陷之间的边界断裂。上述陡倾斜伸展断裂的上升盘构

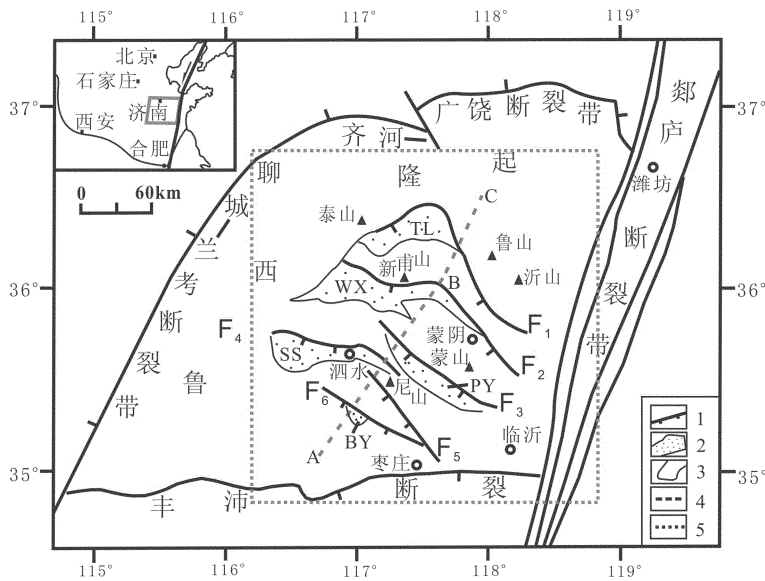


图 1 鲁西隆起区域构造位置与断裂分布

1—正断层;2—凹陷区;3—断陷区;4—剖面位置;5—野外踏勘区;F<sub>1</sub>—泰山—铜冶店断裂;F<sub>2</sub>—新泰—垛庄断裂;F<sub>3</sub>—蒙山断裂;F<sub>4</sub>—汶泗断裂;F<sub>5</sub>—甘霖断裂;F<sub>6</sub>—尼山断裂;TL—泰莱凹陷;WX—汶新凹陷;SS—泗水凹陷;PY—平邑凹陷;BY—白彦凹陷

Fig.1 Regional tectonic location and fault distribution of West Shandong Uplift

1—Normal fault; 2—Depression; 3—Fault depression; 4—Section location; 5—Field reconnaissance area; F<sub>1</sub>—Taishan—Tongyedian fault; F<sub>2</sub>—Xintai—Duozhuang fault; F<sub>3</sub>—Mengshan fault; F<sub>4</sub>—Wensi fault; F<sub>5</sub>—Ganlin fault; F<sub>6</sub>—Nishan fault; TL—Tailai sag; WX—Wenxin sag; SS—Sishui sag; PY—Pingyi sag; BY—Baiyan sag

成由北向南的四座山脉:泰山—鲁山—沂山、徂莱山—新甫山—孟良崮、蒙山、以及尼山—母子山(图 1),其由太古宇和古生界组成,总体为单斜山,呈向北凸出的弧形,之上的寒武—奥陶系自东向西倾向由北东向转为北西向,倾角多为几度到十几度,局部达 30°左右。山脉之间为长条状向北凸出的弧形凹陷,自北向南依次为泰莱凹陷、汶新凹陷、泗水凹陷、平邑凹陷和白彦凹陷(图 1),均为北断南超的单断箕状凹陷,北界为南倾正断层,南界为较缓的斜坡,与其南侧的单断山呈超覆接触<sup>[9]</sup>。

## 2 伸展断裂特征

鲁西隆起断裂构造非常发育,其伸展断裂系统主要是由陡倾斜的伸展断裂和缓倾斜的滑脱断层组成。平面上多组断裂、剖面上多层软弱面使本区呈现出复杂的形态与特点。

### 2.1 陡倾斜伸展断裂特征

鲁西隆起的断裂构造以 NW—NNW 向为主,近东西向和北东向断裂为辅。断裂将整个鲁西隆起区切割成条块状,形成了醒目的“块断”构造格局。发育在沉积盖层中最明显的构造为 NW 向脆性断裂系,即前述的陡倾斜伸展断裂,与部分北东向断裂共同组成了本区典型的“弧形构造”(图 1),将鲁西隆起晚中生代以来地层分割成“北断南超”的半地堑构造型式。与本区其他方向的断裂相比,北西向伸展断裂在平面上延伸较远,连续分布。

野外对鲁西隆起区 6 条陡倾斜伸展断裂进行了实地考察,自北向南依次为泰山—铜冶店断裂、新泰—垛庄断裂、蒙山断裂、汶泗断裂、甘霖断裂和尼山断裂,其中主要选取了 16 个观测点(图 2)。

#### (1) 泰山—铜冶店断裂

沿 NW330°方向延伸,倾向 SW,倾角 65°~80°,在莱芜县北东东方向约 10 km 鹏山(36°17′ 33″ N, 117°43′ 6″ E)地区,断裂产状为 246°∠79°。其中上盘为古生界寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系,中生界和新生界古近系。中生界包括三台组、止凤庄组、水南组、城山后组、马连坡组和八亩地组,古近系包括常路组和朱家沟组,为一套棕红色砾岩和泥岩,靠近断裂的地层明显增厚,下盘为浅黄色的太古宇花岗质片麻岩。断裂带宽约 10 m,其中发育构造岩,由断层泥和硅化的花岗片麻岩组成(图 3-a)。在新泰市南东东向约 20 km 上温村(35°52′ 15″ N, 117°58′

29″ E)处,可追踪到泰山—铜冶店断裂的东南段,在断裂面上可见右行擦痕,产状为 285°∠25°(图 3-b)。

#### (2) 新泰—垛庄断裂

沿 NW320°方向延伸,倾向 SW,倾角 50°~70°,为新甫山凸起与汶新凹陷的边界断裂。断裂上盘发育古生界寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系,以及中生界和新生界。其中中生界包括三台组、止凤庄组、水南组、城山后组、马连坡组和八亩地组,古近系包括常路组和朱家沟组,下盘为太古宇。在新泰市南东方向约 13 km 的凤凰山(35°48′ 26″ N, 117°53′ 31″ E),断裂产状为 310°∠17°,断裂带中断层角砾岩发育,角砾成分为片麻岩、闪长玢岩、斜长角闪岩等,角砾呈棱角—次棱角状。靠近下盘一侧发育紫红色的断层泥(图 3-c),此外,断裂带中还可可见寒武—奥陶系岩片,硅化、高岭土化蚀变。

#### (3) 蒙山断裂

沿 NW300°方向延伸,倾向 SW,倾角 50°~60°,为蒙山凸起与平邑凹陷的边界断裂。断裂上盘发育古生界寒武系、奥陶系,及中生界和新生界古近系,其中中生界包括三台组、止凤庄组、水南组、城山后组、马连坡组和八亩地组,古近系包括常路组和朱家沟组,靠近断裂地层明显增厚,下盘为太古宇。在新泰市南西方向约 30 km 的放城(35°41′ 13″ N, 117°36′ 29″ E),可见断裂下盘出露的太古宇,太古宇中广泛发育 320°方向的片麻理(图 3-d)。

#### (4) 汶泗断裂

走向 NW320°,倾向 230°,倾角 58°~60°,为蒙山凸起与泗水凹陷的边界断裂。断裂上盘发育古生界寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系,及中生界和新生界古近系,其中中生界包括三台组、止凤庄组、水南组、城山后组、马连坡组和八亩地组,古近系包括常路组和朱家沟组;下盘为太古宇花岗质片麻岩,片麻理产状为 240°∠30°。沿着北西向断裂追踪,在泗水县华村(35°41′ 43″ N, 117°29′ 7″ E)附近见断裂带中发育断层角砾岩(图 3-e),其原岩为灰岩。

#### (5) 甘霖断裂

沿 NW320°~330°方向发育,倾向 SW,倾角 70°~80°,上盘为新太古代—元古宙中酸性岩浆岩及寒武系、奥陶系,下盘为新太古代—元古宙中酸性岩浆岩。在新泰市北北东方向约 15 km 的凤凰山(35°33′ 11″ N, 117°25′ 9″ E),可见宽 40 m 左右的破碎带,带内发育断层泥和断层角砾岩(图 3-f,g)。



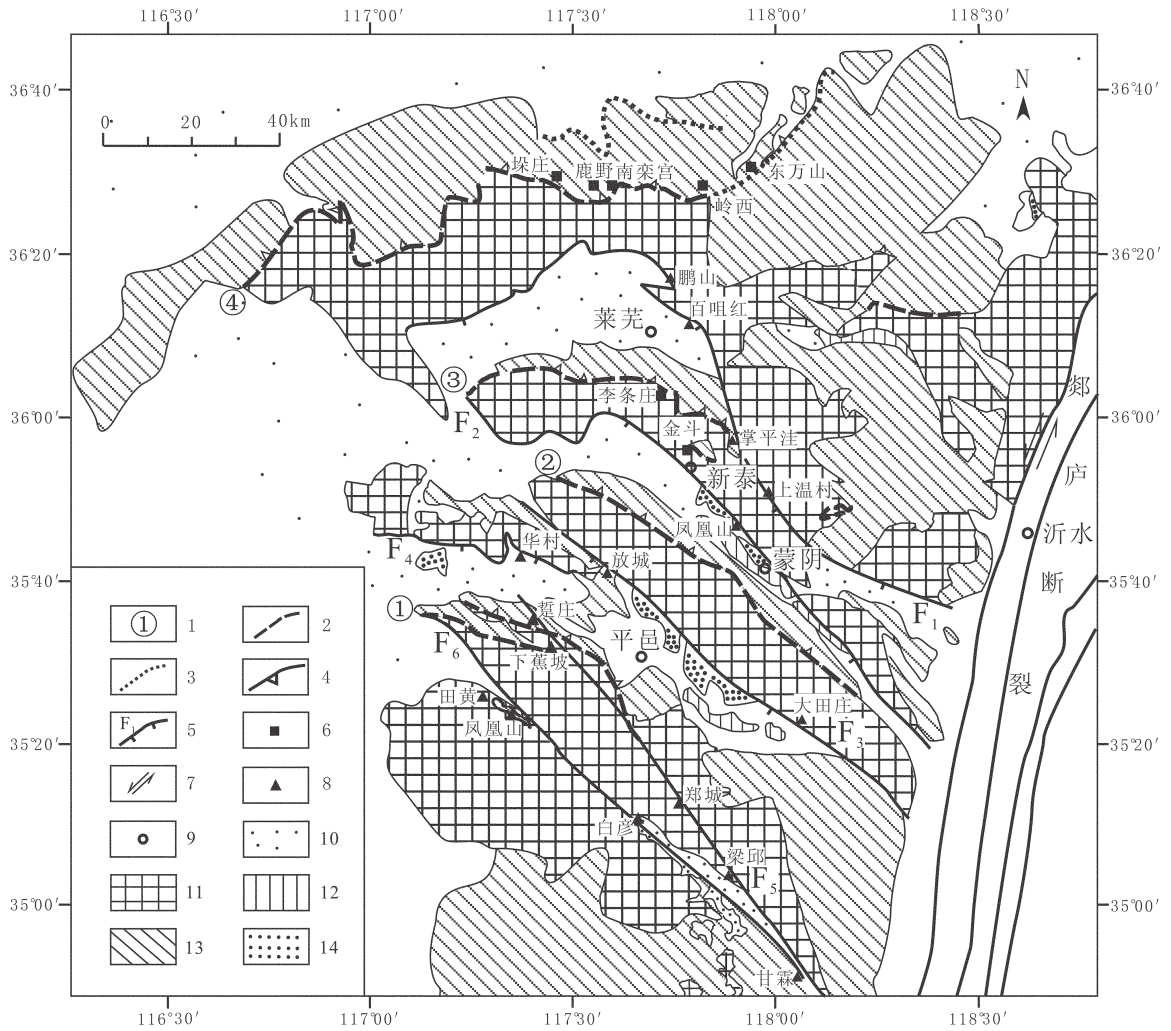


图2 鲁西隆起伸展断裂观测点分布图(区域位置见图1)

1—滑脱带编号;2—古生界/太古宇滑脱面;3—下古生界/上古生界滑脱面;4—滑脱方向;5—半地堑边界断层(编号同图1);6—滑脱断层观测点;7—走滑断层;8—陡倾伸展断裂观测点;9—主要城市;10—现代沉积;11—太古宇;12—白垩系;13—古生界;14—古近系

Fig.2 Distribution of observation points for extensional faults in West Shandong Uplift (regional location as for Fig. 1)

1—Serial number of décollement zone; 2—Décollement surface between Cambrian and Archean; 3—Décollement surface between Lower Paleozoic and Upper Paleozoic; 4—Slip direction; 5—Boundary fault of semi-graben (serial number as for Fig. 1); 6—Observation point of décollement faults; 7—Strike-slip faults; 8—Observation points of high-angle extensional faults; 9—Main city; 10—Modern sediments; 11—Archean; 12—Cretaceous; 13—Paleozoic; 14—Paleogene

(6) 尼山断裂

沿 NW300°~320°方向延伸, 倾向 225°, 倾角 80°, 断裂上盘发育太古宇、古生界及新生界, 新生界包括常路组和朱家沟组, 下盘为太古宇。断裂带宽约 20 m, 发育断层角砾岩和断层泥。野外追踪发现, 断裂下盘太古宇中节理非常发育, 平邑县南西方向 30 km 等驾庄(35°27' 37" N, 117°16' 52" E)处发育走向 120°的两期节理, 产状分别为 220°∠37°和 30°∠75°(图 3-h)。

结合上述资料分析可知, 鲁西隆起陡倾斜的伸展断裂平面上沿 NW—NNW 方向延伸, 断裂面大多向南或南西倾, 倾角一般为 60°~70°, 地表出露陡处可达 70°以上(图 4)。这些北西向伸展正断裂是控制其南侧凹陷的边界断层, 制约着本区中上侏罗统三台组, 下白垩统止凤庄组、水南组、城山后组、马连坡组和八亩地组, 以及古近系常路组、朱家沟组的沉积。靠近断裂处地层的增厚, 是受断裂活动控制的结果。断裂带中构造岩广泛发育, 推断这些断裂经历过



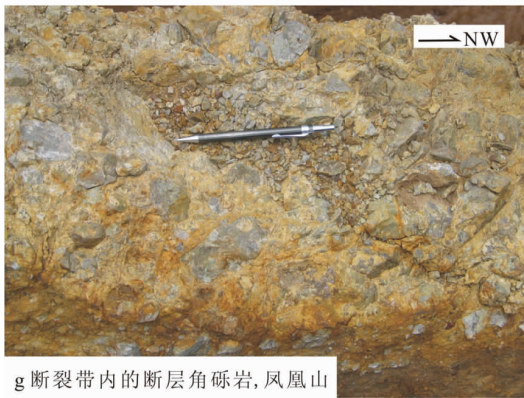
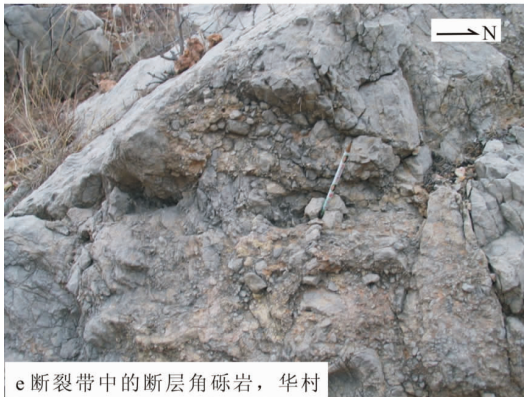
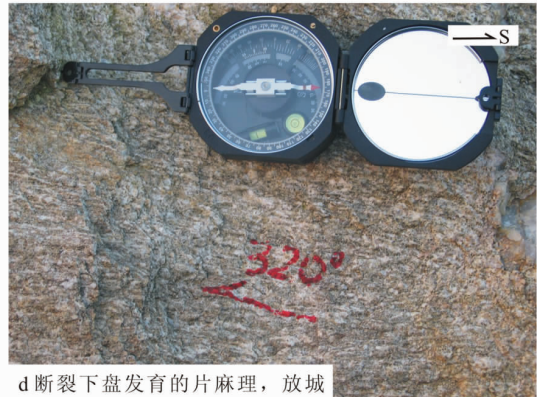
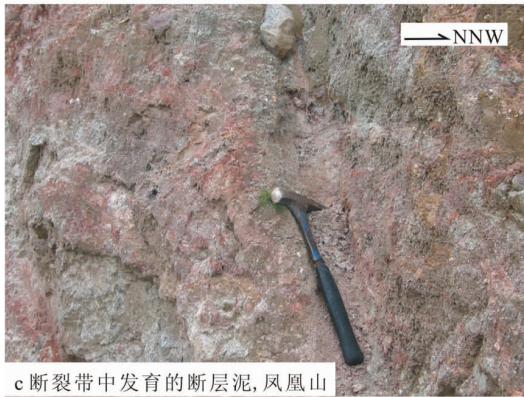
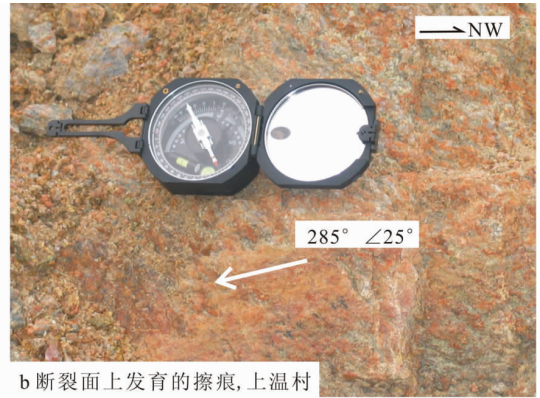


图 3 鲁西隆起北西向伸展断裂露头特征

Fig.3 Outcrop characteristics of the NW extensional faults in West Shandong Uplift



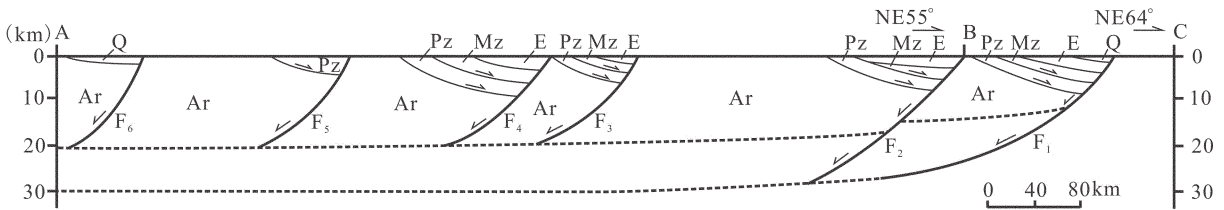


图4 鲁西隆起区伸展断裂系统剖面图(剖面位置见图1,断裂编号同图1)

Fig.4 Cross section of the NW extensional faults in West Shandong Uplift (serial number of the cross section and faults as for Fig. 1)

强烈的构造运动。断裂面上发育的擦痕、阶步指示断裂两盘的活动方向，如泰山—铜冶店断裂面上的右行擦痕，揭示此断裂曾经历过右行走滑活动，这主要是受郯庐断裂带左旋走滑牵引作用影响的结果。此外，野外追踪到的片麻理、节理等特征均可以显示其所处的应力场环境。

### 2.2 滑脱断层特征

伸展滑脱断层是滑脱断层的一种，是沿着地壳或岩石圈的软弱层或低速层运动的，在地壳拉伸过程中发生横向滑移和垂向减薄，呈缓倾斜面状。本文所研究的滑脱断层均为伸展滑脱断层。鲁西隆起区发育深、浅两个层次的滑脱断层，浅层次主要沿下寒武统与太古宇之间以及奥陶系与石炭系之间的不整合面发育，后者不具有区域规模，而深层次主要在泰山—鲁山—沂山以北较为发育。

#### 2.2.1 浅层次滑脱断层特征

鲁西隆起区发育两个浅层次的主滑脱带，分别为寒武系底部与太古宇之间、中奥陶统与上石炭统之间，其中最具规模的是下寒武统碎屑岩与太古宇变质岩之间的滑脱断层。

鲁西隆起区蒙山断裂、新泰—垛庄断裂、泰山—铜冶店断裂和齐河—广饶断裂4条边界断层，限制了浅层次滑脱断层在平面和剖面上的分布。以上述断裂为界，鲁西隆起区寒武系底部与太古宇间的滑脱断层自南向北可分为4个带<sup>①</sup>：圣水峪—仲都—流域滑脱带，刘杜—赵家村滑脱带，寨子南—李条庄滑脱带，岭西—垛庄—张夏滑脱带(图2中分别编号为①②③④)。野外主要对岭西—垛庄—张夏滑脱带和寨子南—李条庄滑脱带进行了实地考察，其中选取了这两条滑脱带的7个观测点(图2)。

岭西—垛庄—张夏滑脱带中现象最为明显，滑脱面下盘为泰山群的混合岩、片麻岩以及侵入到泰

山群的混合花岗岩，上盘为寒武系、奥陶系灰岩。碎裂岩厚50~80 cm，碎块主要为薄层泥灰岩、灰岩，次为花岗片麻岩，多硅化。如岭西(36°29' 10" N, 117° 46' 58" E)滑脱面上的碎裂岩角砾主要为薄层泥灰岩，其次为花岗片麻岩，大小混杂(图5-a)；鹿野(36°27' 49" N, 117°28' 17" E)滑脱面上碎裂岩角砾多为薄层泥灰岩，硅化强烈(图5-b)；垛庄(36°29' 20" N, 117°24' 48" E)滑脱面上的构造岩主要为碎裂灰岩，沿滑脱面有岩脉侵入(图5-c)；南栾宫(36° 30' 8" N, 117°35' 24" E)滑脱带上的薄层灰岩中小褶皱十分发育(图5-d)。

寨子南—李条庄滑脱带中碎裂岩厚20~40 cm，角砾主要为灰岩，次为太古宇花岗片麻岩，其大小不一，磨圆较好，多硅化。在金斗(35°57' 37" N, 117° 47' 36" E)，碎裂岩角砾为薄层藻白云质灰岩(图5-e)；李条庄(36°05' 55" N, 117°34' 1" E)滑脱带上的薄层灰岩中小褶皱十分发育(图5-f)。总体上整个滑脱带都发生了褶皱，呈现波状起伏的特点。这些都显示出构造滑动对滑脱面的改造。

结合上述资料，鲁西隆起沿寒武系/太古宇不整合面发育的滑脱断层有如下构造特征。

(1)浅层次滑脱断层在整个鲁西隆起普遍发育，将风化、侵蚀形成的不整合面、假整合面(风化壳)改造为主要由构造岩组成的构造滑脱面，滑脱面产状平缓，呈舒缓波状，倾向北、北北东和北北西，倾角为5°~10°。

(2)滑脱带内岩石发生强烈的挤压破碎，主要保存有构造角砾岩和碎裂岩，碎裂岩总体破碎，碎裂带宽度为几米到数十米，带内褶皱和揉皱发育，滑脱面上有时可见擦痕、阶步和滑动镜面。

(3)滑脱面上覆和下伏地层特征明显不同，上盘构造复杂，古生界底部岩石被改造，产生强烈的构造

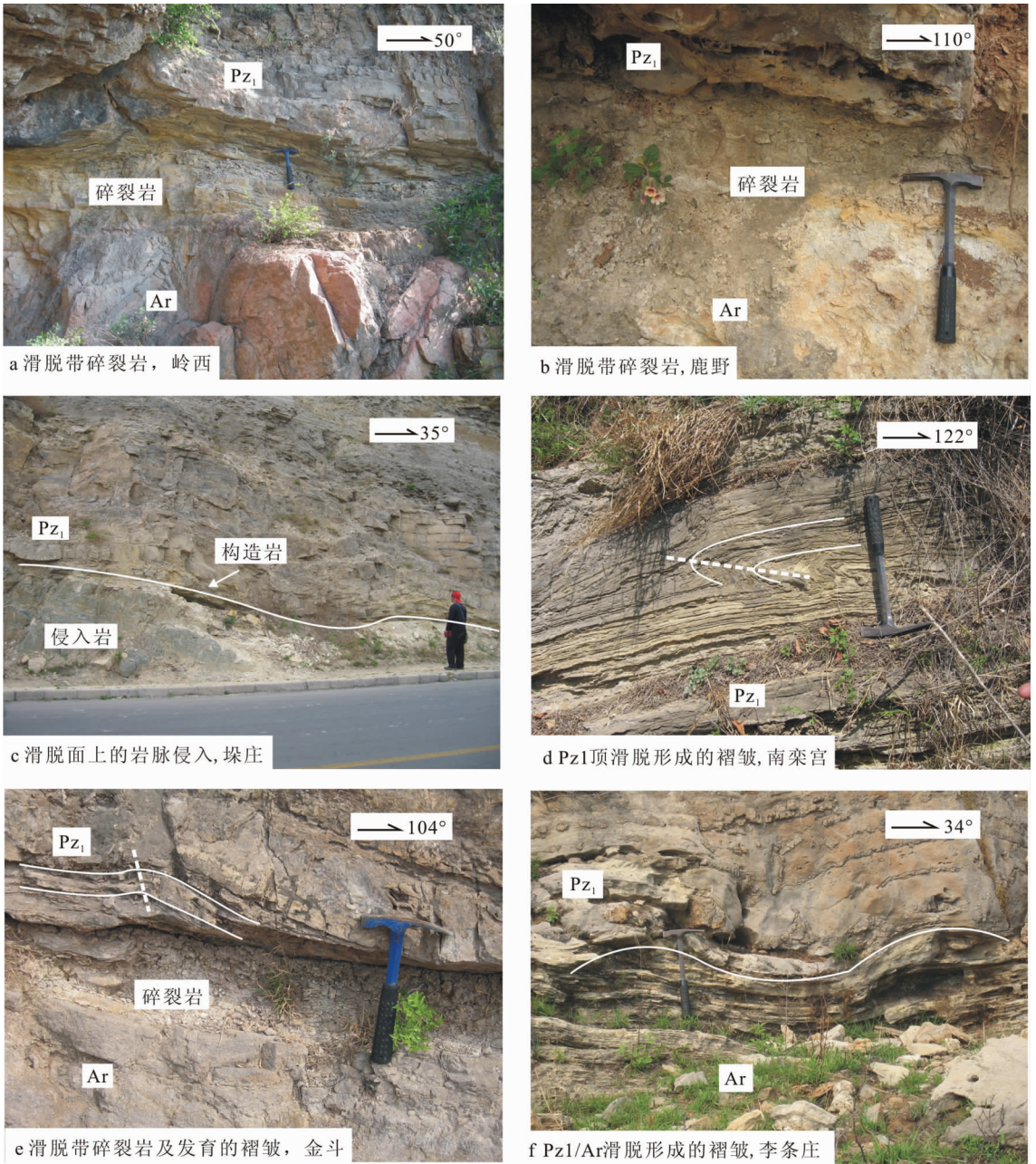


图 5 鲁西隆起浅层次滑脱断层露头特征

Fig.5 Outcrop characteristics of the shallow level décollement in West Shandong Uplift

变形,由于岩层力学性质的差异,脆性岩石中往往产生劈理、小断层等,而相对软弱的薄层岩石中则发育小褶皱。下盘构造相对简单,在构造滑动过程中受影响较小,仅被挤压、碾磨、破碎,基本保留了原来的构造特征。

(4)由于构造滑动的影响,构造层序上往往发生地层缺失,地层缺失往往与构造滑动的强弱呈正相

关<sup>[6]</sup>。煤田地质资料表明,Pz /Ar<sub>1</sub>滑脱面之上的寒武系馒头组底部有不同程度的层位缺失,可缺失 2 到 4 个岩性段,且缺失情况变化很大<sup>[4]</sup>。

### 2.2.2 深层次滑脱断层特征

鲁西隆起露头区未出露深层次滑脱断层,地震探测资料<sup>[9]</sup>显示,沉积盖层中发育的铲式正断裂产状明显,断面向南倾斜,倾角随深度增加而逐渐变



小,最终归并到深层次滑脱断层之上。

根据层长-层厚剖面平衡作图法计算铲式正断裂交汇于滑脱面的深度,结合基底滑脱面倾向和倾角模式判断法得出的各主干断裂底界滑脱面倾角资料<sup>[9]</sup>得出,鲁西隆起北西向的伸展断裂,存在两个底界滑脱面,蒙山断裂及其以南的北西向断裂底界滑脱深度为 20~25 km,而新泰-垛庄断裂东段、泰山-铜冶店断裂,其底界滑脱面深度为 30 km,由此可以编制出本区伸展断裂深层次底界滑脱面的地质剖面(图 4)。这些底界滑脱面相当于中、下地壳的分界处,这与重力和航磁计算结果<sup>[1,10]</sup>相吻合。整个华北地区在中地壳普遍存在低速层和高导层,而滑脱断层位于上地壳的底部<sup>[9]</sup>,由此可见,深层次滑脱面深度恰是中地壳低速层、高导层发育处。此外,地震层析成像等资料<sup>[11]</sup>显示,鲁西地区在 34 km 处为壳-幔边界,为本区重要的滑脱面和调节层,对浅层次的构造变形起着一定的控制和制约作用。

考虑鲁西隆起陡倾斜伸展断裂和缓倾斜滑脱断层的几何形态、运动学特征,得出二者之间的关系。剖面上,陡倾斜伸展断裂的倾向与缓倾斜滑脱断层的滑脱方向相反,即陡倾断裂倾向南,滑脱断层的滑脱方向指向北。陡倾斜断裂的断盘在断裂活动过程中的掀斜作用促进了滑脱断层的产生,同时由于陡倾斜断裂倾角相对较大,且对盘是能干性较强的太古宇,缓倾斜滑脱断层一般不会越过陡倾斜断层。因此,二者在剖面上构成典型的书斜式组合(图 4)。

### 3 鲁西隆起伸展断裂形成机制

#### 3.1 伸展断裂构造应力场数值模拟

构造应力场数值模拟是重现自然界地质构造成因机制的一种卓有成效的计算方法。为了模拟结果的真实有效性及施加边界条件的方便性,笔者将鲁西隆起与其毗邻的济阳拗陷作为一个整体研究。由于隆起区南部的甘霖断裂和尼山断裂对中、新生代凹陷的控制作用不明显,因此仅选取几条典型的陡倾控凹边界断裂进行模拟研究。

本文采用 Ansys 有限元软件模拟了鲁西地区晚中生代以来的伸展断裂构造应力场,由于断裂带较正常的沉积地层强度较弱,凸起区地层强度较大,因此对模型中不同构造单元选取不同的力学参数(表 1,2)。本次模拟分两期进行,晚侏罗世到早白垩世,古太平洋板块沿北北西方向高速俯冲于东亚大陆之

下,加之郟庐断裂带此时期的左旋走滑活动,使整个鲁西地块处于北北东-南南西方向的拉张应力场环境,因此在模型东西边界分别施加左旋剪切应力和拉张力,调用 Ansys 中弹性平面有限元程序反复进行加载运算,确定二者比例为 5:3 时结果最为合理。到始新世,太平洋板块沿北西西方向俯冲,且俯冲速度减弱,同时郟庐断裂带由左旋走滑活动转为右旋走滑活动,鲁西隆起处于北北西-南南东向的拉张应力场环境。因此在模型东西边界上分别施加右旋剪切应力和拉张力,反复进行加载运算,确定二者比例为 5:1 时结果最为合理。

表 1 晚侏罗世—早白垩世应力场模拟力学参数<sup>[12,13]</sup>  
Table 1 Mechanical parameters of stress field numerical simulation from Late Jurassic to Early Cretaceous

介质类型	杨氏模量/GPa	泊松比
断层	5.02	0.25
地层	7.85	0.20
凸起	26.0	0.15

表 2 始新世应力场模拟力学参数<sup>[12,13]</sup>  
Table 2 Mechanical parameters of stress field numerical simulation of Eocene

介质类型	杨氏模量/GPa	泊松比
断层	4.82	0.30
地层	6.45	0.21
凸起	26.0	0.15

模拟结果表明,晚侏罗世到早白垩世,鲁西隆起北西向伸展断裂处均出现明显的应力梯度带(图 6)。始新世,鲁西隆起北西向伸展断裂处应力梯度带较前一期更加明显,同时北东向伸展断裂也开始强烈活动(图 7),与实际地质分析结果吻合得较好。

#### 3.2 形成机制分析

根据笔者野外地质调查和应力场数值模拟分析得出的结果,结合前人进行裂变径迹<sup>[14]</sup>和同位素测年<sup>[15]</sup>结果,可以得出鲁西隆起的伸展断裂系统是晚中生代以来中国东部总的构造应力场发展演化的必然结果。无论是北西向陡倾斜的伸展断裂,还是缓倾斜的滑脱断层,其形成主要受控于晚中生代以来鲁西地块的两次大规模伸展运动。其深部形成背景为晚侏罗世以来太平洋板块的俯冲作用、郟庐断裂的走滑运动以及幔源岩浆活动。



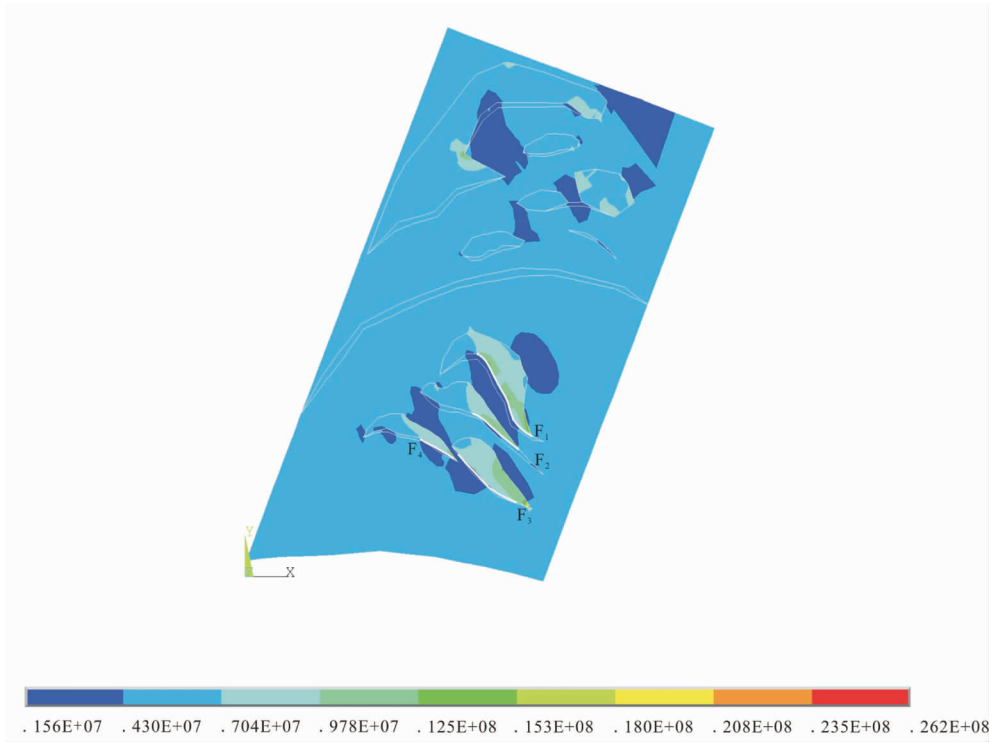


图 6 晚侏罗世—早白垩世最大主应力分布图(断裂编号同图 1)

Fig.6 Maximum principal stress distribution from Late Jurassic to Early Cretaceous (serial number as for Fig. 1)

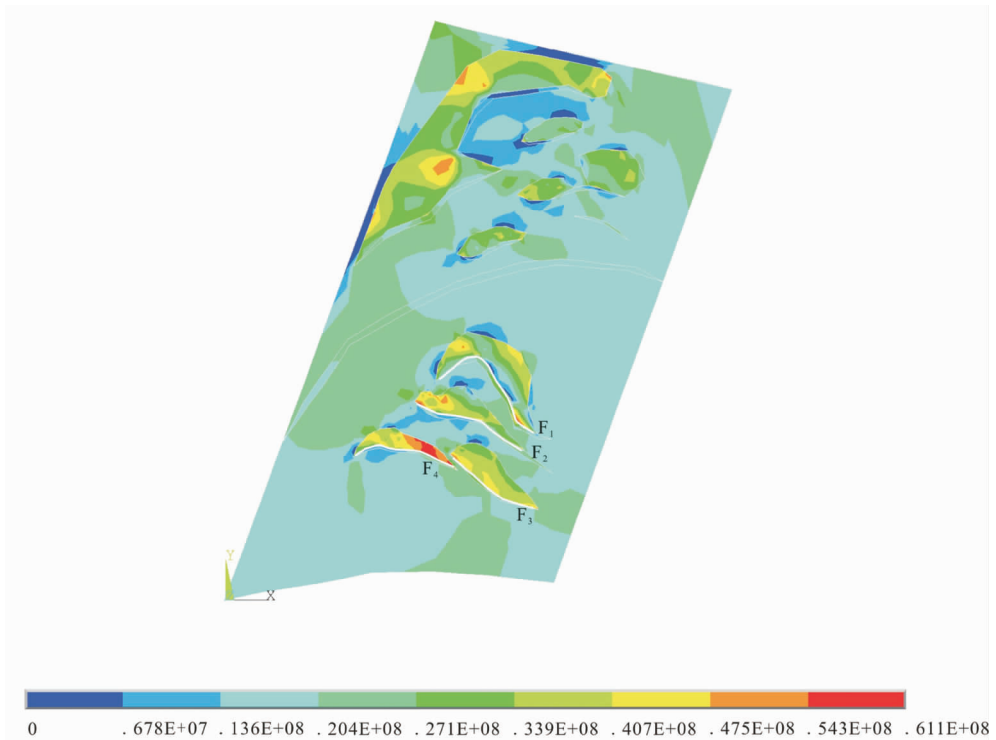


图 7 始新世最大主应力分布图(断裂标号同图 1)

Fig.7 Maximum principal stress distribution in Eocene (serial number as for Fig.1)

晚侏罗世(140 Ma 左右),古太平洋板块以 300 mm/a 的高速度沿北北西方向俯冲于东亚大陆之下<sup>[16,17]</sup>,郟庐断裂带处于左旋走滑活动,在以上因素共同作用下,整个鲁西地块处于北北东-南南西方向的拉张应力场环境,开始第一次大规模的伸展运动。此时,在这一期 NW 向压扭结构面基础上产生了一系列北西向南倾正断裂,自北向南有泰山—铜冶店断裂、新泰—垛庄断裂、蒙山断裂、汶泗断裂、甘霖断裂和尼山断裂,控制了一系列小规模的北北西向凹陷(半地堑)的形成。这些北北西向凹陷构成左行斜列的平面组合样式,与这一时期郟庐断裂带的左行走滑相吻合。早白垩世,由于郟庐断裂带的左旋走滑,北西向伸展断裂在其左旋牵引作用下逐渐向郟庐断裂带方向迁移,并与之贯通。以郟庐断裂带为主干,北西向的伸展断裂及凹陷呈“Y”字形平面样式。应力场数值模拟印证了晚侏罗世—早白垩世鲁西隆起发生第一次大规模伸展运动。同时,由于断裂切割加剧,使得泰山—鲁山—沂山周围的岩浆岩体活动强烈,岩浆岩体的“接力式”传递上侵,带动外围的变质岩一起隆升,外围的盖层则大幅度拆离滑脱,为鲁西的伸展运动包括滑脱断层的形成提供了动力条件。磷灰石、锆石裂变径迹测试结果<sup>[14]</sup>表明,此期间泰山—鲁山—沂山断块上隆,启动其北侧的浅层次滑脱运动,成为缓倾滑脱断层产生的第一个重要时期。

到古新世—始新世初期(65~53 Ma),太平洋板块俯冲速度降低,以 78 mm/a 的速度沿北北西方向向欧亚大陆俯冲<sup>[18]</sup>,加上郟庐断裂带的左旋走滑活动<sup>[19]</sup>,鲁西隆起区处于北东-南西向的拉张应力场环境中,北西向伸展断裂及其所控凹陷持续发育。始新世中后期(53~37 Ma),鲁西地块的伸展作用最为强烈。在 43 Ma 太平洋板块以 38 mm/a 的速度沿北西方向俯冲<sup>[18]</sup>,同时郟庐断裂带由左旋走滑活动转为右旋走滑活动<sup>[20]</sup>。在上述因素共同影响下,鲁西隆起开始了第二次大规模的伸展运动。应力场数值模拟结果表明,北西向伸展断裂活动强烈,同时发育了一些北东向断裂,如泰山—铜冶店断裂的北西段,并出现了大规模、范围广的半地堑,呈现出向北凸出的弧形伸展构造格局。此期间随着地壳裂陷减薄,地幔再次上隆,以“脉动式”向上传递岩浆物质,形成了不同期次与不同层次的岩浆侵入和火山喷溢,伴随着泰山这一时期快速隆升<sup>[14]</sup>,鲁西隆起大范围发育了多个层次、多个级别的滑脱断层,成为区域性构造滑

动的第二个重要时期。

到渐新世时,鲁西隆起的伸展断裂活动已经基本停止。鲁西隆起以齐河—广饶断裂为界,与其相毗邻的济阳拗陷进入各自的隆-拗历史。断裂的伸展运动基本停止,代之以区域的沉降作用。

## 4 结论与讨论

(1)鲁西隆起发育典型的复合伸展断裂系。大量的北西向陡倾斜伸展断裂,将鲁西隆起晚中生代以来的地层分割成醒目的“北断南超”的阶梯状半地堑系。断裂带中各种构造角砾岩、断层泥发育,还可显示断裂构造活动的擦痕、褶皱等,断裂面多向南倾斜,向深处逐渐变缓交汇于 20~30 km 处,并转变为深层次拆离滑脱。

(2)滑脱断层构成鲁西隆起复合伸展断裂系的重要组成部分,鲁西隆起发育深、浅两个层次的滑脱断层。浅层次中最具规模的滑脱面位于下寒武统和太古宇之间,其上各种碎裂岩、褶皱发育,伴有动力变质作用。深层次滑脱断层主要发育在中地壳低速层,滑动方向与浅层次相反,并控制着浅层次滑脱断层的发育。

(3)应力场数值模拟结果和野外地质调查表明,鲁西隆起伸展断裂的形成机制归因于鲁西地块晚中生代和古近纪两次大规模的伸展运动,其深部背景是中、新生代太平洋板块的俯冲、郟庐断裂带的走滑活动以及幔源岩浆活动。

众多研究资料表明<sup>[21-23]</sup>,岩浆活动与太平洋板块的俯冲轨迹有着密切的耦合关系。晚侏罗世到早白垩世,古太平洋板块北北西向俯冲与郟庐断裂带左行走滑的共同作用,使中国东部处于近南北向的拉张状态。拉张作用造成岩石圈减薄,软流圈卸载上涌,发生减压部分熔融,引起此时期大规模的岩浆活动。已有的年代学资料表明<sup>[24]</sup>,华北板块中部和东部中生代岩浆活动时代集中于早白垩世,是岩浆活动的峰期,为鲁西隆起区早白垩世的伸展及滑脱断层的产生创造了条件。而本文进行的应力场数值模拟也证实,郟庐断裂带的走滑及岩浆上涌派生的拉张是鲁西隆起伸展断裂系统产生与发展的主控因素。晚侏罗世到早白垩世,在郟庐断裂带左行走滑和岩浆上涌的共同作用下,北西向伸展断裂普遍发育,并开始快速活动,同时,滑脱断层开始发育;到始新世,郟庐断裂带由左行走滑转为右行走滑,太平洋板块



对欧亚大陆持续俯冲,加之印欧板块的碰撞<sup>[5]</sup>,使岩浆活动更加剧烈,在上述因素共同影响下,北西向伸展断裂活动更加强烈,同时发育了一系列北东向的伸展断裂及大范围的滑脱断层。因此,中新世郯庐断裂带的走滑活动以及板块俯冲所导致的岩浆上涌是鲁西隆起伸展断裂系统产生的深部背景。

## 参考文献(References):

- [1] 燕守勋,王桂梁,邵震杰,等.鲁西地壳隆升的伸展构造模式[J].地质学报,1996,70(1):1-10.  
Yan Shouxun, Wang Guiliang, Shao Zhenjie, et al. Extensional tectonic model of crustal elevation in western Shandong [J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70 (1):1-10 (in Chinese with English abstract).
- [2] 牛树银,胡华斌,毛景文,等.鲁西地区地质构造特征及其形成机制[J].中国地质,2004,31(1):34-39.  
Niu Shuyin, Hu Huabin, Mao Jingwen, et al. Structure in western Shandong and its genetic mechanism[J]. Geology in China, 2004, 31 (1):34-39(in Chinese with English abstract).
- [3] 李三忠,王金铎,刘建忠,等.鲁西地块中生代构造格局及其形成背景[J].地质学报,2005,79(4):487-496.  
Li Sanzhong, Wang Jinduo, Liu Jianzhong, et al. Mesozoic structure and its tectonic setting in the western Shandong block [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(4):487-496(in Chinese with English abstract).
- [4] 吕朋菊,张明利,朱兴珊.泰山周围下古生界与泰山群不整合面上滑动构造的发现[J].地质论评,1990,36(5):473-478.  
Lv Pengju, Zhang Mingli, Zhu Xingshan. Discovery of sliding structures on the plane of unconformity between the lower Palaeozoic and the Taishan Group in the vicinity of Taishan Mountains[J]. Geological Review, 1990, 36(5):473-478(in Chinese with English abstract).
- [5] 王桂梁,燕守勋,姜波.鲁西中生代复合伸展构造系统[J].中国矿业大学学报,1992,21(3):1-8.  
Wang Guiliang, Yan Shouxun, Jiang Bo. The compound extension structure system of Meso-Cenozoic in west Shandong Province [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1992, 21(3):1-8(in Chinese with English abstract).
- [6] 李理,张进江,钟大赉,等.鲁西地区沿寒武系/太古宇不整合面滑脱构造的主要特征及形成机制[J].地质科学,2007,42(2):335-352.  
Li Li, Zhang Jinjiang, Zhong Dalai, et al. Main characteristics of the décollement structures along the Cambrian/Archean unconformity surface in western Shandong [J]. Chinese Journal of Geology, 2007, 42(2):335-352(in Chinese with English abstract).
- [7] 宋明春,张成基,王来明,等.山东省第二轮区域地质调查主要进展[J].山东地质,2001,17(2):10-22.  
Song Mingchun, Zhang Chengji, Wang Laiming, et al. Review of regional geological survey in Shandong Province [J]. Shandong Geology, 2001, 17(2):10-22(in Chinese with English abstract).
- [8] 吴智平,李伟,任拥军,等.济阳拗陷中生代盆地演化及其与新生代盆地叠合关系探讨[J].地质学报,2003,77(2):280-286.  
Wu Zhiping, Li Wei, Ren Yongjun, et al. Basin evolution in the Mesozoic and superposition of Cenozoic basin in the area of the Jiyang depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2):280-286(in Chinese with English abstract).
- [9] 王椿镛,张先康,吴庆举,等.华北盆地滑脱构造的地球物理学证据[J].地球物理学报,1994,37(5):613-620.  
Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Wu Qingju, et al. Seismic evidence of detachment in North China basin [J]. Acta Geophysica Sinica, 1994, 37(5):613-620(in Chinese with English abstract).
- [10] 王桂梁,曹代勇,姜波,等.华北南部的逆冲推覆、伸展滑覆与重力滑动构造[M].北京:地质出版社,1992:87-110.  
Wang Guiliang, Cao Daiyong, Jiang Bo, et al. Thrust Nappe, Extensional Gliding Nappe and Gravity Gliding Structures in the Southern Part of North China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:87-110(in Chinese).
- [11] 李志伟,胥颐,郝天珧,等.环渤海湾地区的地震层析成像与地壳上地幔结构[J].地球物理学报,2006,49(3):797-804.  
Li Zhiwei, Xu Yi, Hao Tianyao, et al. Seismic tomography and velocity structure in the crust and upper mantle around Bohai Sea area [J]. Acta Geophysica Sinica, 2006, 49(3):797-804(in Chinese with English abstract).
- [12] 宋书君.复杂断块群四维应力场模型及油藏预测 [M].北京:石油工业出版社,2003:63-67.  
Song Shujun. Four-dimensional Stress Field Model of Complex Fault Block Group and Oil Reserve Forecast [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:63-67(in Chinese).
- [13] 尤明庆.岩石试样的杨氏模量与围压的关系[J].岩石力学与工程学报,2003,22(1):53-60.  
You Mingqing. Effect of confining pressure on the young's modulus of rock specimen [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1):53-60(in Chinese with English abstract).
- [14] 李理,钟大赉.泰山新生代抬升的裂变径迹证据[J].岩石学报,2006,22(2):457-464.  
Li Li, Zhong Dalai. Fission track evidence of Cenozoic uplifting events of the Taishan Mountain, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(2):457-464(in Chinese with English abstract).
- [15] 李理,钟大赉,时秀朋,等.鲁西地区的滑脱构造及其形成的深部背景[J].自然科学进展,2008,18(6):651-661.  
Li Li, Zhong Dalai, Shi Xiupeng, et al. Late Mesozoic-Cenozoic décollement structure and its deep geological background in western Shandong, China [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18 (6):651-661(in Chinese).
- [16] Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin [J]. The Geological Society of America, Special Paper, 1985, 206:1-59.
- [17] 陈根文,夏换,陈绍清.华北地区晚中生代重大构造转折的地质证据[J].中国地质,2008,35(6):1162-1177.  
Chen Genwen, Xia Huan, Chen Shaoqing. The geological

- evidences for the tectonic transition in late Mesozoic in North China[J]. *Geology in China*, 2008, 35(6):1162–1177 (in Chinese with English abstract).
- [18] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extrusion along the eastern margin of Eurasia [J]. *Geology*, 1995, 23:719–722.
- [19] 韩文功, 季建清, 王金铎. 郯庐断裂带古新世—早始新世左旋走滑活动的反射地震证据[J]. *自然科学进展*, 2005, 15(11):1383–1388.  
Han Wengong, Ji Jianqing, Wang Jinduo. The seismic evidence of Tan–Lu fault's left–lateral strike–slip from Palaeocene to Early Eocene[J]. *Progress in Natural Science*, 2005, 15(11):1383–1388(in Chinese).
- [20] 徐嘉炜, 朱光, 吕培基, 等. 郯庐断裂带平移年代学研究的进展[J]. *安徽地质*, 1995, 5(1):1–12.  
Xu Jiawei, Zhu Guang, Lv Peiji, et al. Progress in studies on strike–slip chronology of the Tan–Lu fault zone [J]. *Geology of Anhui*, 1995, 5(1):1–12(in Chinese with English abstract).
- [21] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3/4): 269–287.
- [22] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, et al. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29(1):26–33.
- [23] Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3/4):533–542.
- [24] 许文良, 王清海, 王冬艳, 等. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据[J]. *地学前缘*, 2004, 11(3):309–317.  
Xu Wenliang, Wang Qinghai, Wang Dongyan, et al. Processes and mechanism of Mesozoic lithospheric thinning in eastern North China Craton: evidence from Mesozoic igneous rocks and deep–seated xenoliths[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3):309–317 (in Chinese with English abstract).
- [25] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学 (D 辑)*, 1996, 26(4):289–295.  
Zhong Dalai, Ding Lin. The uplifting history of Tibet Highland and its mechanism researching[J]. *Science in China, (Series D)*, 26(4):289–295(in Chinese).

## Characteristics and mechanism of Late Mesozoic extensional faults in West Shandong Uplift

HU Qiu–yuan, LI Li , TANG Zhi–bo, SHI Xiu–peng

( *Institute of Earth Resource and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China* )

**Abstract:** Field survey performed in West Shandong Uplift indicates that extensional faults are well developed and characterized by complicated structural styles in West Shandong Uplift. The main structure style is the compound extensional fault system composed of high–angle faults and low–angle décollement faults. The high–angle faults, which dominate the sedimentation in the southern depression, constitute the main part of the extensional fault system in West Shandong Uplift. In the fault zone, there are dynamic breccia, fault clay, small folds and scraping trace making up signs of faulting activity. Regional décollement faults composed of shallow level faults and deep level faults were found in West Shandong Uplift. The most outstanding décollement faults of the shallow level are between Lower Cambrian and Archean and between Ordovician and Carboniferous. There are different structural deformational styles developed near the décollement surface: above it (in the lowermost part of the Cambrian) there occurred intense structure deformation resulting in folding and shattering, whereas the structures in the underlying Archean are relatively simple, only with extrusion and rupture. The décollement of the deep level controlling the formation and distribution of the shallow level décollement is mainly developed in the low–velocity layer of the crust. The result of the tectonic stress field numerical simulation shows that the extensional fault system has been formed by two stages of large scale extensional movement since Late Mesozoic. Mechanically, the extensional fault system is closely related to the Late Mesozoic–Cenozoic strike–slip activity of Tan–Lu fault zone, the subduction of the Pacific Plate and the magma upwelling.

**Key words:** extensional fault; Late Mesozoic; mechanism; West Shandong Uplift; numerical simulation

**About the first author:** HU Qiu–yuan, female, born in 1984, master candidate, majors in tectonic geology; E–mail: huqiuyuan\_1984@163.com.