内蒙古赤峰娄子店-大城子韧性剪切带的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其构造意义

张晓晖^① 李铁胜^① 蒲志平^② 王 辉^①

(①中国科学院地质与地球物理研究所中国矿产资源探查研究中心, 北京 100101; ②中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510560.
E-mail: zhangxh71@sina.com)

摘要 娄子店正断层构成喀喇沁变质核杂岩的东侧基底剥离断层. 野外构造解析和显微构造分析表明, 娄子店正断层下盘岩石中的娄子店-大城子韧性剪切带主要表现为左行正斜滑的运动特征. 采自该剪切带的 2 个单矿物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄分别为 133 Ma(黑云母)和 126 Ma(钾长石), 与对应的等时线年龄一致. 其中黑云母坪年龄 133 Ma 记录了左行走滑韧性剪切带的形成时间. 娄子店正断层所表现的晚期正断伸展与其下盘岩石中的韧性剪切带所表现的左行走滑之间的不一致性使喀喇沁(准)变质核杂岩有别于科迪勒拉型变质核杂岩. 本次研究结果为精确限定这类韧性剪切带的形成时代及其成因提供了重要的年代学资料.

关键词 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄 左行走滑 娄子店-大城子韧性剪切带 变质核杂岩

娄子店-大城子韧性剪切带属区域性八里罕-红山断裂带之南段, 长约 100 km. 近期研究^[1,2]确认沿该韧性剪切带顶部发育的大规模低角度正断层构成喀喇沁变质核杂岩东侧的基底剥离断层. 采自该山前正断层的两个断层泥样品的 K-Ar 测年结果(分别为 65.3 和 71.1 Ma)表明娄子店正断层形成于晚白垩世的伸展事件^[2]. 而对于其下盘岩石中的韧性剪切带, 王玉芳等人^[3]和王时麒等人^[4]研究认为, 该剪切带经历左、右行平移滑动以及逆断和正断等多期次的剪切运动. 近期研究揭示^{[2] 1)}, 娄子店正断层下盘岩石中的韧性剪切糜棱岩带表现为面理高角度的走滑带, 拉伸线理和相关 a 型褶皱都近于水平, 不同地区观察到的宏微观不对称眼球和钾长石残斑及 S-C 组构所记录的运动学标志均指示左旋剪切. 石英光轴组构图也主要反映正-左行斜滑的滑移机制^[5]. Han 等人^[2]据此推测其可能与晚白垩世之前的区域左行走滑事件有关, 而与晚白垩世中国东部普遍存在的区域地壳伸展事件关系不大. 正断层晚期正断伸展与下盘岩石中韧性剪切带早期左行走滑之间的这种不一致性是喀喇沁(准)变质核杂岩(quasi-metamorphic core complex)^[2]有别于科迪勒拉型变质核杂岩的重要特征. 因此, 精确厘定娄子店-大城子韧性剪切带的形成时代, 对于认识与晚期伸展不一致的早期左行走滑剪切带的发育时限, 进而对于探讨燕山造山带

发育的这类(准)变质核杂岩的形成机制具有重要意义.

国内外众多成功实例^[6-8]表明, 选择糜棱岩中含钾矿物(黑云母、白云母、钾长石等)进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 法定年已成为测定剪切带形成时间的理想方法. 因此, 我们在发育北北东向左行走滑剪切带的典型地段选择了代表性的糜棱岩岩石样品进行 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年, 并根据测年结果探讨这类韧性剪切带的成因及其构造意义.

1 地质背景和样品

娄子店-大城子韧性剪切带所在的马鞍山隆起位于华北克拉通北缘, 该隆起呈北北东向长垣状展布于内蒙古赤峰市南部地区, 长约 100 km, 宽约 35 km (图 1). 隆起核部由太古代(>2.5 Ga)高绿片岩相-低角闪岩相片麻岩、大理岩及 TTG 岩石、早元古代低绿片岩相片岩和大理岩、晚元古代明安山群板岩、寒武纪结晶灰岩、早二叠世~中侏罗世侵入岩以及早白垩世花岗岩等组成. 隆起东西两侧主要由中生界侏罗-白垩系碎屑岩、火山碎屑岩组成. 主断层面倾向南东的娄子店正断层构成该隆起的东界, 将西部下盘的核部变质杂岩与东部上盘未变质的中生界和新生界沉积盖层分隔开来. 地表断续出露的主断面产状为 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\angle 20^{\circ}\sim 40^{\circ}$. 主断面之上有 20 余米断层泥, 主断面上发育的稳定倾向擦线(倾伏向 $S46^{\circ}E$, 倾伏

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-12-951>

1) 中国科学院地质与地球物理研究所, 内蒙古喀喇沁旗金蟾山金矿. 内蒙古喀喇沁金蟾山金矿成矿规律和找矿预测研究. 2000

图 1 喀喇沁地区地质构造简图(据文献[2]修改)

角 38°)的钉头痕、与擦痕直交的张裂隙以及断层泥中发育的似 S-C 组构均指示正断式运动^[1~4]。主断面之下存在一套厚约数十米至 200 余米的角砾岩和碎裂岩带。这些断层岩的原岩主要为其下伏娄子店-大城子韧性剪切带中的糜棱片麻岩和糜棱岩。这条北北东向韧性剪切带主要发育在太古界大营子组变质杂岩及大营子花岗岩体东部边缘,出露宽约 5~7 km。近期研究揭示^[1],受韧性剪切带改造影响的太古代变质岩先后叠加以 3 期不同的面理:早期在角闪岩相变形过程中形成的片麻理、因中-下地壳拆离滑脱形成的糜棱片麻岩所发育的低角度糜棱面理以及因中-上地壳左行走滑形成的糜棱岩所发育的高角度糜棱面理。其中,早期糜棱面理在大城子一带的稳定产状为

$120 \sim 130^{\circ} \angle 20 \sim 30^{\circ}$, 拉伸线理产状为 $100 \sim 130^{\circ} \angle 20 \sim 30^{\circ}$ 。这套糜棱片麻岩主要由带状石英、细粒动态重结晶的正长石和微斜长石、发育核幔构造的斜长石及其残碎斑晶组成。太古代变质岩中发育得最稳定、透入性也最好的晚期高角度面理明显切割早期低角度糜棱面理,该套面理还穿切锅底山印支期花岗岩(U-Pb 锆石年龄 $(253 \pm 3) \text{ Ma}$ ^[9]),沿娄子店-大城子一带的稳定产状为 $110 \sim 120^{\circ} \angle 40 \sim 50^{\circ}$,其上发育一套近水平的走向滑动线理。该套剪切带内发育的变形岩石主要有长英质糜棱岩、黑云斜长质糜棱岩和糜棱岩化黑云母花岗岩。在显微尺度上,这些糜棱岩以长石的脆-弹性变形和石英的晶质塑性变形及同构造重结晶作用为典型特征。线理构造主要由定向排

列的长石碎斑、拔丝石英或细小绢云母构成。不同地区观察到的宏微观不对称眼球和钾长石残斑及 S-C 组构所记录的运动学标志均指示左旋剪切^[2]。剪切带北东段中的石英光轴组构图反映正-左行斜滑略强的高温低压柱面滑移组构，南西段中的石英光轴组构反映左行运动略强的低温底面滑移组构^[5]。

我们在小五家北 5 km，剪切带出露极好，糜棱岩中的宏观不对称眼球清楚指示左旋剪切的喇嘛沟一带采集了本次测试的样品，其中样品 KL2000-61 采自喇嘛沟西侧山头附近(41° 53'08″，118° 58'95″)的长英质糜棱岩，其主要组成矿物为斜长石、钾长石、石英和黑云母。样品 KL2000-67 采自于喇嘛沟口附近(41° 53'52″，118° 59'63″)的黑云斜长质糜棱岩，主要组成矿物为黑云母、斜长石、石英、白云母和褐帘石等。两样品矿物粒度均小于 0.3 mm。长石主要呈残斑，斜长石残斑斑晶内部的双晶纹发生扭折并伴有晶格方位变化而呈现带状消光，仅在边缘出现少量动态重结晶的新晶粒；钾长石主要表现为脆性变形，显微破裂发育并经受轻度绢云母化。石英呈现

两种形态，一是残留早期韧性变形而发育的较粗大的带状石英，二是呈细小晶粒的动态重结晶石英；带状石英(大部分均已动态重结晶成细小晶粒)呈透镜状，由绢云母条带环绕。黑云母呈细小鳞片状和较大的片状，均具定向性，较粗大的黑云母具鱼状形态，黑云母鳞片呈斜向排列。

2 测定方法和结果

岩石样品经粉碎细磨、磁选和重液分离后，在双目显微镜下分别挑选出无蚀变的钾长石(样品 KL2000-61)和黑云母(样品 KL2000-67)单矿物，纯度达 99%之上。样品用铝箔包裹，锡箔屏蔽，与参考标准样品 ZBH-25 黑云母一起置中国原子能科学院游泳池反应堆进行照射，样品质量 0.2 g，照射时间 55 小时，积分中子通量为 9×10^{12} n/cm² · s，照射参数 *J* 为 0.0123。Ar 同位素分析仪器为 MM1200 气体源质谱仪，测定由中国科学院广州地球化学研究所完成。实验方法和实验过程中所采用的参数详见文献[10,11]。测定结果示于表 1 和图 2 中。

表 1 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 分析数据

加热阶段	<i>T</i> /℃	³⁹ Ar/%	⁴⁰ Ar [*] /%	³⁹ Ar/ ³⁶ Ar	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	视年龄 <i>t</i> / Ma (± 1 σ)
样品 1: KL2000-61, 钾长石							
1	360	0.17	25.42	33.61	396.32	24.34	71.04 ± 72.07
2	520	0.46	55.66	118.12	667.50	9.74	74.51 ± 17.36
3	680	11.37	95.85	1362.50	7346.04	0.23	120.85 ± 0.39
4	750	12.74	99.17	8055.05	42391.86	0.63	122.01 ± 0.39
5	810	7.95	98.02	2969.12	15989.53	0.48	123.35 ± 0.65
6	870	7.59	93.88	854.89	4920.82	0.52	126.16 ± 0.66
7	930	7.84	89.38	458.35	2808.90	0.58	127.81 ± 0.69
8	980	8.38	92.05	631.03	3769.59	0.52	128.30 ± 0.56
9	1030	6.55	91.25	566.13	3419.07	0.86	128.57 ± 0.79
10	1130	16.44	88.54	418.43	2601.04	0.34	128.40 ± 0.34
11	1190	16.89	88.33	412.45	2554.22	0.40	127.65 ± 0.31
12	1340	3.63	85.54	320.59	2056.80	1.85	128.04 ± 1.51
<i>t_f</i> = (126 ± 3) Ma, <i>t_p</i> = (126 ± 3) Ma (3~12 步), 等时线年龄 <i>t_{Bi}</i> = (123 ± 3) Ma, <i>R</i> = 0.9996							
样品 2: KL2000-67, 黑云母							
1	360	0.49	0.33	4.71	296.47	63.39	4.27 ± 7.05
2	520	4.49	21.71	16.33	377.46	6.10	101.67 ± 3.73
3	600	15.48	50.00	44.38	591.38	1.86	133.88 ± 0.84
4	680	6.99	57.40	61.14	694.31	1.02	131.09 ± 1.60
5	750	24.41	87.63	319.27	2405.98	0.56	132.78 ± 0.50
6	810	7.58	87.30	325.22	2342.54	2.22	126.65 ± 1.83
7	870	4.82	83.99	246.32	1855.32	2.80	127.39 ± 2.43
8	930	3.04	88.41	326.72	2566.68	4.11	139.38 ± 4.91
9	1070	15.85	84.64	244.87	1933.57	0.75	134.31 ± 0.69
10	1340	16.86	80.69	185.04	1536.10	0.12	134.60 ± 0.66
<i>t_f</i> = (131 ± 3) Ma, <i>t_p</i> = (133 ± 3) Ma (3~10 步), 等时线年龄 <i>t_{Bi}</i> = (134 ± 3) Ma, <i>R</i> = 0.9962							

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2002-47-12-951>

图 2 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄谱: 钾长石(a)、黑云母(c)及等时线: 钾长石(b)、黑云母(d)

3 讨论

3.1 样品年龄解释

两个样品单矿物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 阶段加热法得出的年龄谱显示, 样品 KL2000-61 的 3 ~ 12 加热阶段的数据组成了较好的坪年龄 $t_p = (126 \pm 3)\text{Ma}$ (图 2(a)), 其所占 $^{39}\text{Ar}_k$ 析出量达 99.37%. 计算所得等时线年龄为 $(123 \pm 3)\text{Ma}$ (图 2(b)), 相关系数 $r = 0.9996$; 样品 KL2000-67 的 3~10 加热阶段的数据组成了较好的坪年龄 $t_p = (133 \pm 3)\text{Ma}$ (图 2(c)), 其所占的 $^{39}\text{Ar}_k$ 析出量为 95.02%. 计算所得等时线年龄为 $(134 \pm 3)\text{Ma}$ (图 2(d)), 相关系数 $r = 0.9962$. 两个样品的坪年龄值都与其等时线年龄相当一致. 高于 95% 的 $^{39}\text{Ar}_k$ 释放量和坪年龄值与等时线年龄的基本一致表明坪年龄值的有效可靠性. 从初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值来看, 样品 KL2000-61(钾长石)的初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 323.3, 略高于尼尔值(295.5 ± 5), 说明该钾长石可能存在过剩氩. 样品 KL2000-67(黑云母)的初始 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 286.6, 与尼尔值(295.5 ± 5)基本一致, 表明无显著的氩丢失.

行走滑运动特征的韧性剪切带内的特征岩石, 黑云母和钾长石都表现出无扰动的年龄谱特征. ^{40}Ar - ^{39}Ar 法测年原理^[12]表明, 矿物坪年龄是 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素体系在各单矿物冷却至相应矿物的封闭温度时记录的. 从现有资料来看, 尽管单矿物 ^{40}Ar - ^{39}Ar 封闭温度在不同地质背景下有差异并受多种因素影响, 下列估算温度值在大多数情况下仍是有效的: 黑云母为 $300 \sim 350^\circ\text{C}$ ^[12], 钾长石为 160°C ^[13]. 结合我们的测年结果: 冷却至黑云母封闭温度的年龄为 $(133 \pm 3)\text{Ma}$, 冷却至钾长石封闭温度的年龄为 $(126 \pm 3)\text{Ma}$, 据此可以定量地确定剪切带在 $133 \sim 126\text{Ma}$ 期间的冷却速率为 $20 \sim 27^\circ\text{C}/\text{Ma}$. 假定以 $25^\circ\text{C}/\text{km}$ 作为地热梯度, 则在 7Ma 时间内上升了 5.6km , 抬升速率大致为 $0.8\text{mm}/\text{a}$, 属较快的抬升速率. 另一方面, 从所测样品的岩石学特征来看, 石英丰富的塑性变形和长石的脆-弹性变形特征说明左行走滑韧性剪切带内的糜棱岩形成于绿片岩相条件^[14], 对应的温度大致为 $300 \sim 350^\circ\text{C}$ ^[15]. 此温度范围与黑云母的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 封闭温度基本一致. 这就从地质上提出了有力佐证: 所测定的黑云母坪年龄是姜子店-大城子左行走滑韧性剪切带的形成时间.

所测样品均来自发育低角度走向线理并具有左

3.2 构造意义

娄子店-大城子韧性剪切带与其顶部娄子店正断层所发育的韧性到脆性系列变形岩石记录了该区变质基底持续抬升冷却的变形历史。早期发生在 18 ~ 20 km 的地壳深处、绿帘石-角闪岩相($T = 450 \sim 550^{\circ}\text{C}$, $P = 0.54 \text{ GPa}$)^[1]环境下的拆离滑脱和卸载抬升^[3], 形成了糜棱片麻岩系列; 中上地壳北北东~北东走向的左行走滑发生在这一拆离抬升过程的晚期, 形成了绿片岩相条件下的糜棱岩系列。早期糜棱片麻岩和晚期糜棱岩面理上大体都呈北东走向, 但前者缓倾斜, 以发育低角度倾向线理和正断滑覆(主要形式)为特征; 而后者陡倾, 以发育低角度走向线理和左行走滑为特征。最后, 随着韧性剪切带的抬升剥离, 在地壳浅部层次, 多组正斜滑性质的低角度脆性断层继承并改造上述形成于地壳不同深度的韧性剪切带, 形成角砾岩、碎裂岩和断层泥等不同类型的断层岩。上述从中下地壳层次形成的糜棱片麻岩, 到中上地壳层次形成的糜棱岩, 再到地壳浅部层次形成的各类断层岩的构造岩演化系列, 体现了这一抬升过程不同阶段构造性质和区域动力学体制的改变。除形成早期糜棱片麻岩的主期伸展滑脱事件的时限尚有待深入研究之外, 对于娄子店山前正断层所代表的大规模伸展正滑事件, 据采自该断层的两个断层泥样品的 K-Ar 测年结果(分别为 65.3 和 71.1 Ma)表明其形成于晚白垩世^[2]。而对于糜棱岩形成过程的左行走滑剪切, 本次研究结果提供了其发生在早白垩世的年龄证据。以上年龄证据明确揭示, 早白垩世形成的娄子店-大城子左行走滑韧性剪切带和形成于晚白垩世的娄子店正断层无关, 分属不同的构造事件。

近期针对喀喇沁变质核杂岩隆升机制的研究初步揭示, 岩石圈的伸展减薄与岩浆底劈热隆是其形成的两个重要地质因素^[1]。该区二叠纪、三叠纪和早、中侏罗世花岗岩的存在体现自晚古生代起的强烈岩浆作用。以早中生代堆晶岩^[16]和麻粒岩包体^[17]所体现的早中生代的底侵作用为始, 中三叠世中期~中侏罗世为岩浆热隆的主活动期, 进而引起地壳的伸展减薄。从我们实际测得的剪切带形成年龄来看, 与该区发育的早白垩世花岗岩体的年龄基本一致, 如安家营子环状花岗岩系——外环宫家营子角闪黑云

石英二长花岗岩(锆石 U-Pb 年龄为 141.4 Ma)^[2]和松树梁闪长岩(微量锆石 U-Pb 年龄为 $(142 \pm 2) \text{ Ma}$)^[2]、内环粗粒似斑状二长花岗岩(微量锆石 U-Pb 年龄为 $(132 \pm 5) \text{ Ma}$)^[1]。同时, 北西和北东两组控岩构造的存在暗示岩体侵位时存在左旋剪切作用派生的变形构造^[1]。同构造期岩体年龄和剪切带形成年龄的一致性说明左行剪切上隆取代早期的热隆作用而在地壳伸展过程中占据主导地位。喀喇沁变质核杂岩运动学的研究已证实核杂岩伸展过程中伴有普遍的左旋剪切作用^[1]。这种区域动力学体制的转变直接引起早白垩世幔源-壳幔混合型双峰式火山岩沿北北东向韧性剪切带部位喷发、溢流。从时间联系来看, 北北东向而与其东部郯庐断裂近于平行、运动性质也同属左旋走滑的娄子店-大城子韧性剪切带, 本次测年结果与朱光等人^[18]近来根据 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年结果得出郯庐断裂带大规模左行平移发生在早白垩世的结论基本一致, 也与邻区辽西医巫闾山地区北北东向左行走滑伸展型韧性剪切带的形成时间基本一致^[19], 暗示该剪切带的形成与以 NNE 走向郯庐断裂带为代表的区域走滑事件有关。该结论支持 Han 等人^[2]的推测。而形成于晚白垩世的娄子店正断层, 其区域动力学背景则隶属于晚白垩世中国东部普遍存在的地壳伸展断陷。正是这种多阶段构造环境各异的抬升冷却过程, 可以解释平庄断陷盆地东侧还有太古代片麻岩出露的事实。

马鞍山隆起包含许多与科迪勒拉变质核杂岩相似的构造要素: 核部的大型背形、包括微角砾岩带的翼部低角度正断层、下盘的糜棱和非糜棱片麻岩组合以及上盘未变质的表壳岩及其前寒武系基底^[1,2,20]。但沿娄子店正断层及紧邻其下的绿泥石角砾岩带表现为比较均一的正断倾滑运动, 而位于其下盘的剪切带所发育的剪切指向标志则指示一致的左行剪切运动, 这种韧性剪切带与正断层间地质关系的不一致性是其有别于科迪勒拉型变质核杂岩之处。Han 等人^[2]提出的准变质核杂岩术语比较贴切地兼容了这种异同性。走滑剪切引起变质核杂岩隆升的实例近來曾有报道^[21,22]。相似的情形也见于燕山造山带其他变质核杂岩发育地区, 据我们近期研究^[19], 体现左行走滑伸展运动特征的辽西医巫闾山北北东韧性剪切带构成了医巫闾山变质核杂岩^[23]西侧的拆离断

1) 王长秋, 辽西-赤南一带太古代变质杂岩的地质特征和矿床学, 北京大学硕士学位论文, 1989-2-951

2) 见 951 页脚注

层带. 无疑, 对这类韧性剪切带形成时代的精确限定及其成因的深入研究, 对于理解燕山造山带发育的变质核杂岩(或岩浆热隆伸展构造)及华北中生代构造演化具有重要意义. 此外, 值得一提的是, 本次研究确定的娄子店-大城子左行走滑剪切带的形成时间与喀喇沁地区金矿的成矿时代(132 ~ 126 Ma)¹⁾非常一致, 同时也与华北东部其他地区^[24,25]金矿床的形成时代基本一致, 从而暗示这类韧性剪切带在中国东部最重要的金矿化期中的重要意义.

致谢 本工作受中国科学院知识创新项目(KZCX1-07, KZCX1-Y-03-01-05)和国家重点基础研究发展规划项目(G1999043302)资助.

参 考 文 献

1 邵济安, 张履桥, 贾文, 等. 内蒙古喀喇沁变质核杂岩及其隆升机制探讨. 岩石学报, 2001, 17(2): 283~290

2 Han B F, Zheng Y D, Gan J W, et al. The Louzidian normal fault near Chifeng, Inner Mongolia: master fault of a quasi-metamorphic core complex. *International Geology Review*, 2001, 43(3): 254 ~ 264

3 王玉芳, 崔文元, 孙承志. 内蒙赤峰南部娄子店-大城子拆离断层及其构造演变. 见: 钱祥麟, 编. 伸展构造研究. 北京: 地质出版社, 1994. 99 ~ 108

4 王时麒, 孙承志, 崔文元, 等. 内蒙古赤峰地区金矿地质. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1994. 1~156

5 方曙, 朱洪森, 朱慧忠, 等. 华北地台北缘喀喇沁断隆隆升机制. 中国地质, 2001, 28(3): 5~11

6 West D P, Lux D R. Dating mylonitic deformation by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar method: An example from the Norumbega fault zone, Maine. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 120: 221~237

7 王志洪, 卢华复. 长乐-南澳韧性剪切带 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 热年代学研究. 中国科学, D 辑, 1997, 27(4): 294~299

8 Dezes D J, Vannay J C, Steck A, et al. Synorogenic extension: quantitative constraints on the age and displacement of the Zaskar shear zone (northern Himalaya). *Geological Society of American Bulletin*, 1999, 111: 364~374

9 Davis G A, Zheng Y, Wang, C, et al. Geometry and geochronology of Yanshan belt tectonics. In: Department of Geology, Peking University, ed. *Collected Works of International Symposium on Geological Science, 100th Anniversary Celebration of Peking University*. Beijing: Seismological Publishing House, 1998. 275~292

10 戴樟漠, 李正华, 许景荣, 等. 长石类 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄谱图及地

质意义研究. 地球化学, 1991, 20(4): 313~320

11 邱华宁, 彭良. ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学与流体包裹体定年. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997. 242

12 McDougall I, Harrison T M. *Geochronology and Thermochronology by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar method*. Oxford: Oxford University Press, 1999. 269

13 Dallmeyer R D. ⁴⁰Ar/³⁹Ar incremental-release ages of hornblenda and biotite across the Georgia Inner Piedman: Their bearing on late Paleozoic-early Mesozoic tectonothermal history. *Am J Sci*, 1978, 278: 124~149

14 胡玲编. 显微构造地质学概论. 北京: 地质出版社, 1998. 157

15 Wang Z H, Lu H F. Ductile deformation and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Changle-Nanao ductile shear zone, southeastern China. *Journal of Structural Geology*, 2000, 22(6): 561~570

16 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等. 内蒙古东部早中生代堆积杂岩捕虏体的发现及意义. 科学通报, 1999, 44(5): 478~485

17 邵济安, 韩庆军, 李惠民. 华北克拉通早中生代麻粒岩捕虏体的发现. 中国科学, D 辑, 2000, 30(增刊): 148~153

18 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

19 张晓晖, 李铁胜, 蒲志平. 辽西医巫闾山两条韧性剪切带的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄: 中生代构造热事件的年代学约束. 科学通报, 2002, 47(9): 697~701

20 Davis G A, Qian X L, Zheng Y D, et al. Mesozoic deformation and plutonism in the Yunmengshan: A Chinese metamorphic core complex north of Beijing, China. In: Yin A, Harrison T M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 253 ~ 280

21 MacCready T, Snoke A W, Wright J E, et al. Mid-crustal flow during Tertiary extension in the Ruby Mountains core complex, Nevada. *Geological Society of American Bulletin*, 1997, 109(12): 1576 ~ 1594

22 Wang X D, Neubauer F. Orogen-parallel strike-slip faults bordering metamorphic core complexes: The Salzach-Enns fault zone in the Eastern Alps, Austria. *Journal of Structural Geology*, 1998, 20(6): 799~818

23 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国, 等. 医巫闾山变质核杂岩构造特征. 地球学报, 1999, 20(4): 385~391

24 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 辽宁阜新排山楼金矿区岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其意义. 地球化学, 2001, 30(5): 483~489

25 杨进辉, 周新华. 胶东地区玲珑金矿矿石和载金矿物 Rb-Sr 等时线年龄与成矿时代. 科学通报, 2000, 45(14): 1547~1552

(2002-01-30 收稿, 2002-03-08 收修改稿)