

胶东东部中生代逆冲推覆构造研究^{*}

张宏远^{①②} 侯泉林^{③**} 曹代勇^④

(① 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; ② 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;
③ 中国科学院研究生院, 北京 100039; ④ 中国矿业大学煤炭资源教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要 研究区胶东东部位于华北东部苏鲁超高压变质带东端, 发育逆冲推覆构造. 采用多尺度构造研究和构造年代学研究相结合的方法, 可将胶东东部逆冲推覆体划分为石岛推覆体、荣成推覆体、米山推覆体、牟平推覆体等四个推覆体. 这些推覆体以相应的走滑逆冲型剪切带为底界, 主要活动于中生代. 研究表明, 由石岛剪切带、荣成剪切带至牟平剪切带, 古差异应力值和韧性变形强弱序列呈现逐渐降低的趋势, 与变形温度的变化趋势呈负相关. 根据逆冲推覆构造研究、⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素测年数据以及前人在区域上的同位素构造年代学研究成果, 推测研究区中生代构造的发展主要经历了四期运动: 三叠纪末(约 210~180 Ma)的逆冲推覆运动; 侏罗纪-早白垩世(约 180~130 Ma)的伸展运动; 早白垩世(130~120 Ma)的走滑逆冲运动; 晚白垩世以后(约 120 Ma~)的伸展运动. 其中, 早白垩世(130~120 Ma)的走滑逆冲运动期剪切带的活动序列为石岛剪切带→荣成剪切带→牟平剪切带→米山剪切带, 引起了推覆体的逆时针旋转效应. 胶东东部逆冲推覆构造与郯庐断裂带的两期走滑事件时代吻合、运动学相容, 可吸收或调节部分郯庐断裂带的走滑运动量, 从而导致该断裂带北段走滑量的显著变小.

关键词 胶东东部 中生代 逆冲推覆构造 构造特征 年代学 剪切带

研究区胶东东部位于华北东部苏鲁超高压变质带东端, 面积约 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1(1)). 作为中生代华北和扬子两陆块碰撞带的一部分, 胶东东部具有重要的区域性地质研究地位. 胶东东部逆冲推覆构造已被许多文献确认, 是由若干条中-下地壳级深断裂以及多个来源于深层而就位于中上地壳水平的结晶块体推覆体(岩片)构成^[1~5]. 但是, 前人尚缺乏对该逆

冲推覆体构造特征的系统分析研究, 也没有将胶东东部逆冲推覆构造体系的扩展过程纳入到华北东部中生代构造演化序列中.

本文综合利用多尺度多种技术手段相结合的方法(图 2), 探讨了胶东东部中生代逆冲推覆构造的存在性、展布规律、构造几何学和运动学及构造变形条件, 并结合区域大地构造的特点和构造年代学研究

收稿日期: 2005-06-27; 接受日期: 2005-10-10

^{*} 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40234050)和中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX1-07)资助

^{**} 联系人, E-mail: quhou@gucas.ac.cn

推测了胶东东部中生代的逆冲推覆构造演化规律,并据此试图探讨华北东部中生代的构造动力学过程。

1 逆冲推覆体的划分及其展布特征

根据推覆体边界剪切带和推覆体的主要构造变形特征、主要岩石组合与区域变质作用相、推覆体的构造古地理特征、地球物理资料等,将胶东东部划分出石岛推覆体、荣成推覆体、米山推覆体、牟平推覆体等 4 个推覆体。这些推覆体以剪切带相接触,并且可以通过剪切带记录下这些古地体的多期活动历史。

石岛推覆体位于海阳所-石岛一线以南,为石岛剪切带的上盘,北侧和西侧以石岛剪切带为界,东侧和南侧为黄海,呈不规则带状(图 1(2))。该推覆体具高压岩石组合,含石榴二辉麻粒岩、石榴辉长岩、蓝晶石麻粒岩、石榴角闪岩、蛇纹橄榄岩、辉橄岩、石英岩、变质钙硅质岩等,变质相达麻粒岩相,属扬子克拉通基底^[4-6]。

荣成推覆体位于荣成-大时家一带,是荣成剪切带上盘,成不规则带状分布于北侧和西侧的荣成剪切带和南侧石岛剪切带之间,其东侧为黄海(图 1(2))。该推覆体具有超高压岩石组合,含榴辉岩、超镁铁质岩及变质沉积岩等^[7]。角闪-高级角闪岩相变质,有退变质作用。超高压变质岩石构造侵位到角闪岩相变质的花岗质围岩片麻岩中^[4,5]。

米山推覆体位于威海一带,为米山剪切带上盘,带状分布于西北侧米山剪切带与东南侧荣成剪切带之间,东北侧临黄海(图 1(2))。该推覆体具超高压组合:含柯石英基性麻粒岩、角闪岩、超镁铁质岩、变质沉积岩等,先后经历超高压变质作用、麻粒岩相叠加变质作用、角闪岩相退变质作用^[4,5]。示在中-高热流值的环境中发生构造就位。

牟平推覆体位于牟平-乳山一带,为牟平剪切带上盘,带状分布于西北侧牟平剪切带和东南侧米山剪切带之间,北临黄海(图 1(2))。该推覆体为变质杂岩,岩性包括黑云-二长片麻岩、大理岩、斜长角闪岩、花岗岩、含石墨基性-中性麻粒岩、二辉麻粒岩等,绿片-角闪岩相变质^[4,5]。

胶东东部各逆冲推覆体(石岛推覆体、荣成推覆体、米山推覆体、牟平推覆体)的展布具有如下特点:①各逆冲推覆体的展布受大型韧性剪切带控制,推

覆体内拉伸线理方位多指向SE-SEE,而边界剪切带内拉伸线理多跟剪切带走向一致(图 1(2)),拉伸线理数据参考了^[11];②强变形带和弱变形域交生的构造格局;③逆冲推覆体走向自南而北由近EW向转为以NE为主,形成所谓旋扭形态;④南黄海北部盆地与北黄海盆地内的主构造线也均为ENE向,跟研究区主构造线基本一致。

2 胶东东部逆冲推覆构造的构造特征分析

为了更好的控制推覆体之间的相互作用关系,对研究区特别是边界剪切带进行了多尺度的构造几何学分析、运动学分析、古差异应力估计和有限应变分析。

2.1 构造几何学和运动学特征

主要推覆体和主要剪切带的几何学和运动学特征可以分别概括为表 1。图 1(3)显示了研究区石英c轴组构图。图 1(4)显示了横切各个推覆体及其边界剪切带的构造变形剖面,其中在 16 km 左右剪切带趋于合为一条是依据地震波鳄鱼状剖面确定的^[12]。

推覆体:主要表现为挤压型的构造岩片,运动学标志类型较剪切边界少,并未见强烈的走滑特征;推覆体内的拉伸线理主要为 SE-SSE 向,跟边界剪切带内的矿物拉伸线理方向不同,说明推覆体只表现出一期韧性剪切活动。推覆体内部的拉伸线理和填图尺度的褶皱作用(枢纽近平行于边界剪切带)代表了较早期的韧性变形。这些大尺度的纵弯褶皱和拉伸线理可能源于大规模逆冲推覆事件。边界剪切带走向几乎平行于褶皱枢纽走向,因而推测其可能是晚期在这些大型褶皱轴面劈理的基础上发展起来的,并引发了变形分解(图 1(2), 图 3)。

边界剪切带: (1) 根据宏观尺度分析,各个剪切带内发育糜棱岩、叶理化透镜体等构造,发育大量韧性剪切带运动学标志,运动学标志指示逆冲与左行走滑并存的构造关系,且后者叠加在前者之上。此外,从宏观上看,石岛剪切带走向近东西,改造了甲子山岩体;荣成剪切带走向 ENE,改造了伟德山岩体;米山剪切带 NE 向展布,改造了昆崙山岩体;牟平剪切带走向 NE,将胶东东部混合片麻岩区与西部胶北粉

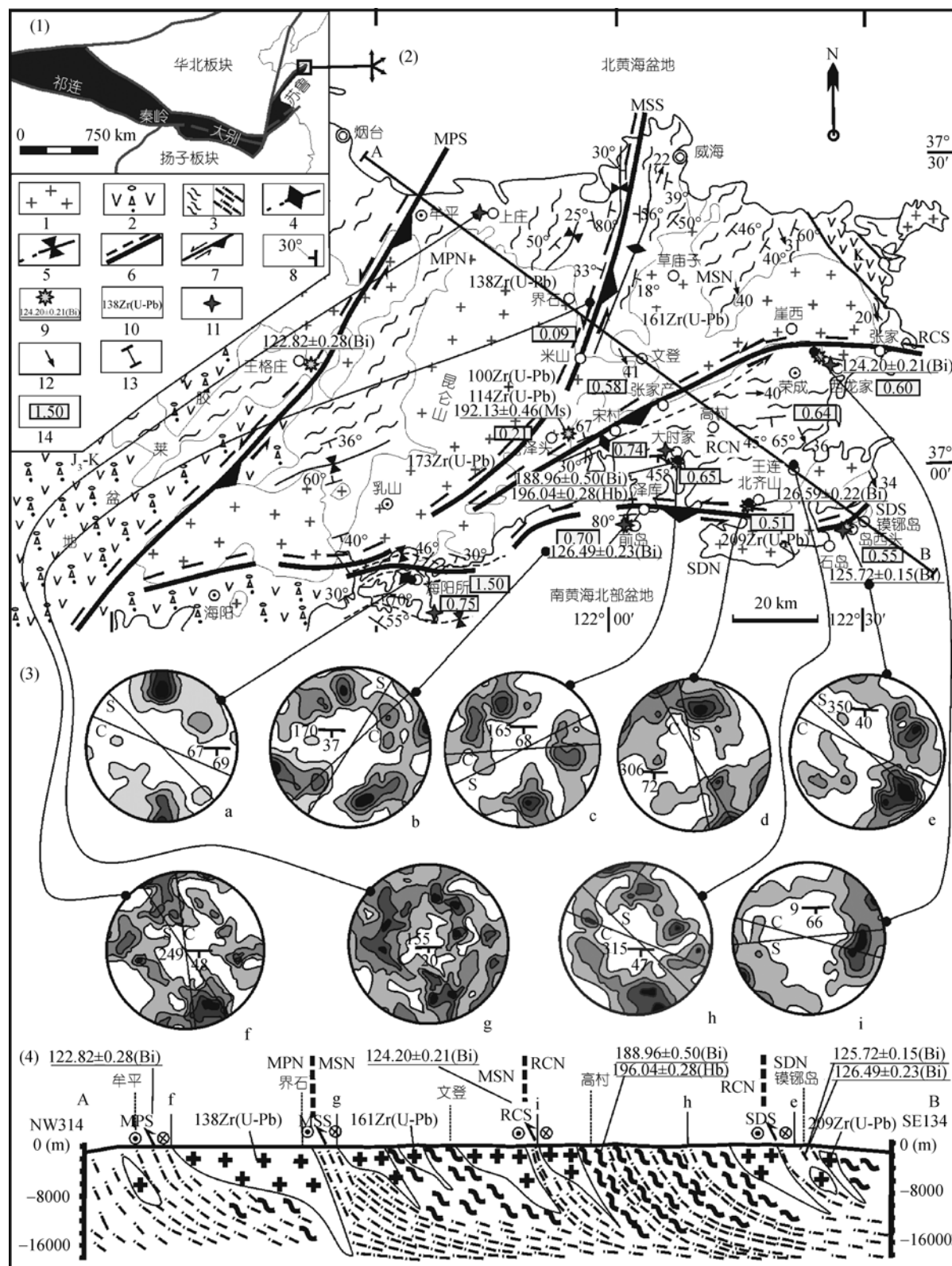


图 1 胶东东部逆冲推覆构造、年代学、石英光轴组构、付林值及牟平-镁镬岛剖面综合地质图(本图参考了¹⁾和^[1,4,5,8,9])

(1) 胶东东部在胶东半岛的位置, 其中填充区域为祁连-秦岭-大别-苏鲁造山带。(2) 研究区胶东东部中生代构造纲要图。1 示花岗岩; 2 示 J_3 -K碎屑、砂砾、火山岩沉积; 3 示变质岩系(强剪切带/弱剪切带); 4 示背斜; 5 示向斜; 6 示主要NE-ENE剪切带; 7 示走滑逆冲构造; 8 示面理产状; 9 示采样点及本文Ar/Ar年龄值; 10 示文献[19]的年龄值; 11 示超微构造研究采样点; 12 示拉伸线理; 13 示构造剖面; 14 示岩石付林值; SDN示石岛推覆体; RCN示荣成推覆体; MSN示米山推覆体; MPN示牟平推覆体; SDS示石岛剪切带; RCS示荣成剪切带; MSS示米山剪切带; MPS示牟平剪切带。(3) 石英光轴组构图。a示海阳所石英岩 01120708XZ面石英光轴组构图, 等面积投影, 9-7-5-3-1%, 位于石岛剪切带: 其一是单斜对称, II型极密, 表示存在平行于XZ面的环带构造。对应于石英底面滑移; 其二是残留早期IV型极密, 属于菱面滑移。示中温变形。b示前岛 01120905XZ面石英光轴组构图, 等面积投影, 4-3-2-1%, 位于石岛剪切带: IV型极密, 围绕Y轴有两个小圆, 斜方对称, 推断为石英菱面滑移; 又有晚期I型极密, 代表底面滑移。示中低温变形。c示大时家 01120908XZ面石英光轴组构图, 等面积投影, 5-4-3-2-1%, 位于荣成推覆体内: 典型IV型极密, 围绕Y轴有两个小圆, 斜方对称, 推断为石英菱面滑移。示中温变形。d示北齐山 01121002 石英光轴组构图, 等面积投影, 5-4-3-2-1%, 位于石岛剪切带: 存在两种类型的极密, 即斜方对称的小圆环带、IV型极密和单斜对称的II型极密。分别代表早期菱面滑移和晚期发育的石英。示中低温变形。e示镁镬岛 01121005 石英光轴组构图, 等面积投影, 5-4-3-2-1%, 位于石岛剪切带: 存在两种类型的极密, 即斜方对称的小圆环带、IV型极密和单斜对称的II型极密。分别代表早期菱面滑移和晚期发育的石英。示中低温变形。f示上庄之西烟威公路 171 km处, 01121402XZ面石英光轴组构图, 等面积投影, 4-3-2-1%, 位于牟平推覆体内: 存在I型极密, 呈现单斜对称, 底面滑移。示低温变形。g示大界石东 2 km, 01121406 石英光轴组构图, 等面积投影, 3.1-2.2-1.3-0.4%, 位于米山剪切带内: 小圆环带; 推测斜方对称为主, 代表菱面滑移。示中温变形。h示王连 01121006XZ面石英光轴组构图, 等面积投影, 3.4-2.6-1.8-1%, 位于荣成推覆体内: 存在两种类型的极密, 即斜方对称的小圆环带、IV型极密和单斜对称的I型极密。分别代表早期菱面滑移和晚期发育石英的底面滑移。示中低温变形。i示荣成市西龙家 01121101XZ面石英光轴组构图, 等面积投影, 4.9-3.6-2.3-1%, 位于荣成剪切带内: 围绕Y轴存在不太典型的小圆环带; 极密有两类, 单斜对称, 其一是位于X轴的两侧, 其二是位于X轴上, 分别属于VII型和I型极密, 分别代表早期菱面滑移和晚期发育石英的底面滑移。示中低温变形。(4) 牟平-文登-镁镬岛大地构造剖面。注意岩体都被后期构造改造了, 呈透镜体状。其中在 16 km左右剪切带趋于合为一条是依据地震波鳄鱼状剖面确定的^[9]

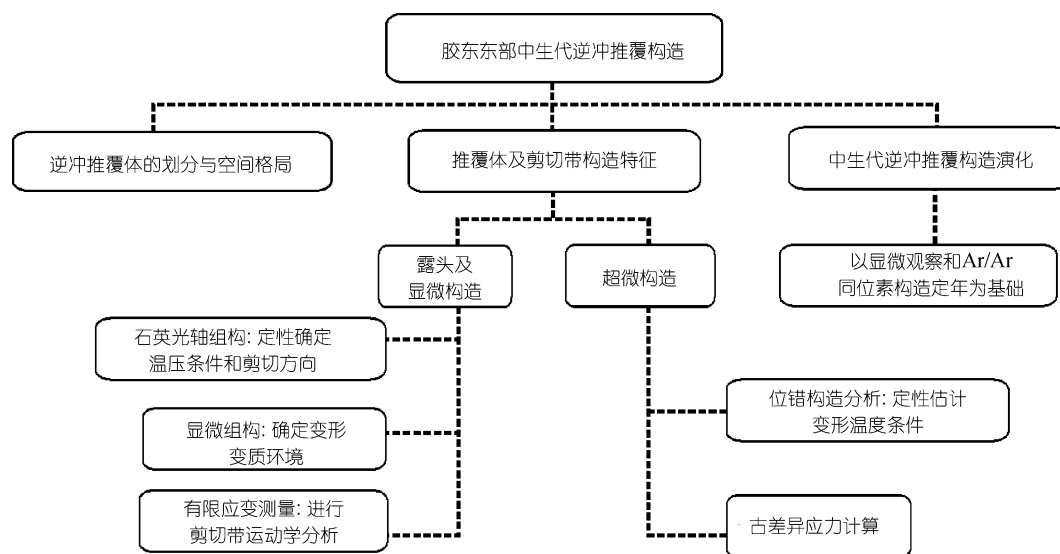


图 2 胶东东部中生代逆冲推覆构造研究流程

子山群和胶莱盆地的断陷沉积隔开。这些可证明在区域伸展之前, 大规模侵入岩浆活动之后剪切带曾

经发生运动。(2) 显微构造分析表明各个剪切带均为韧性剪切带(表 1)。石岛剪切带见石英发育亚晶粒构

1) 山东省地质矿产局. 中华人民共和国 1:200000 烟台幅区域调查说明书, 1991;
山东省地质矿产局. 中华人民共和国 1:200000 威海-文登幅区域调查说明书, 1992;
山东省地质矿产局. 中华人民共和国 1:200000 海阳-潮里幅区域调查说明书, 1992;
山东省地质矿产局. 中华人民共和国 1:200000 莱阳幅区域调查说明书, 1996

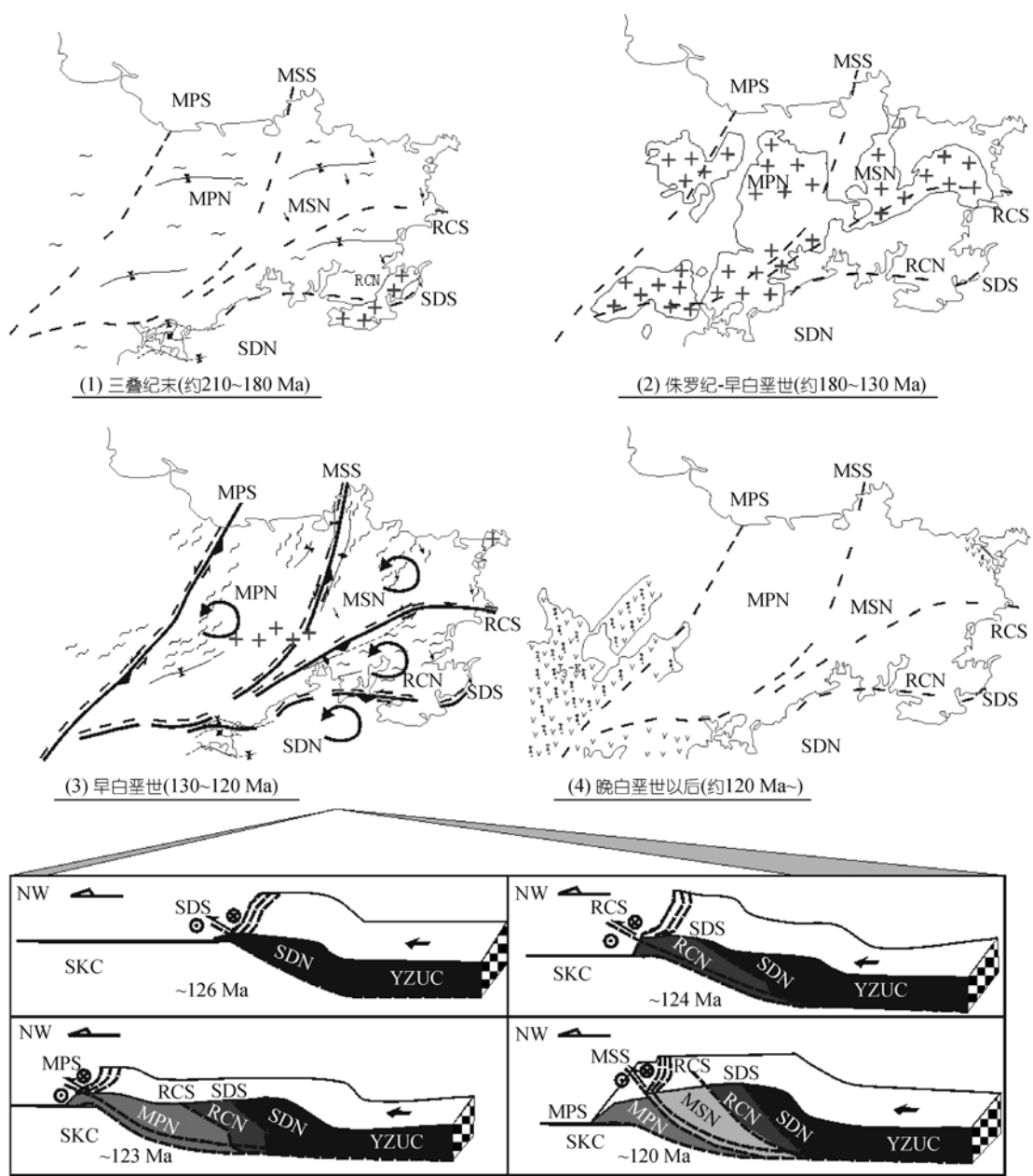


图 3 胶东东部中生代构造的演化示意图

SKC: 中朝克拉通(华北陆块)地壳; YZUC: 扬子陆块上地壳; SDS: 石岛剪切带; RCS: 荣成剪切带; MPS: 牟平剪切带; MSS: 米山剪切带; SDN: 石岛推覆体; RCN: 荣成推覆体; MSN: 米山推覆体; MPN: 牟平推覆体

造,长石变形明显;荣成剪切带石英亚晶粒构造、条带状消光;米山剪切带见石英不仅存在亚晶粒构造等塑性变形作用特征,更具有晚期碎裂作用叠加的特征;牟平剪切带见石英亚晶粒构造、动态重结晶、残斑系等特征。(3)岩组学分析表明各个剪切带均具

有小圆环带发育,同时具备单斜和斜方对称与菱面-底面滑移的特点,说明剪切带变形温度大约在300~500℃左右,形成时深度处于10 km以下,且同时具有挤压和简单剪切的特点,或许代表两期构造活动的叠加。

表 1 逆冲推覆构造的几何学和运动学特征

构造单元代号	构造单元名称	几何学特征			运动学特征	
		宏观尺度	显微尺度	石英光轴组构	宏观-微观尺度	组构运动学
SDN	石岛推覆体	透镜体			逆时针旋转	
SDS	石岛剪切带	走向近东西,发育 S-C 糜棱岩、A 型褶皱、杆状构造、劈理带、眼球构造、不等翼褶皱、顶厚褶皱、正花状构造	石英发育亚晶粒构造,长石变形明显	斜方对称、单斜对称、小圆环带	深层次左旋走滑逆冲	菱面滑移、底面滑移
RCN	荣成推覆体	岩片和透镜体,成条带状展布,矿物拉伸线理指向 SE			逆时针旋转	
RCS	荣成剪切带	走向 ENE,片麻面理发育,伟德山岩体被其改造	石英亚晶粒构造、条带状消光	小圆环带较模糊,出现 VII 型极密、单斜对称	深层次左旋走滑逆冲	菱面滑移、底面滑移
MSN	米山推覆体	构造岩片,矿物拉伸线理指向 SSE-SE			逆时针旋转	
MSS	米山剪切带	NE 向展布,发育硅质碎裂岩、塑性变形的花岗片麻岩、麻粒岩构造透镜体、小尺度双重构造	碎斑状结构,石英波状消光、亚晶粒构造	小圆环带斜方对称为主,极密部数目多且分布分散复杂	深层次左旋走滑逆冲,后期脆性剪切叠加	菱面滑移
MPN	牟平推覆体	构造岩片,混杂状体			逆时针旋转	
MPS	牟平剪切带	走向 NE,发育岩石透镜体、双重构造、岩脉和滑脱断层	石英亚晶粒构造、动态重结晶,残斑系	小圆环带发育,存在 IV 型和 I 型极密、斜方对称和单斜对称	深层次左旋走滑逆冲	菱面滑移、底面滑移

因此,各个边界剪切带均具有左旋走滑逆冲推覆的特点,均属于深层次韧性走滑推覆剪切带.边界剪切带显然继承了推覆体早期的运动,其显著的逆冲运动学标志证明了这一点;但是边界剪切带内的平行于剪切带走向的矿物拉伸线理及走滑运动学标志均代表了晚期的构造活动.因为一地体的左行走滑只能导致该块体的反时针旋转,故根据各边界剪切带均是左行走滑逆冲的特点推断,各个推覆体在中生代晚期推覆体边界运动过程中产生了反时针旋转的效应(图 1,图 3).

2.2 古差异应力和有限应变特征

2.2.1 胶东东部推覆边界剪切带的应力特征

采用 Weathers 等的自由位错应力计^[10]进行了研究区的差异应力估计:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 6.6 \times 10^{-3} \rho^{0.5}, \quad (1)$$

式中, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 为差异应力, MPa, ρ 为自由位错密度, cm^{-2} .

对一些样品的古差异应力估计相关参数如表 2 所示,这些参数包括逆冲推覆构造岩样显微镜描述、石英位错构造类型及流变特征、及超微构造与差异应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$.

岩样透射电镜照片超微构造分析表明,主边界剪切带的石英位错亚构造以线位错为主,并常见位

错环、位错弓弯、位错链、位错列、位错网及亚晶粒等构造型式颗粒等.石英超微位错构造总体反映的是中温-低温塑性变形环境.石岛剪切带、荣成剪切带、牟平剪切带的古差异应力值呈现逐渐降低的趋势,跟温度呈反相关的关系.

2.2.2 岩石有限应变分析

为了说明应变的属性,根据定向岩样镜下变形石英长短轴比率的测量结果进行了付林值的计算.将付林值填进图 1(2),可见主剪切带的付林值在 0.6~0.75 之间.这说明变形主要是压扁型应变,且可能经历了简单剪切应变和纯剪切应变共同作用.海阳所附近有一付林值为 1.5 的情况,说明可能存在局部伸展变形.从变形石英轴比和付林值分布来看,石岛剪切带石英韧性变形程度比荣成剪切带的变形程度高.

2.2.3 石英光轴组构动力学分析

前面分析的研究区的岩组学几何学和运动学特征(图 1(3))主要反映中温和低温为主的构造环境,温度在 300~500℃ 左右.由于极密值的大小与岩石的应变变量有关,最大极密值可以反映岩体的变形程度.所以,根据表 3,得到的主要剪切带的岩石韧性变形序列:石岛剪切带>荣成剪切带>牟平剪切带>米山剪切带.

从上述几何学、运动学、应力和应变构造特征来

表 2 逆冲推覆构造岩样显微镜描述、石英位错构造类型及流变特征、及差异应力值

构造部位代号	地点样号	显微构造特征与样品定名 ^{a)}	超微位错构造类型	亚晶粒边界类型	流变学特征	照片数目	自由位错/cm ⁻²	差异应力/MPa
SDS	海阳所 01120710	原生矿物: Qz. 新生矿物: Ms 和 Se. 结构: 糜棱状. 构造: 碎斑不规则, 直径 0.5 mm 以上; Qz 波状消光, Ms 见膝折, 矿物具弱定向. 定名: 石英云母片岩.	平直的位错线, 偶见位错环	位错线	中温	4	2.533×10 ⁸	105
	前岛 01120903	原生矿物: Qz 和 Bi. 新生矿物: Ms. 结构: 中粒变晶. 构造: Qz 波状消光、亚晶粒构造发育、定向排列, Ms 自型但定向排列. 定名: 二云石英片岩.	长短不一, 弯曲、方向杂乱的位错线, 可见位错环、位错网、位错链	位错壁、位错线	中温	18	2.413×10 ⁸	102
	镁邹岛 01121004	原生矿物: Pl, Qz 和 Bi. 新生矿物: Se 和黄铁矿. 结构: 不等粒变晶. 构造: Pl, Qz 波状消光, Pl 普遍发育机械双晶, Qz 普遍发育变形纹, Bi 弱变形但具定向性, 总体具片麻状构造. 定名: 黑云母花岗质片麻岩.	弯曲、长短不一、方向杂乱的位错线, 可见位错环	位错线、位错壁	中温	22	2.392×10 ⁸	102
RCN	大时家 01120907	原生矿物: Pl, Qz, Bi 和 Hb. 结构: 自形-半自形不等粒变晶. 构造: Pl 机械双晶变形, Qz 亚晶粒构造. 定名: 花岗质片麻岩.	长短不一, 弯曲、方向杂乱、纠结的位错线, 可见位错环、位错网、位错链、位错壁	位错壁、位错线	中高温	20	2.727×10 ⁸	109
RCS	西龙家 01121007	原生矿物: Or, Pl, Qz 和 Bi. 新生矿物: Se 和黄铁矿. 构造: Qz 和部分长石发生破裂变形; 片麻状构造: Qz 波状消光且拉长定向, 见云母鱼. 定名: 碎裂花岗质片麻岩.	长短不一, 弯曲的位错线, 可见位错网、位错列、位错环	位错线	中温	22	2.267×10 ⁸	99
MPS	上庄西 01121402	原生矿物: Mi, Pl 和 Qz. 新生矿物: Bi 和 Se. 构造: 见 Mi 格子双晶、Pl 聚片双晶或简单双晶, 其上有蠕虫状石英发育, 呈现交代蠕虫结构, 颗粒间弧形接触, 具变余花岗岩结构; Pl 和 Qz 波状消光; Bi 呈定向排列、多具平行四边形, Qz 颗粒拉长、部分亚晶粒构造发育, Qz 与 Bi 接触面见压溶现象. 定名: 黑云花岗片麻岩.	光滑的位错线为主, 亦见位错环、树枝状位错、位错壁	位错线	中低温	22	1.742×10 ⁸	87

a) 矿物代号: Qz-石英; Pl-斜长石; Or-正长石; Mi-微斜长石; Ms-白云母; Bi-黑云母; Se-绢云母; Hb-角闪石

表 3 根据石英光轴组构图统计的最大主压应力方向及最大极密值一览表

剪切带名称	样品号	最大主压应力方向	最大极密值/%
石岛剪切带	01120708	N-S; SE-NW	9
	01120710	N-S; E-W	7
	01120904	N-S; E-W	13
	01120905	N-S; NW-SE	4
	01120907	N-S	5
	01121003	N-S; E-W	5
	01121004	NNW-SSE; ENE-WSW	5
	01121006	NNE-SSW; NE-SW	3.4
荣成剪切带	01121007	N-S; NNW-SSE	4.9
米山剪切带	01121406	EW	3.1
牟平剪切带	01121402	NW-SE	4

看,胶东东部的边界剪切带是韧性剪切带,其代表深度是 10 km 以下。如今地震剖面证明 16 km 以下剪切带才会合到一起^[9],因此推测剪切带会合点在剪切带启动时深度达 26 km 以下。这足以证明其缩短抬升剥蚀的显著效果。单纯的走滑和小规模的挤压不可能形成如此的缩短效果,但大规模逆冲推覆能够实现。

3 胶东东部⁴⁰Ar/³⁹Ar构造年代学研究与中国中生代构造演化探讨

为了评价主要边界剪切带和岩浆活动的时代的热响应以及推覆体的构造-热演化历史,作者进行了胶东东部⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素构造年代学研究,其具体测试分析过程另文发表。为避免重复,这里只引用其年龄数据分析结果。研究区的⁴⁰Ar/³⁹Ar测年结果可以分为两期变形年龄:早期为 190 Ma 左右,以大时家和泽头东的年龄数据为代表,样品位于推覆体内;晚期为 120~130 Ma 之间,样品分布于各个边界剪切带内(图 1 和 3)。

前者代表了推覆体的构造热活动(300~500℃),即逆冲推覆体大约形成于相当扬子-中朝陆块的拼合后的第一次重要活动时期,接近于郯庐断裂带的启动^[11~17]和甲子山岩体的形成时代^[21]。显然,当时整个胶东东部都处于这次热活动控制之下。

而后者则代表了主边界剪切带的走滑推覆热活动(300~500℃),该期活动叠加或抹掉了早期的变形;热事件在推覆体上可能只显示脆性剪切变形证据(温度低于 300℃)。从区域构造特征来看,胶东东部的构造体系相当于郯庐左行右阶式走滑断裂带的拖尾压性叠瓦扇,至少在浅部层次产生了走滑挤压应力场。此时,伸展作用在深部可能已经启动,这就是研究区构造转折的开始阶段。如成矿年代学研究表明胶东地区超大型金矿形成于(120±10) Ma^[18,19]。又如研究区西部莱阳盆地青山组火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar全岩年龄为 108~110 Ma^[20]。均稍晚于边界剪切带的主活动期。说明胶东东部的挤压剪切活动及随后的火山-岩浆热液活动可能共同促进了胶东超大型金矿的形成。

区域上,根据⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素年龄值、构造特征、岩浆作用事件^[21]共同分析可知,该演变过程可能伴随了由大规模中下地壳深度的推覆-剥蚀作用到韧性

走滑逆冲作用的转变过程,反映了整个地区在中生代的冷却过程,同时折射出中国东部中生代的构造转折过程。边界剪切带晚期走滑逆冲作用表现为较强烈的韧性变形,显然受到大量发育的局部同构造岩浆热液的影响。

本文得到的胶东东部中生代的构造演化过程(图 3)如下:

(1) 三叠纪末(约 210~180 Ma),扬子陆块与华北陆块发生碰撞,扬子陆块经历了俯冲阶段和快速折返阶段^[22],在如今地震纵剖面上显示鳄鱼嘴状交叠结构^[9],此时研究区及其附近出现大规模逆冲推覆运动。在胶东东部,一系列枢纽近东西向的褶皱、边界剪切带的地表发育的强烈NNW向逆冲推覆运动学标志以及推覆体的 190 Ma 的构造年代学数据,都说明了此阶段胶东东部逆冲推覆构造的发育。在本阶段,研究区还发育有甲子山岩体(209 Ma)^[21]。SSE-SE向拉伸线理(约 190 Ma, 本文)相当于碰撞后快速折返阶段,其时代当置于本文讨论的断裂系的构造演化的第一阶段。逆冲推覆的结果是使胶东东部及周缘出现了地壳增厚。

(2) 侏罗纪-早白垩世(约 180~130 Ma),研究区可能主要处于伸展期。宏观上发育有一系列花岗岩体,如文登岩体(161 Ma)^[21]、昆嵛山岩体南部(173 Ma)^[21]和昆嵛山岩体北部(138 Ma)^[21]。地球化学研究表明,胶东地区下地壳以富Si, I_{sr}, 低 $\epsilon_{Nd}(t)$ 和高的T_{DM}为特征,是偏中性和富钾的,特别地,昆嵛山岩体更有埃达克质岩特征,这反映出胶东地区中生代具有高原特征^[23,24]。

(3) 早白垩世(130~120 Ma),胶东东部挤压走滑运动时期。这跟郯庐断裂的左行平移时间^[12~14]可能是一致的。各个边界剪切带活动时期虽然接近但是也存在先后次序。按照不同剪切带的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄值可以大致推断出胶东东部主剪切带的活动时间依次为石岛剪切带(~126 Ma)→荣成剪切带(~124 Ma)→牟平剪切带(~123 Ma)→米山剪切带(~120 Ma)。之所以把米山剪切带置于最后是因为,从米山剪切带的显微构造及组构特征来看,不类其余三条剪切带,它的显微韧性变形叠加了晚期浅层次碎裂变形,具有多期次、高强度的构造运动特征。所以,米山剪切带的

活动时期,很可能持续到了挤压体制与伸展体制交替的时期。推测挤压/伸展体制基本在 120 Ma 左右即米山剪切带活动时期发生转换。前三个阶段表现为胶东东部逆冲推覆构造的背驮式(前展式)特点,第四个阶段表现为上迭式(后展式)特点(图 3(3))。

走滑逆冲作用的显著效果是出现推覆体的逆时针旋转效应。此时,华北地区的岩石圈发生了减薄^[18];此后的伸展剪切作用可能是胶东胶莱盆地边缘产生大规模金矿富集的原因。此时北部相邻的辽东地区出现了 ENE-WNW 向伸展的变质核杂岩^[25]。

(4) 晚白垩世以后(约 120 Ma~),原来的挤压应力场消失,大规模逆冲推覆和走滑逆冲运动结束;隆起的高原开始发生重力滑塌和伸展,出现了一系列 A 型花岗岩和断陷盆地沉积。

胶东东部中生代逆冲推覆构造与郯庐断裂带发育有密切联系。在山东地区,郯庐断裂带东、西两盘的左行走滑量为 390 km 左右,而在辽宁地区,郯庐断裂带东、西两盘的走滑量仅为 150 km 左右^[17],也从大地构造尺度印证了郯庐断裂带中间地带大规模缩短作用与走滑作用并存的现象。胶东推覆推覆构造时代与郯庐断裂带的第一期走滑事件时代吻合、运动学相容,可吸收或调节部分郯庐断裂带的走滑运动量,从而导致了郯庐断裂带北段走滑量较之郯庐断裂带南段的显著变小。

4 结语

本文多尺度相结合地探讨了胶东东部中生代逆冲推覆构造的分布特征、几何学和运动学条件、构造年代学规律,在此基础上结合中生代区域构造运动的空间分布特点,重新认识了胶东东部中生代的逆冲推覆构造演化规律。

胶东推覆推覆构造时代与郯庐断层的第一期走滑事件时代吻合、运动学相容,可吸收或调节部分郯庐断裂带的走滑运动量,解释该断裂带北段走滑量的显著变小。

致谢 在野外工作中山东省第四地质调查院张希道高级工程师、在透射电镜实验中中国地质科学院陈方远高级工程师、北京大学陈晶老师、在显微构造的解释方面中国地震局地质所林传勇研究员和中国地质

大学(北京)刘俊来教授、在年代学部分中国地质科学院王宗起研究员等都对作者给予了热忱指教,提出了具体的修改意见,作者谨向上述学者致以衷心的感谢。此外,作者还要感谢翟明国、郭敬辉、肖文交、郑亚东等专家、教授的鼓励与指教以及匿名审稿人的宝贵修改意见。

参 考 文 献

- 1 张丕建,赵运伦. 文-威地区胶南造山带根部的韧性剪切系统. 山东地质, 1997, 13(2): 10-18
- 2 王世进,张成基. 胶南造山带形成与演化. 山东地质, 1997, 13(1): 12-22
- 3 翟明国,从柏林,郭敬辉,等. 苏鲁造山带东北端石榴辉石麻粒岩的 Sm-Nd 同位素年代学及其大地构造含义. 地质科学, 1999, 34(3): 301-310
- 4 翟明国,郭敬辉,王清晨,等. 苏鲁变质带北部的岩石构造单元及结晶块体推覆构造. 地质科学, 2000, 35(1): 16-26
- 5 林伟, Faure M, 王清晨. 胶东半岛中生代构造演化的几何学和运动学. 地质科学, 2003, 38(4): 495-505
- 6 叶凯,从柏林,平岛崇男,等. 山东海阳所麻粒岩向过渡榴辉岩转化的变质动力学过程及其构造意义. 岩石学报, 1999, 15(1): 21-36
- 7 叶凯,从柏林. 荣成滕家集超高压变质钙硅酸盐岩的岩石学研究. 科学通报, 1995, 40(8): 730-733
- 8 杨敏之,吕古贤. 胶东绿岩带金矿地质地球化学. 北京: 地质出版社, 1996. 1-228
- 9 Xu P, Liu F, Ye K, et al. Flake tectonics in the Sulu orogen in eastern China as revealed by seismic tomography. Geophys Res Lett, 2002, 29: X1-X4
- 10 Weathers M S, Bird J M, Cooper R F, et al. Differential stress determined from deformation-induced microstructures of the Moine thrust zone. J Geophys Res, 1979, 84(B13): 7495-7509
- 11 徐嘉炜,马国锋. 郯庐断裂带研究的十年回顾. 地质论评, 1992, 38(4): 316-324
- 12 陈宣华,王小凤,张青,等. 郯庐断裂带形成演化的年代学研究. 长春科技大学学报, 2000, 30(3): 215-220
- 13 朱光,宋传中,王道轩,等. 郯庐断裂带走滑时代的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究及其构造意义. 中国科学, D辑, 2001, 31(3): 250-256
- 14 朱光,王道轩,刘国生,等. 郯庐断裂带的伸展活动及其动力学背景. 地质科学, 2001, 36(2): 269-278
- 15 王瑜. 郯庐断裂带形成演化的年代学证据及其动力学分析. 见: 从柏林,翟明国,郭敬辉等编. “大陆的俯冲、拆离和减薄作用学术研讨会”论文摘要集. 西安: 西北大学, 2001. 73-75
- 16 朱光,刘国生, Dunlap W J, 等. 郯庐断裂带同造山走滑运动的⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学证据. 科学通报, 2004, 49(2): 193-198
- 17 万天丰,朱鸿. 郯庐断裂带的最大左行走滑断距及其形成时期.

- 高校地质学报, 1996, 2(1): 14—27
- 18 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限. 中国科学, D 辑, 2003, 33(10): 913—920
- 19 周新华, 杨进辉, 张连昌. 胶东超大型金矿的形成与中生代华北大陆岩石圈深部过程. 中国科学, D 辑, 2003, 32(增刊): 11—20
- 20 邱检生, 王德滋, 罗清华, 等. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年-以五莲分岭山火山机构为例. 高校地质学报, 2001, 7(3): 351—355
- 21 郭敬辉, 陈福坤, 张晓曼, 等. 苏鲁超高压带花岗岩类成因与碰撞后构造过程——锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究. 见: 从柏林, 翟明国, 郭敬辉等编. “大陆的俯冲、拆离和减薄作用学术研讨会”论文摘要集. 西安: 西北大学, 2001. 99—102
- 22 李曙光, 黄方, 李晖. 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离. 科学通报, 2001, 46(17): 1487—1491
- 23 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 2001, 36(2): 248—255
- 24 张旗, 王焰, 王元龙. 燕山期东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nb 同位素制约. 岩石学报, 2001, 17(4): 505—513
- 25 Liu J, Davis G A, Lin Z, et al. The Liaonan Metamorphic Core Complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A Likely Contributor to Cretaceous Rotation of Eastern Liaoning, Korea and Contiguous Areas. *Tectonophysics*, 2005, 407(1-2): 65—80 [\[DOI\]](#)