

鲁西尚河韧性剪切带变形特征研究*

张尚坤¹, 王新社², 辛国金¹, 张增奇¹, 王从祥¹, 杨崇辉²

(1. 山东省地质科学实验研究院, 山东 济南 250013 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要 发育于鲁西隆起区尼山凸起内的尚河韧性剪切带, 其韧性变形在不同阶段主导变形机制不同: 初期的变形机制以晶格错位和显微破裂为主; 中期以韧性流动、物质扩散迁移为主; 晚期以晶质塑性变形和颗粒边界滑动为主。在剪切带的发育过程中, 岩石的物质成分和体积都发生了较大变化。根据构造岩的矿物组合和形变特征判断, 该剪切带具右行走滑性质, 其剪切位移量为 1048m。尚河韧性剪切带变质变形温度较低, 属绿片岩相动力变质作用。

关键词 韧性剪切带; 构造特征; 变形机制; 右行走滑; 剪切位移量; 鲁西尚河

中图分类号: P542+.3

文献标识码: A

鲁西尚河韧性剪切带地处鲁西隆起区西南部的尼山凸起内, 是鲁西地区规模较大的一条韧性变形带。该剪切带与古元古代四海山超单元侵入体关系清楚, 带中应变局部化明显, 岩石结构、构造及物质成分发生了变化, 是确定剪切带变形机制、变形条件、成分变异以及体积变化的理想构造。

1 空间几何特征

尚河韧性剪切带主体位于邹城市凤凰山以东, 跨平邑、邹城、泗水 3 县市, 东南起于临涧, 向北西经庞庄、青邑、尚河, 止于申家沟一带 (图 1), 走向 $310^{\circ} \sim 320^{\circ}$, 长约 40 km, 出露宽度为 4 km 左右, 剪切面理总体倾向 SW, 局部近直立。

尚河韧性剪切带是由多条剪切带构成的复式变形带, 内部结构复杂, 剪应变强度、构造岩及变形构造呈不对称分布, 仅局部具对称性。剪切带沿走向也表现出一定差异, 北段应变带较稀疏, 南段应变带紧密且应变强。此外, 剪切带在侧向上保存程度不同, 南西侧保留较全, 北东侧被古元古代吕梁期四海山超单元狼窝顶单元正长花岗岩穿切, 桃花岗—上石河一带正长花岗岩中保留有韧性剪切带构造岩包体, 包体应变较强, 属剪切带的强应变域。

2 构造特征

尚河韧性剪切带中发育有大量的变形构造, 这

些构造形迹是野外圈定剪切带的重要标志。

糜棱面理 是剪切带中最为显著的面状构造, 由细粒的石英、长石及暗色矿物构成的糜棱岩, 将剪切带分隔成不同强度的应变带, 平行于剪切带的边界面。糜棱面理走向 $310^{\circ} \sim 320^{\circ}$, 总体倾向 SW。

拉伸线理 剪切带低应变域中拉伸线理不发育, 强应变域中拉伸线理表现为糜棱面理上拔丝状石英、黑云母及帘石类细粒矿物集合体拉长并定向排列。拉伸线理一般近于水平, 偶见向 NW 或 SE 缓倾, 反映剪切带具走滑性质。

S-C 构造 在中等应变域中较为发育, S 面由串珠状石英及暗色矿物的斜向排列、长石偏转以及旋转显示, C 面由细粒的石英及黑云母集合体以及新生和重结晶的矿物定向排列显示。

碎斑旋转系 主要发育在初糜棱岩和糜棱岩中, 长石及石英集合体构成碎斑, 基质矿物 (细粒长石、石英、云母等) 在碎斑两侧构成压力影, 并且旋尾定向显示出 C 面。野外观察多显示为 σ 型, 反映右行剪切。

裂隙构造 主要见于长石碎斑中, 长石破裂并出现分离错位。

3 构造岩

尚河韧性剪切带主要发育在峰山超单元宁子

*收稿日期: 2002-10-25; 修订日期: 2003-01-30; 编辑: 王先起

作者简介: 张尚坤 (1968-), 男, 山东平度人, 高级工程师, 主要从事地质矿产调查评价与研究工作。

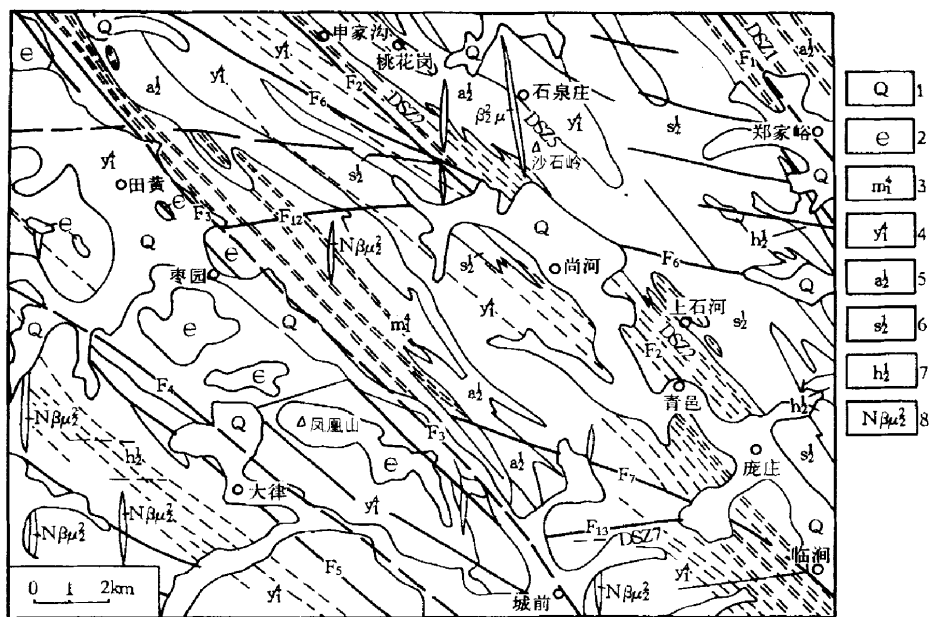


图1 鲁西尚河韧性剪切带地质略图

1—第四系 2—寒武系 3—蒙山超单元 4—峰山超单元 5—傲徕山超单元 6—四海山超单元 7—红门超单元 8—牛岗单元 ;DSZ1—郑家峪韧性剪切带 ;DSZ2—青色韧性剪切带 ;DSZ5—石泉庄韧性剪切带 ;DSZ7—三里峪韧性剪切带 ;F₁—郑家峪断裂 ;F₂—民安—临涧断裂 ;F₃—尼山—雨山断裂 ;F₄—义母山—黄土断裂 ;F₅—大烧峪—谷山断裂 ;F₆—申家沟—楼山沟断裂 ;F₇—康王—临涧断裂 ;F₁₂—代家安断裂 ;F₁₃—五块石断裂

洞单元斑状花岗闪长岩和马家河单元花岗闪长岩中,主要岩石类型有糜棱岩化岩石、初糜棱岩、糜棱岩及超糜棱岩。

糜棱岩化岩石:出现在单条剪切带的边部弱应变域中,岩石基本保留了原岩组分,宏观上可见碎斑结构。残斑主要为长石、角闪石及石英集合体,外形为椭圆状,定向排列显示出S面理,矿物定向排列构成糜棱面理。镜下长石残斑具变形结构,出现分离和剪切阶步构造;基质为细粒及微粒的长石、石英、绿帘石及片状黑云母、绢云母,定向排列,单个矿物无拉长。

初糜棱岩:与糜棱岩呈渐变过渡,糜棱面理发育,弯曲状残斑在50%以上,长石、角闪石及石英集合体呈椭圆形,拖尾现象普遍。镜下可见基质石英、黑云母、微粒长石等呈流动状态构成拖尾,表现出强烈的韧性流动,基质中矿物集合体定向排列,单个矿物尤其是黑云母、绢云母等片状矿物也出现排列定向。岩石中发育碎斑旋转系、角闪石分解及压力影构造等。

糜棱岩:是剪切带主体构造岩。岩石具碎斑结构,碎斑为长石,约占10%~50%,多呈扁豆状、椭球状,发生旋转;基质为细粒矿物集合体,定向排列构成叶理,矿物拉伸明显。镜下观察,单个矿物定向拉长,发育多晶石英条带、山羊须、云母扭折、碎斑旋转系等显微构造。

超糜棱岩:分布局限,呈断续带状,与糜棱岩呈过渡关系。岩石条痕状构造,原岩结构全部消失,具粒状变晶结构,长石、石英集集成条带,新生成的褐绿色黑云母和绢云母呈分散状分布,表明发生了静态重结晶作用,残斑很少,“漂浮”于细粒基质之中。

4 显微构造及变形机制

剪切带变形岩石中显微构造发育,这不仅是确定剪切带的重要依据,而且是岩石中矿物及其集合体对应变环境的具体反映。

波状消光:主要见于糜棱岩化岩石中,石英颗粒的消光影呈不规则带状连续掠过晶粒,消光影之间

无晶界。

边缘粒化:长石碎斑颗粒边部发生细粒化,变成椭圆状,粒化长石向两侧运移最终保存在结晶尾中。

剪切阶步:碎斑长石断开被分离成几部分,韧性基质沿裂隙楔入,使长石碎块沿剪切方向产生错移,构成剪切阶步。这种结构表明在剪切滑动的同时伴有垂直叶理的挤压作用。

多晶石英条带:动态重结晶的石英颗粒长轴互相平行构成条带,与绢云母及细小片状矿物构成的条带相间排列,环绕碎斑旋转或构成糜棱面理。它的出现表明发生了动态重结晶作用以及构造变质分异与分凝作用。

单晶石英条带:也就是拔丝石英。石英晶体被拉长,长度最大可达20 mm以上,一般在8~11 mm之间,是一种强韧性变形构造。

黑云母扭折:发育于糜棱岩之中,黑云母受到平行于解理面的挤压力发生局部扭曲。由扭折要素的方位判断,局部压应力与剪切面呈小角度斜交。

山羊须构造:多见于糜棱岩中,小片状黑云母、细粒石英定向排列。从“山羊须”主要由黑云母构成这一特点来看,可能存在应力分异作用。

压力影:角闪石两端分解成细小的黑云母及他形的绿帘石和磁铁矿,黑云母向两侧延伸构成长尾状压力影,具对称性。

碎斑旋转系:主要见于初糜棱岩和糜棱岩中,碎斑为椭圆状、扁豆状长石矿物,旋转尾由石英及小片状暗色矿物组成。旋转系主要为 σ 型,表现出右行剪切特点。

不同变形岩石中的显微构造差异是韧性变形的不同阶段主导变形机制不同的反映。分离结构、剪切阶步及石英波状消光主要发育在糜棱岩化岩石和初糜棱岩中,表明在变形初期变形机制以晶格错位和显微破裂作用为主。旋转碎斑系、压力影、山羊须、矩形边等显微构造是初糜棱岩及糜棱岩中的特征显微构造,表明这一阶段主导变形机制为韧性流动、物质扩散迁移。拔丝构造、重结晶条带及等粒状变晶结构出现在糜棱岩—超糜棱岩中,应变颗粒经过了变形—恢复—重结晶作用,表明其变形机制以晶质塑性变形和颗粒边界滑动为主^[1]。

5 剪切带变形岩石物质成分变化

在剪切带发育过程中,岩石发生了明显的结构构造变化,物质成分也发生了较大变化,主要表现在矿物组合和岩石化学成分变化上。本节以剪切带主体原岩宁子洞单元斑状花岗闪长岩的物质成分变化来论述。

剪切带以外的未变形花岗闪长岩,岩石具花岗岩结构,矿物组成为斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母等。进入变形带,长石粒化,石英亚颗粒化或变形拉长,角闪石出现分解,黑云母发生扭折,岩石粒度逐渐减小,石英、黑云母及绢云母含量逐渐增加;至强应变带,石英、绢云母、帘石矿物迅速增加,新生矿物组合为绢云母、石英、绿帘石、黑云母以及少量的钠长石。

表1 鲁西尚河韧性剪切带糜棱岩类岩石主量元素($\omega_B\%$)和微量元素(10^{-6})分析结果

岩性	样品号	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	TFe ₂ O ₃	H ₂ O	Los	SO ₃
花岗闪长岩	D202-1	15.53	64.44	4.05	2.23	0.28	3.57	4.05	0.60	0.09	5.76	0.64	2.20	0.09
初糜棱岩	D202-2	15.04	67.36	3.82	1.18	0.20	3.87	2.81	0.49	0.06	4.01	0.62	0.90	0.07
糜棱岩	D202-3	14.68	70.29	4.11	0.66	0.15	4.26	1.97	0.30	0.07	2.73	0.78	0.89	0.07
超糜棱岩	D201-1	13.44	73.01	3.43	0.55	0.10	4.38	1.55	0.24	0.07	2.33	0.72	0.89	0.09
岩性	样品号	Cu	Li	Co	Cr	Ni	Sr	V	Zn	Mo	Nb	Zr	U	Rb
花岗闪长岩	D202-1	65	22	50	25	11.0	811	89	80	0.6	7.4	39	1.4	70
初糜棱岩	D202-2	45	11	12	14	6.5	704	50	60	0.6	9.0	51	2.3	78
糜棱岩	D202-3	25	16	122	11	5.5	572	25	50	0.6	6.1	53	2.8	110
超糜棱岩	D201-1	22	7	8	12	6.3	429	22	30	0.5	4.9	43	2.3	83

注:国土资源部测试研究所测试。

矿物组合的转化过程发生了流体间的离子交换,这一过程在岩石化学分析结果中也有清楚的反映。表1和图2表明:原岩从糜棱岩化岩石—糜棱岩—超糜棱岩, K_2O , SiO_2 增加; Al_2O_3 , Na_2O , MnO 变化不大,基本位于等比线附近; MgO , CaO , TFe_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 表现出减少的趋势,处于等比线之下;微量元素中 V , Cu , Sr , Cr , Zn 明显减少,远离等比线; Mo 未发生明显变化,一直处于等比线上;其他元素未表现出规律性变化。图2a显示在糜棱岩化阶段 K_2O , SiO_2 增加不明显,仅位于等比线上方附近; Al_2O_3 , Na_2O , MnO 位于等比线下方附近,而

MgO , CaO , TFe_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , V , Cu , Sr , Cr , Zn 远离等比线,明显减少,基本位于一条线上,耦合为同一等比线; Mg , Ca , Fe 的减少与角闪石的分解过程是一致的。在糜棱岩及以后的超糜棱岩阶段(图2b,c), MgO , CaO , TFe_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , V , Cu , Sr , Cr , Zn 仍然耦合为同一条等比线。只是减少的幅度有所降低。

Al_2O_3 是地球化学性质最稳定的组分,本身难以大量迁移,是公认的相对不活动组分。从图2看,3个阶段中 Al_2O_3 均有所减少,可见剪切带处于开放状态,存在物质的带出和带入,可能存在体积变化。

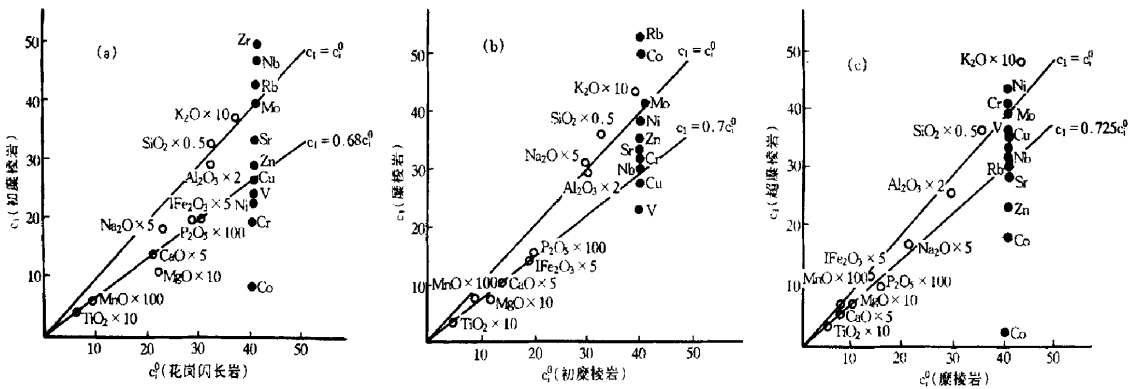


图2 鲁西尚河韧性剪切带糜棱岩类质量等比线图

6 运动学分析

尚河韧性剪切带中发育大量的宏观与微观构造,为剪切运动学分析提供了可靠的信息。

σ 型碎斑旋转系的尾端指向、S面理与C面理锐夹角指向、长石碎斑中剪切阶步滑移方向、石英集合体亚颗粒的斜列式排列等都表现出相同的旋转和剪切方向。

对剪切带中不同石英类型做出的石英C轴组构,表明剪切带具右行剪切特点。拉长石英集合体岩组为低温底面组构,滑移系 $\{0001\}$ (a) 温度 $< 350^{\circ}C$, 示右行剪切。多晶石英条带岩组为中温菱面组构,滑移系 $\{1011\}$ (a) 温度 $350 \sim 450^{\circ}C$, 示微弱的右行。糜棱质石英岩组是由低温底面组构、中温菱面组构和中高温柱面组构(滑移系 $\{1010\}$ (a) 温度

$450 \sim 550^{\circ}C$) 构成的倾斜环带,记录了变形温度从低到高的演化过程,倾斜环带指示右行剪切。糜棱岩中重结晶石英岩组以中温柱面组构为主,还显示出弱的中温菱面组构及低温底面组构,表明重结晶石英经历了剪切温度由低到高的全过程,中低温组构指示右行剪切。

7 应变分析

尚河韧性剪切带为一复式剪切带,总体应变呈波浪式变化,单条剪切带自边部向中心应变逐渐加强。未变形岩石中石英集合体未拉长,随机分布在长石和角闪石间隙中,可作为良好的应变测量标志。

7.1 付林图解

从对剪切带中不同类型构造岩进行的三维应变测量结果(表2)可以看出,在XZ面上 $X:Z = 3.75$

~18, $(l + e_1) / (l + e_3)$ 变化范围较大; YZ 面上 $(l + e_2) / (l + e_3)$ 在 2.7~6.12 之间变化, 而在 XY 面上 $X: Y = 1.7 \sim 3.0$, 变化较小; 付林指数 $K = 0.30 \sim 0.79$ 。由图 3 可以看出, 付林图解中各点均投入视压扁应变区, 均远离 $K = 1$ 直线, 投影点集中于平行 $(l + e_2) / (l + e_3)$ 轴的带状区域, 从糜棱岩化岩石—糜棱岩—超糜棱岩 $(l + e_2) / (l + e_3)$ 值在不断增大, 总体分布态势表现在剪切过程中 $(l + e_1) / (l + e_2)$ 基本上保持不变。测量表明, 在沿 X 轴增大的同时 Y 轴方向上相应增大, 随着剪切的递进发展, Y 轴相对于 Z 轴呈现出增大的趋势。以上特征表明变形还可能伴随有体积变化。

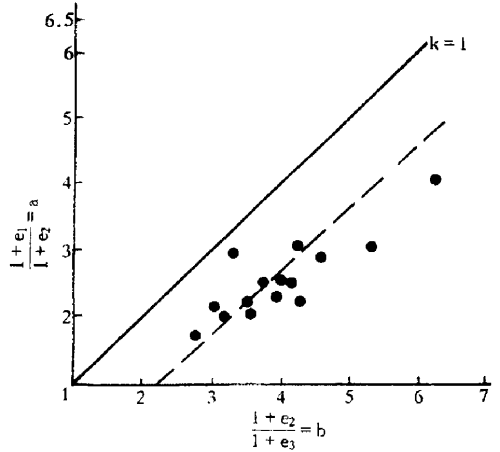


图 3 鲁西尚河韧性剪切带付林图解

表 2 鲁西尚河韧性剪切带三维有限应变测量及付林指数 (K) 计算结果

构造岩类	测量点	X/Y	Y/Z	X/Z	K
糜棱岩化岩石	D618-1	2.16	2.98	4.24	0.59
	P13-d20	1.80	3.50	6.00	0.32
	P13-D23	1.93	3.14	3.75	0.43
	P13-d6	2.00	2.70	4.50	0.59
	P11-4	1.70	3.00	5.00	0.35
糜棱岩	P13-①	2.90	3.24	5.50	0.79
	P13-⑥	2.17	3.00	4.10	0.59
	P13-11	2.28	3.96	4.68	0.40
	P13-d4	2.50	4.00	10.00	0.50
	P13-d92	3.00	5.00	18.00	0.50
	P13-d77	2.50	3.50	7.00	0.60
	D202-3	2.35	4.69	5.39	0.34
	P13-⑤	2.43	3.72	4.78	0.53
超糜棱岩	P13-④	2.46	4.03	4.64	0.48
	D387	2.89	6.12	7.40	0.37

切变形过程中存在体积变化。Al₂O₃, MnO, TiO₂, V, P, Cr 在岩石中一般被认为是相对不活动的组分。V 与 Al 一起赋存在长石中, 会转移到变形的云母中去; P, Cr, Ti 多数情况下主要赋存在锆石、磷灰石、磁铁矿和钛铁矿中。这些元素亏损的主要原因不可能是其从矿物中移出被带走。按照质量守恒原理, 这些相对不活动的高场强元素应该位于质量等比线上, 而在尚河剪切带构造岩中这些元素都位于质量等比线下方。其含量的降低可以用体积增加来解释。

从图 3 可看出: 变形过程中岩石中 K, Si 增加, Mg, Fe, Ca, P, Cr, V, Al, Na, Mn 降低。浓度降低的元素中明显可以分为两组, Al, Na, Mn 的浓度稍有降低, Mg, Fe, Ca, Ti, P, Cr, V 变化幅度较大。Al, Na, Mn 这一组元素浓度降低幅度不大, 基本上位于质量等比线附近的下方; Mg, Fe, Ca, Ti, P, Cr, V 这组元素偏离质量等比线较远, 可以解释为暗色矿物的构造分解和减少。Al₂O₃ 是公认的相对不活动组分, 因此可以用 Al₂O₃ 的亏损来求出体积变化率。

根据质量等比线斜率 [按 (O'Hara, 1988) 的公式] 确定体积变化:

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{1}{1 - V}$$

其中 C₁ 为变形岩石 Al₂O₃ 的浓度, C₀ 为原岩 Al₂O₃ 浓度, V 代表体积的损失。

以 Al₂O₃ 作为参照系应用上述公式估算青邑北侧曹庄剖面构造岩不同阶段的体积变化率见表 3:

7.2 剪切位移量

由于剪切带糜棱面理近于直立, 水平面为良好的 XZ 观察面, 这为测量不同应变域中应变椭球体的主轴 R_f 在 XZ 面上的取向 θ' 提供了方便。通过大量的系统测量, 采用 $\gamma = 2 \tan 2\theta'$ 求出不同地段的剪应变值, 编制应变剖面即 $\gamma - X$ 曲线, 用求积法得出的剪切位移量为 1048 m (不包括正长花岗岩穿切而蚀去的位移部分)。

8 体积变化

前述岩石化学变异分析及付林图解均暗示在剪

表 3 鲁西尚河韧性剪切带曹庄剖面构造岩体积变化率

构造岩	ω_B^0 / ω_B	$\Delta V (\%)$
初糜棱岩	1.033	3.3
糜棱岩	1.103	10.3
超糜棱岩	1.156	15.6

注： ω_B^0 变化后构造岩的体积； ω_B 变化前构造岩的体积。

从表 3 可以看出，剪切带不同应变带岩石相对于不变形岩石遭受了不同的体积扩容：初糜棱岩的扩容率最小，糜棱岩稍大，超糜棱岩最大。尽管这种估计可能存在不确定性（分析误差或参考系的偏差），但是它们清楚地表明在剪切变形过程中越靠近剪切带中心体积扩容越大^[2]。

9 变形环境分析

根据显微构造及其组合、变形过程中新生矿物组合和石英 C 轴组构均可以推断，该剪切带变形为中低温环境，属绿片岩相动力变质。

构造岩中石英发生粒内滑动、动态重结晶以及动态恢复，长石以破裂及边缘粒化为主，角闪石碎裂并出现构造分解，黑云母呈简单开阔的扭折，这些显微构造特征均表明变形为绿片岩相。

变形过程中同构造新晶的代表性矿物组合由斜长石或钾长石、石英、角闪石、黑云母转变为石英、绿帘石、黑云母、绢云母、钠长石等^[3]，反映剪切活动伴随绿片岩相变质。

石英岩组显示的变形温度也在中低温范围，350~450℃，属绿片岩相动力变质作用温度范围^[4]。

参考文献：

- [1] 马宝林, 刘若新, 张兆忠, 等. 华北板块边缘深地壳构造岩的基本特征和变形环境 [J]. 岩石学报, 1992, 8 (1): 18-26.
- [2] 胡能高, 安三元. 高丹断裂南侧糜棱岩的演化及递减变形序列 [J]. 地质论评, 1989, 35 (6): 389-397.
- [3] 张忠义, 丁峰. 坪上一带深层次构造岩的变形特征及温压条件分析 [J]. 山东地质, 2001, 17 (4): 38-43.
- [4] 张希道, 宋明春. 鲁东南莒南地区深层次构造岩的变形相及变形的温压条件分析 [J]. 地质论评, 1994, 10 (1): 84-89.

Deformation Characteristics Study of Shanghe Ductile Shear Belt in West of Shandong Province

ZHANG Shang - kun¹, WANG Xin - she², XIN Guo - jin¹, ZHANG Zeng - qi¹, WANG Cong - xiang¹, YANG Cong - hui²

(1. Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Shandong Jinan 250013, China; 2. Geological Study Institute of China Geological Scientific Academy, Beijing 100037, China)

Abstract Shanghe ductile shear belt developed in Nishan dome of Luxi (west of Shandong province) block uplift area. Major deformation mechanisms are different in different period: lattice dislocation and micro-fracture are major deformation mechanism in early deformation period; ductile flow and matter spreading and transformation in middle deformation period; crystal plastic deformation and grain edge gliding in late deformation period. In the developing period of ductile shear belt, material component and volume of rocks varied largely. According to material combination and deformation characteristics of tectonic rocks, this ductile shear belt has the characteristics of right sliding. Displacement vector of ductile is 1048m which belongs to greenschist facies dynamic metamorphism.

Key words: Ductile shear belt; structure characteristics; deformation mechanism; right sliding; displacement vector; Shanghe in western Shandong