

魏博, 裴先治, 刘成军, 等. 西秦岭天水地区新阳—元龙韧性剪切带构造变形特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 51–70.
Wei Bo, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, et al. Structural deformation of Xinyang– Yuanlong ductile shear zone in Tianshui area, Western Qinling Mountains, and its geological significance[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 51–70(in Chinese with English abstract).

西秦岭天水地区新阳—元龙韧性剪切带构造变形特征及其地质意义

魏 博^{1,2} 裴先治^{1,2} 刘成军¹ 裴 磊³ 李瑞保^{1,2} 李佐臣^{1,2} 陈有炘¹
胥晓春¹ 刘图杰¹ 王元元¹ 任厚州¹ 陈伟男¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:西秦岭北缘新阳—元龙韧性剪切带作为西秦岭造山带与北祁连造山带之间的区域韧性构造边界,带内构造样式复杂多样,多期构造叠加,不同部位韧性变形强度不同,兼具左行、右行剪切特征,但以右行为主,宏观构造显示由NNE向SSW斜向逆冲特征,且多被后期构造改造。EBSD组构分析结果显示,石英C轴优选方位指示非共轴变形,显示明显的中温柱面 $\langle a \rangle$ -中低温菱面-低温底面组构的右行剪切及不太明显的低温底面组构(偶见中低温组构)左行剪切特征;方解石C轴组构显示e₁双晶滑移与r₁平移滑动,兼具左行、右行剪切特征。组构特征反映该剪切带可能经历了中温—中低温—低温、以右行韧性走滑为主并曾出现过左行逆冲的复杂变形过程,综合分析推断该韧性剪切带经历了低绿片岩相—高绿片岩相—低角闪岩相韧性变形环境。区域对比分析认为,新阳—元龙韧性剪切带响应古生代构造演化的构造变形记录主要为2期:一是志留纪天水—武山洋闭合导致大规模NNE–SSW向的陆–弧或陆–陆碰撞逆冲造成的左行逆冲剪切变形;二是晚泥盆世—早石炭世秦祁结合部位强烈的大规模右行走滑拼贴运动形成的右行剪切变形和反“S”构造样式。

关键词:韧性剪切带;构造变形;EBSD组构分析;变形温压环境;秦祁结合部位

中图分类号:P542⁺.3 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2015)01-0051-20

Structural deformation of Xinyang–Yuanlong ductile shear zone in Tianshui area, Western Qinling Mountains, and its geological significance

WEI Bo¹, PEI Xian-zhi^{1,2}, LIU Cheng-jun¹, PEI Lei³, LI Rui-bao^{1,2},
LI Zuo-chen^{1,2}, CHEN You-xin¹, XU Xiao-chun¹, LIU Tu-jie¹,
WANG Yuan-yuan¹, REN Hou-zhou¹, CHEN Wei-nan¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western

收稿日期:2014-07-01;改回日期:2014-11-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41172186、40972136、41472191)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110205110004)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011TD020,2013G1271091,2013G1271092)联合资助。

作者简介:魏博,男,1988年生,硕士生,构造地质学专业;E-mail:weiboehd@163.com。

通讯作者:裴先治,男,1963年生,教授,博士生导师,主要从事构造地质学和区域地质学研究;E-mail:peixzh@263.net。

China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Xinyang–Yuanlong ductile shear zone on the north margin of Western Qinling Mountains is the main ductile tectonic boundary which separates the Western Qinling orogenic belt from the Northern Qilian orogenic belt. The deformation style in the ductile shear zone is complex and diverse, with multiphase structural superposition, and deformation varies in intensity in different parts. From the macro– and micro–structure, it is revealed that the deformation has both sinistral and dextral shear, but the major part of the deformation is right–handed. Macro–structure shows characteristics of oblique thrust from NNE to SSW; nevertheless, the structure is mainly reformed and superposed. According to EBSD fabric analysis, LPOs of quartz indicate non–coaxial deformation and reveal that the quartz grains displaying dextral shear are apparently characterized by medium–temperature prismatic fabric <a>, low–medium temperature rhombohedral fabric, and low–temperature basal fabric. The quartz grains displaying sinistral shear are indistinctly characterized by low–temperature basal fabric (occasionally medium–temperature prismatic fabric); LPOs of calcite show that the grains are dominated by e_1 twinning glide and r_1 translation glide, and reveal both sinistral and dextral shear characteristics. All these data indicate that the shear zone probably experienced a complex deformation process from medium–temperature through low–medium temperature to low temperature, with the deformation environment from low greenschist facies through high greenschist facies to low amphibolite facies. The transformation of shear sense suggests that dextral strike–slip ductile shear is dominant, while sinistral thrusting shear is subordinate in the shear zone. According to regional comparative analysis, Xinyang–Yuanlong ductile shear zone has marked two main structural deformational records responding to the tectonic evolution in the Paleozoic: The early record is sinistral thrusting shear deformation that was the adjustment to the thrusting in a direction of NNE to SSW, caused by the continent–arc or continent–continent collision related to the closure of the Tianshui–Wushan Ocean in the Silurian; The later record is dextral shear deformation and the inversional S–type tectonic style caused by the intense dextral strike–slip at the conjunction of Qinling and Qilian orogen in the Late Devonian to Early Carboniferous period.

Key words: ductile shear zone; tectonic deformation; EBSD fabric analysis; deformational temperature and pressure environment; conjunction of Qinling and Qilian orogens

About the first author: WEI Bo, male, born in 1988, master candidate, majors in structural geology; E–mail: weibochd@163.com.

About the corresponding author: PEI Xian–zhi, male, born in 1963, professor; supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of structural geology and regional geology; E–mail: peixzh@263.net.

韧性剪切带作为地壳深部的带状高应变带,受剪切变形作用抑或高应变带内岩石的塑性流动的影响^[1],对研究地壳深部变形具有重要意义。剪切带中的变形作用作为控制和影响地壳形成和演化的一种重要因素,受到越来越多研究者的青睐^[2–6]。近十几年来,剪切带内部变形,尤其是糜棱岩矿物的组构及其形成机制的研究更是受到高度重视^[7–10]。目前韧性剪切带作为大陆上研究最全面、最深入和详尽的构造带,已经成为研究地壳运动规律及大陆造山带岩石圈变形构造动力学的重要内容^[3, 10–12]。

多年来,秦祁结合部位一直是学者研究的热点,前人多将该结合部位表示为“北秦岭—祁连构造带”^[13–14],是商丹构造带西延问题研究的关键所

在,张维吉等^[14]认为该构造带在天水地区呈一反“S”形构造样式近东西向延伸。后期经过系统研究,有学者初步总结出西秦岭北缘天水地区区域构造格架与演化历史^[15–40]。天水市幅1:25万区域地质调查^①首次识别出新阳—元龙韧性剪切带并厘定其构造意义,它作为划分西秦岭与北祁连造山带大型构造边界,对秦岭与祁连造山带衔接部位的构造格局与构造演化具有显著的地质意义。近年来,已报道的该剪切带内花岗质糜棱岩的锆石U–Pb年龄分别为:元龙镇为(924.2±2.7) Ma^[41]与(914.7±7.6) Ma^[27];新阳镇细尾子沟为(938±4) Ma、(981±5) Ma^[42]与(978.5±4.8) Ma、(935.5±3.1) Ma^[27],故可大致确定该剪切带中花岗质糜棱岩的原岩结晶时代为(914.7±7.6)~(981±5)

① 长安大学地质调查研究院. 1:25万天水市幅区域地质调查(修测)报告. 2004.

Ma,属新元古代早期,且具有同碰撞花岗岩类特征^[43]。而获得剪切带内花岗质糜棱岩中黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素坪年龄分别为(347.95±2.17) Ma(新阳)和(351.70±1.72) Ma(元龙)^[44]。虽然对剪切带内的物质组成的研究较为详尽,但该韧性剪切带受多期构造活动的叠加改造,区内构造样式多样,其构造变形特征与形成环境研究的相对滞后,阻碍了对该韧性剪切带形成与演化的认识。在前人研究基础上,本文旨在通过宏观与微观构造,并结合EBSD组构特征,系统地研究分析该剪切带的构造变形特征,从而讨论其形成环境与大地构造意义,有利于厘清研究区韧性剪切带的发育及演化特点,为进一步认识西秦岭与北祁连造山带构造交切关系提供依据。

1 区域地质概况

新阳—元龙韧性剪切带地处青藏高原东北缘,位于天水、宝鸡一线,沿渭河流域呈NWW向展布,其大地构造位置处于中央造山系中段祁连造山带和北秦岭造山带的结合部位(图1),同时也横跨在中国中部南北向构造带上,是古亚洲构造域、特提斯构造域和太平洋构造域复合叠加的构造部位^[45]。以新阳—元龙韧性剪切带为界,南北两侧分属不同大地构造单元,经过区域地层、构造、岩浆岩等资料的收集与综合分析,两侧物质组成、构造变形有明显差异^[27-28]。新阳—元龙韧性剪切带以南为西秦岭造山带北缘,主要由北秦岭构造带、李子园—关子镇俯冲—碰撞杂岩构造带、南秦岭晚古生代沉积盆地构造带组成;剪切带以北为北祁连造山带东段,主要由古元古界陇山岩群中深变质基底岩系、下志留统葫芦河群浅变质陆缘碎屑沉积、下志留统红土堡组活动陆缘基性火山岩系、中上奥陶统陈家河群活动陆缘型碎屑岩系和中酸性火山岩系及大量典型陆缘弧型深成侵入体组成。剪切带南北两侧构造岩石地层单位展布总体呈NW—NWW向,由东至西不同程度斜交于新阳—元龙韧性剪切带。这种平面构造几何样式表明秦岭(主要为西秦岭)与祁连造山带之间呈巨大斜切交接构造关系,指示现今的2个构造单元原本就不属于一个构造单元,而是分属2个构造单元,后期通过走滑构造拼贴作用而形成现今构造格局。

新阳—元龙韧性剪切带宽3~4.5 km,受后期构

造运动及新生代盆地的覆盖影响,仅在天水北新阳及北道东的元龙一带保留较为完整(图1),向东延伸在渭河南岸花岗岩体中仍能见到花岗质糜棱岩的残余,向西延伸可能到达武山县城北9 km处出露近200 m宽的花岗质糜棱岩带,但都因第四系覆盖而零星分布^[27, 41-42, 44]。它主要包括天水西侧的新阳韧性剪切带和天水东侧的元龙韧性剪切带。新阳韧性剪切带主要出露于甘谷县新阳镇东细尾子沟与磨石沟,出露宽度约4.5 km,北侧与下志留统葫芦河群中的绿帘绿泥钠长片岩呈断层或强剪切变形接触,可见变基性火山岩(绿片岩)的小岩块卷入钙质糜棱岩中,南侧与早古生代镁铁—超镁铁质岩带呈构造接触关系(图2),带内主要由古元古界秦岭岩群大理岩、钙质糜棱岩与新元古代花岗质糜棱岩组成,局部侵入有后期弱变形似斑状二长花岗岩(图3)。元龙韧性剪切带主要出露于天水市伯阳—元龙之间的渭河北侧,出露宽约3 km,北侧与下志留统葫芦河群变质碎屑岩(以黑云母/二云母石英片岩为主夹少量石英岩及大理岩)呈逆冲断层接触,受强构造变形影响局部地区可见糜棱面理与片理已趋于一致化,南侧与上奥陶统草滩沟群浅变质火山—碎屑岩沉积组合呈脆性断层接触,但大部分分布区域被近东西向分布的晚三叠世小河子陆相酸性火山岩系覆盖,带内主要由花岗质糜棱岩组成(图4、5)。两地剪切带内岩石普遍已发生糜棱岩化,其中均发育有加里东期深熔花岗岩脉体,受后期构造运动影响多已变形为弱糜棱岩化花岗岩。此外,带内还夹有变基性岩与黑云石英片岩。

2 韧性剪切带的构造变形

新阳—元龙韧性剪切带内部受多期构造叠加致使构造形式复杂多样。新阳韧性剪切带内主要变形岩石有钾长花岗质糜棱岩、二长花岗质糜棱岩、花岗闪长质糜棱岩、眼球状花岗闪长质糜棱岩、钙质糜棱岩、大理岩及少量黑云石英片岩与变基性火山岩(图2、3);而元龙韧性剪切带内主要变形岩石为条纹条带状花岗质糜棱岩与眼球状花岗质糜棱岩(图4、5)。剪切带内发育有从显微尺度到露头尺度乃至区域尺度的规模不等的韧脆性变形特征,构造变形结构型式基本相同,应变强度从韧性剪切带中心向两侧逐渐减弱,两侧围岩也受同期变形影

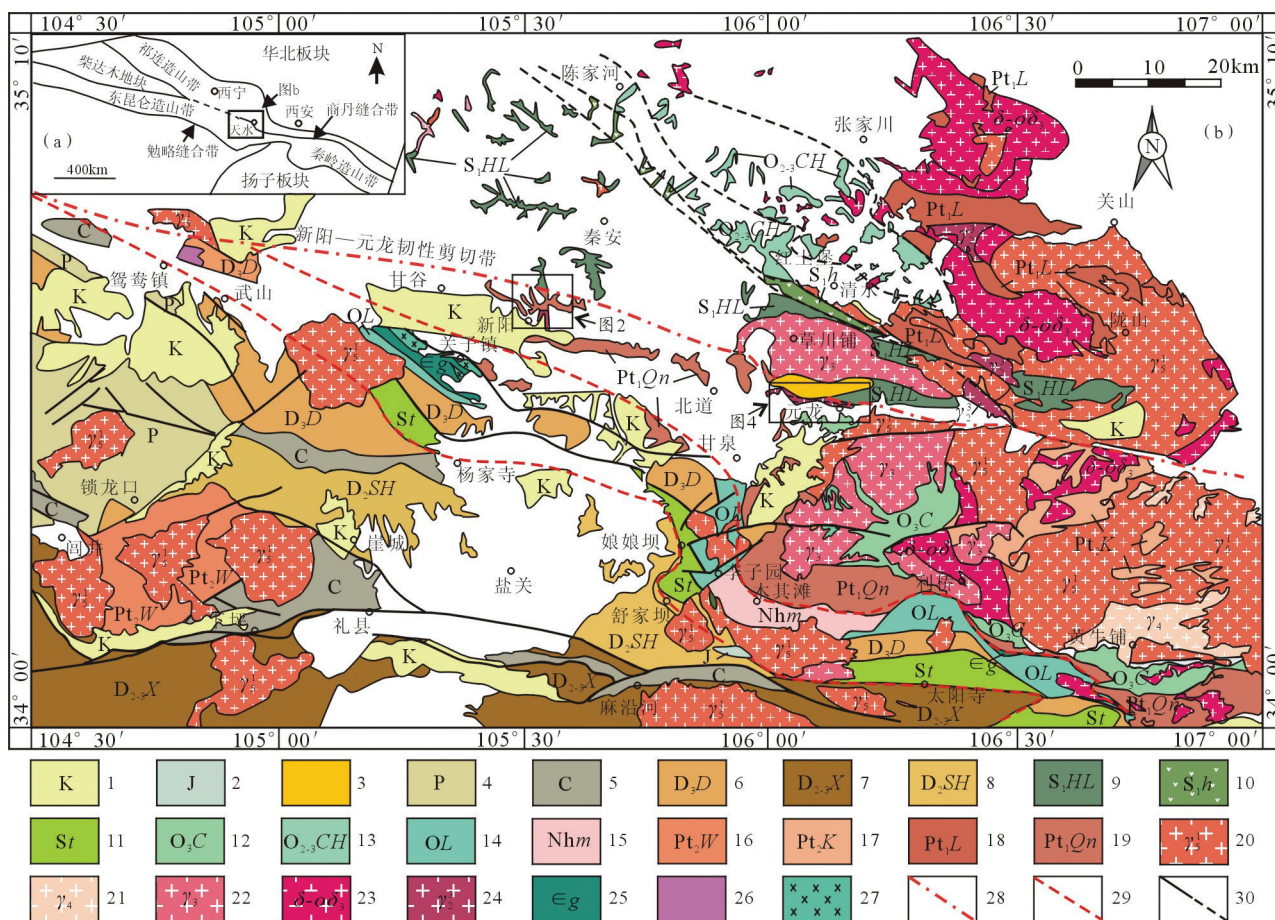


图1 西秦岭北缘天水地区构造位置(a)及地质特征略图(b)(据①②修改)

1—白垩系;2—侏罗系;3—晚三叠世小河水陆相酸性火山岩系;4—二叠系;5—石炭系;6—上泥盆统大草滩群;7—中—上泥盆统西汉水群;8—中泥盆统舒家坝群;9—下志留统葫芦河群;10—下志留统红土堡组变基性火山岩系;11—志留系太阳寺岩组;12—上奥陶统草滩沟群;13—中—上奥陶统陈家河群;14—奥陶系李子园群;15—南华系木其滩岩组;16—中元古界吴家山岩群;17—中元古界宽坪岩群;18—古元古界陇山岩群;19—古元古界秦岭岩群;20—印支期花岗岩;21—海西期花岗岩;22—加里东晚期碰撞型花岗岩;23—加里东早期俯冲型闪长岩—石英闪长岩;24—新元古代花岗质片麻岩;25—寒武纪关子镇蛇绿岩;26—早古生代镁铁—超镁铁质岩;27—早古生代变形辉长岩—辉长闪长岩;28—新阳—元龙韧性剪切带;29—构造边界断裂;30—一般断层、推测断层

Fig.1 Tectonic setting map (a) and geological sketch map (b) of Tianshui area, northern margin of Western Qinling Mountains (modified after reference①②)

1—Cretaceous;2—Jurassic;3—Late Triassic Xiaozezi continental acid volcanic rocks;4—Permian;5—Carboniferous;6—Upper Devonian Dacaotan Group;7—Mid-upper Devonian Xihanshui Group;8—Middle Devonian Shujiaba Group;9—Lower Silurian Huluhe Group;10—Meta-basic volcanic rocks of Lower Silurian Hongtubao Formation;11—Silurian Taiyangsi Rock Formation;12—Upper Ordovician Caotangou Group;13—Mid—upper Ordovician Chenjiahe Group;14—Ordovician Liziyuan Group;15—Nanhua Muqitan Rock Formation;16—Mesoproterozoic Wujiashan Rock Group;17—Mesoproterozoic Kuanping Rock Group;18—Paleoproterozoic Longshan Rock Group;19—Paleoproterozoic Qinling Rock Group;20—Indosinian granites;21—Hercynian granites;22—Late Caledonian collisional granites;23—Early Caledonian subduction diorites and quartz diorites;24—Neoproterozoic granitic gneiss;25—Cambrian Guanzizhen ophiolite;26—Early Paleozoic mafic-ultramafic rocks;27—Early Paleozoic deformed gabbro-gabbro diorites;28—Xinyang—Yuanlong ductile shear zone;29—Boundary fault;30—Fault and inferred fault

响而使其面理与韧性剪切带呈低角度相切,卷入韧性剪切带中出现糜棱面理。剪切带内具有明显的

两期构造变形特征,早期构造特征多被后期构造所改造覆盖,其构造变形组合特征如下:

① 长安大学地质调查研究院. 1:25万天水市幅区域地质调查(修测)报告. 2004.

② 陕西省地质调查院. 1:25万宝鸡市幅区域地质调查(修测)报告. 2004.

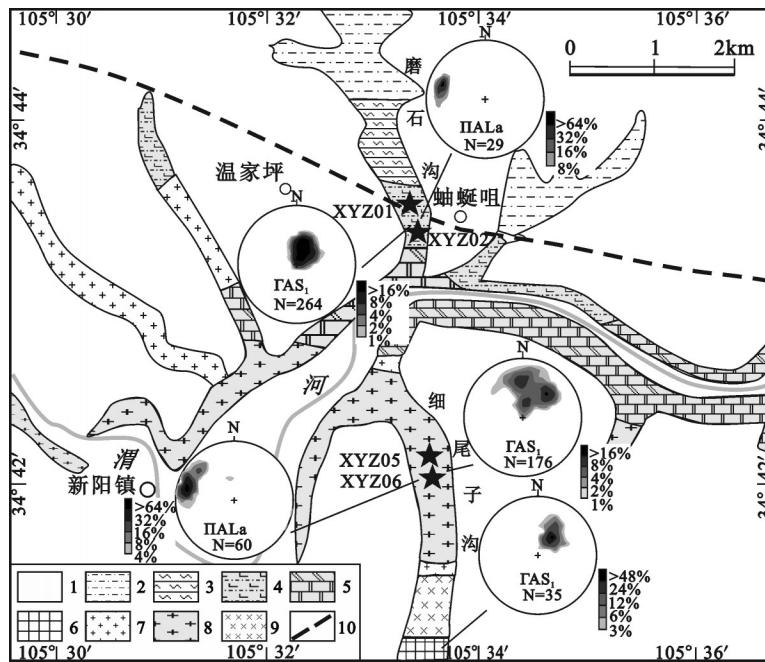


图2 天水市新阳地区地质简图及透入性面理(S₁)与拉伸线理(La)赤平投影图
(投影图为面理极点与拉伸线理赤平投影等密线图,均为下半球等面积投影)

1—新生界;2—下志留统葫芦河群变质碎屑岩;3—绿片岩/变质基性火山岩;4—钙质糜棱岩夹变质基性岩构造透透镜体;5—古元古界秦岭岩群大理岩和白云质大理岩;6—古元古界秦岭岩群长英质片麻岩组;7—印支期花岗岩;8—新元古代花岗质糜棱岩;9—早古生代镁铁—超镁铁质岩;10—边界断层;★采样位置

Fig. 2 Simplified geological map of Xinyang area in Tianshui and projection of penetrative foliation, stretching lineation (projection is the equal density diagram of the foliation pole and stretching lineation, lower hemisphere equal area)

1—Cenozoic; 2—Meta-clastic rocks of Huluhe Group; 3—Greenschist/meta-basic volcanic rocks; 4—Calc mylonite interbedded with meta-basic tectonic lens; 5—Marble and dolomitic marble of Paleoproterozoic Qinling Group; 6—Paleoproterozoic Qinling Group felsic gneiss Rock Formation; 7—Indosinian granites; 8—Neoproterozoic granitic mylonites; 9—Early Paleozoic mafic-ultramafic rocks; 10—Boundary fault; ★ Sampling location

2.1 宏观构造特征

(1)面理:花岗质糜棱岩的糜棱面理由长石、石英及暗色矿物相间定向排列而成;在钙质糜棱岩中,主要由成分薄层的差异性矿物的强烈拉伸所表现,局部常有弯曲、揉皱,显示强烈的流变构造特征(图6)。对新阳和元龙地区花岗质糜棱岩及钙质糜棱岩进行了大量的面理统计及极点下半球等面积赤平投影分析(图2、4),其投影结果显示,新阳地区自北向南面理优势产状依次为:钙质糜棱岩 $26^\circ \angle 67^\circ$,相对较为密集,花岗质糜棱岩 $16^\circ \angle 48^\circ$,密集性较差,其南侧的黑云斜长片麻岩为 $35^\circ \angle 45^\circ$;元龙地区自北向南面理优势产状依次为:北侧黑云石英片岩为 $204^\circ \angle 65^\circ$,眼球状花岗质糜棱岩为 $210^\circ \angle 65^\circ$,花岗质糜棱岩为 $181^\circ \angle 49^\circ$,均有较明显的集密部。

(2)拉伸线理:由长石、石英等矿物集合体强烈

拉伸定向排列而成,矿物颗粒常被拉成丝带状,拉伸轴平行剪切方向,或为剪切褶皱的枢纽。对新阳和元龙地区花岗质糜棱岩及钙质糜棱岩进行了大量的线理统计及下半球等面积赤平投影分析(图2、4),其投影结果显示,新阳地区自北向南线理优势产状依次为:钙质糜棱岩 $284^\circ \angle 24^\circ$,花岗质糜棱岩 $291^\circ \angle 20^\circ$,均具较明显集密部;元龙地区自北向南线理优势产状依次为:北侧黑云石英片岩为 $131^\circ \angle 31^\circ$,眼球状花岗质糜棱岩为 $127^\circ \angle 40^\circ$,花岗质糜棱岩为 $122^\circ \angle 35^\circ$,均有较明显的集密部。南段拉伸线理倾伏角较大,北段较小,拉伸线理主体($< 40^\circ$),反映一次强烈的韧性走滑运动,但偶尔可见倾伏角较大($> 45^\circ$)、近南北向走向的线理,可能为早期逆冲遗留产物。

综上,剪切带不同区域、区段的面理、线理产状具有差异性,但是在元龙地区与新阳地区各有明显

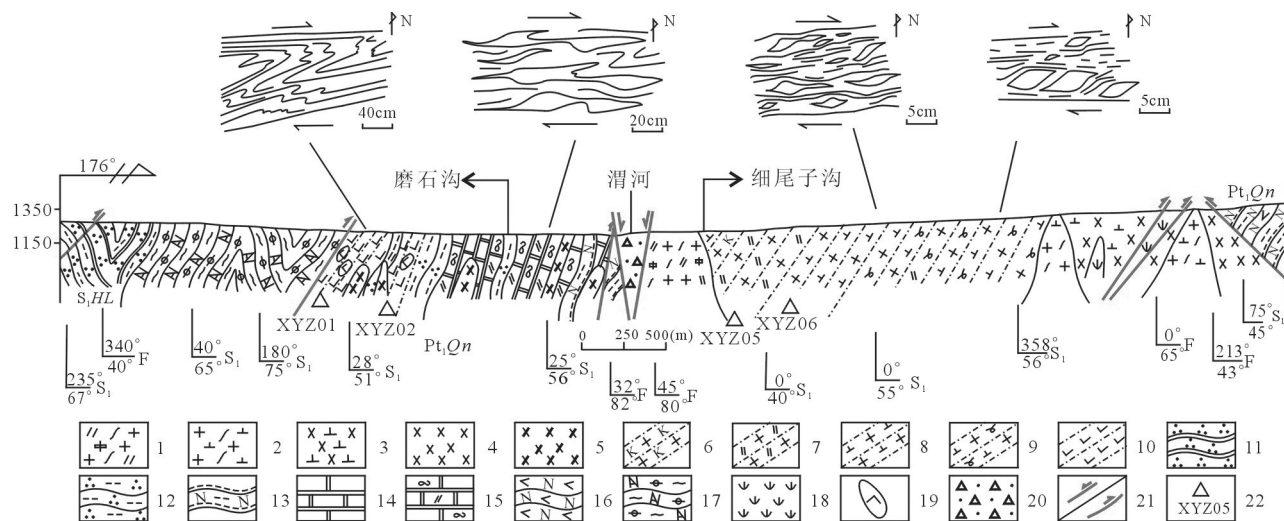


图3 天水西新阳镇磨石沟—细尾子沟韧性剪切带构造剖面图

1—片麻状似斑状花岗岩;2—片麻状花岗闪长岩;3—辉长闪长岩;4—辉长岩;5—辉绿岩;6—钾长花岗质糜棱岩;7—二长花岗质糜棱岩;8—花岗闪长质糜棱岩;9—眼球状花岗闪长质糜棱岩;10—钙质糜棱岩;11—石英岩;12—黑云石英片岩;13—黑云斜长片麻岩;14—大理岩;15—条带状白云质大理岩;16—斜长角闪岩;17—绿帘绿泥钠长片岩;18—蛇纹岩;19—变玄武岩;20—断层破碎带;21—断层;22—采样位置;
S,HL—下志留统葫芦河群;Pt,Qn—古元古界秦岭岩群

Fig.3 Tectonic section of Xinyang ductile shear zone in Moshigou and Xiweizigou, eastern Tianshui

1—Gneissic porphyritic granite;2—Gneissic granodiorite;3—Gabbro diorite;4—Gabbro;5—Diabase;6—Moyitic mylonite;7—Monzonitic mylonite;8—Granodioritic mylonite;9—Augen granodioritic mylonite;10—Calc mylonite;11—Quartzite;12—Biotite quartz schist;13—Biotite plagioclase gneiss;14—Marble;15—Banded dolomitic marble;16—Plagioclase amphibolite;17—Epidote chlorite albite schist;18—Serpentine;19—Meta-basalt;20—Fault fracture zone;21—Fault;22—Sampling location;S,HL—Lower Silurian Huluhe Group;Pt,Qn—Paleoproterozoic Qinling Group

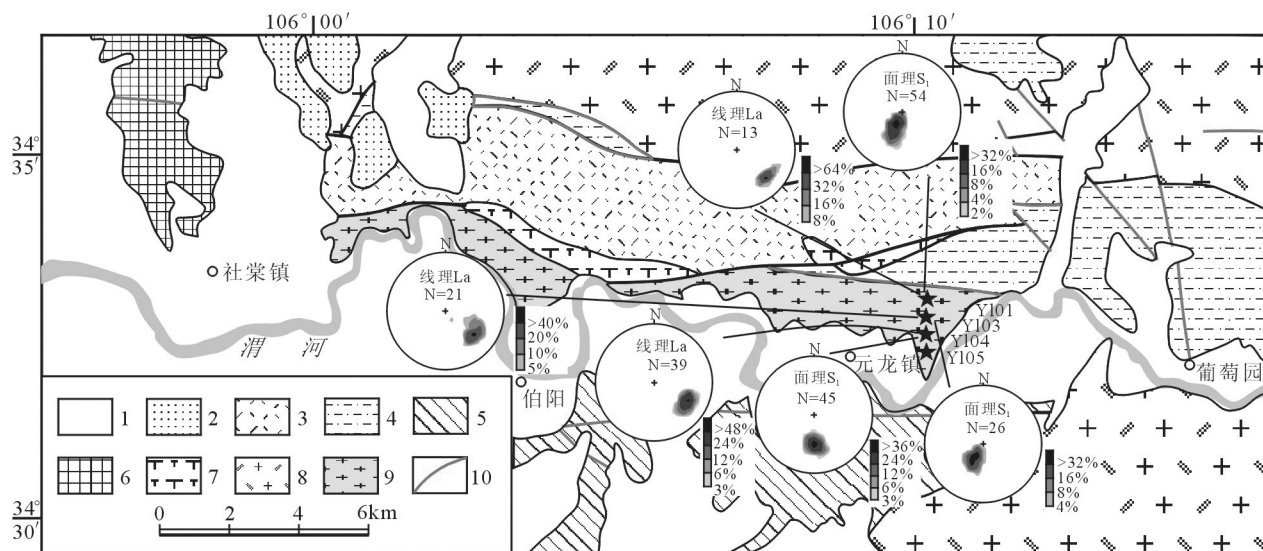


图4 天水元龙地区地质简图及透入性面理(S₁)与拉伸线理(La)赤平投影
(投影图为面理极点与拉伸线理赤平投影等密线图,均为下半球等面积投影)

1—第四系;2—新近系;3—晚三叠世小河子陆相酸性火山岩系;4—下志留统葫芦河群变质碎屑岩;5—上奥陶统草滩沟群火山—沉积岩;6—古元古界秦岭岩群;7—正长斑岩;8—二长花岗岩;9—新元古代花岗质糜棱岩;10—断层;★采样位置

Fig.4 Simplified geological map of Yuanlong area in Tianshui and stereogram of penetrative foliation, stretching lineation
(Projection is the equal density diagram of the foliation pole and stretching lineation, lower hemisphere equal areal)

1—Quaternary;2—Neogene;3—Late Triassic Xiaohexi continental acid volcanic rocks;4—Meta-clastic rocks of Huluhe Group;5—Volcanic-sedimentary rock of Upper Ordovician Caotanguo Group;6—Paleoproterozoic Qinling Group;7—Orthophyre;8—Monzonitic granite;9—Neoproterozoic granitic mylonites;10—Fault;★Sampling location

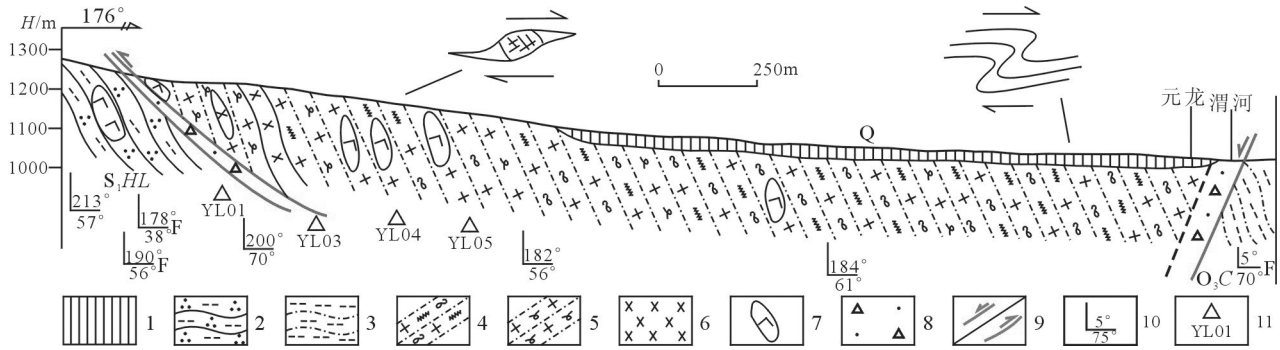


图5 天水东元龙韧性剪切带构造剖面图

1—第四系;2—黑云石英片岩;3—黑云母变粒岩;4—条纹条带状花岗质糜棱岩;5—眼球状花岗质糜棱岩;6—变辉长岩;7—变玄武岩;
8—断层破碎带;9—断层;10—产状;11—采样位置;S,HL—下志留统葫芦河群;O₃C—上奥陶统草滩沟群

Fig. 5 Tectonic section of Yuanlong ductile shear zone in eastern Tianshui

1—Quaternary;2—Biotite quartz schist;3—Biotite leptynite;4—Banded granitic mylonite;5—Augen granitic mylonite;6—Meta-gabbro;
7—Meta-basalt;8—Fault fracture zone;9—Fault;10—Attitude;11—Sampling location;S,HL—Lower Silurian Huluhu Group;
O₃C—Upper Ordovician Caotangou Group

的一致性,此种差异性很可能由于后期构造作用影响所致,但不排除岩石差异性的影响^[46]。新阳—元龙韧性剪切带面理、线理产状另一个典型特征是:新阳地区面理一致北倾,线理倾伏向为NWW向,而元龙地区面理一致南倾,线理倾伏向为SEE向,造成这种现象的原因可能是右行走滑剪切作用,其扭压力造成同一剪切带扭动,形成类似鞘褶皱构造,从而不同区段具有不同表现。

(3)构造透镜体:主要发育于新阳磨石沟中的钙质糜棱岩,由钙质糜棱岩自身能干性的差异或与其与基性岩脉之间能干性的差异所形成,以透镜状、串珠状或扁豆状的不连续块体形式存在。磨石沟变基性火山岩(绿片岩)中也发育有石英与方解石透镜体。此外,新阳细尾子沟与元龙花岗质糜棱岩中也偶有发育,由于不同性质的矿物相间,在压力差的条件下形成石香肠构造,长石脆性较强,碎斑为布丁,石英与其他矿物为基质。此外还可见到石英岩、辉长岩、硅质岩、方解石等细颈化的透镜状,或夹于软弱层之间或残存于无根钩状褶皱转折端,显示明显的不对称特征。构造透镜体具有走滑(图6-a、b)与逆冲(图6-c)指示特征。

(4)不对称褶皱:在新阳磨石沟钙质糜棱岩中大量发育,也可见于一些基性岩脉或绿片岩中(图6-d),形态多样,尺度不等,多呈“Z”字形褶皱。新阳磨石沟钙质糜棱岩中偶见到小规模鞘褶皱,由方解石脉体与围岩共同构成,在倾角较大的糜棱面上

形成低角度的线性褶皱,其枢纽与拉伸线理方位一致。此外,可见到钙质糜棱岩中褶皱叠加,早期形成不对称褶皱被后期褶皱改造,表明原岩在剪切变形过程中相对位置发生变化,并在向地表抬升的过程中受到了持续剪切作用,其为递进变形产物。根据不对称褶皱两翼的不对称性可判断运动方向,平面显示NWW向右行走滑剪切(图6-d-g),钙质糜棱岩中局部保存左行特征(图6-i),剖面显示自NNE至SSW逆冲特征(图6-h)。

(5)不对称旋转碎斑系:新阳与元龙地区的花岗质糜棱岩中很常见,尤其在眼球状花岗质糜棱岩中最为常见。旋转碎斑根据残碎斑晶与细粒基质的组合形态特征,可以划分为“ σ ”型和“ δ ”型两大类^[47-48],新阳—元龙韧性剪切带中“ σ ”型与“ δ ”型旋转碎斑系均有发育,但以“ σ ”型旋转碎斑系最为常见,结晶尾长短不一。碎斑多由拉长的钾长石组成,直径由几毫米至几厘米不等,最大可达7~8 cm。旋转碎斑拖尾方向,XZ面多显示NWW向右行剪切指向特征,偶见左行特征(图6-j、k),YZ面上则可见由NNE至SSW逆冲特征(图6-l)。

(6)S-C面理构造:新阳与元龙地区的花岗质糜棱岩中发育有特征的S-C组构,露头尺度与显微尺度均可见到,发育规模不大。C面理主要由石英与黑云母等矿物构成,S面理主要由长石构成。变形带中的花岗质糜棱岩的S-C组构明显受后期韧性变形带控制,指示NWW向右行剪切运动。

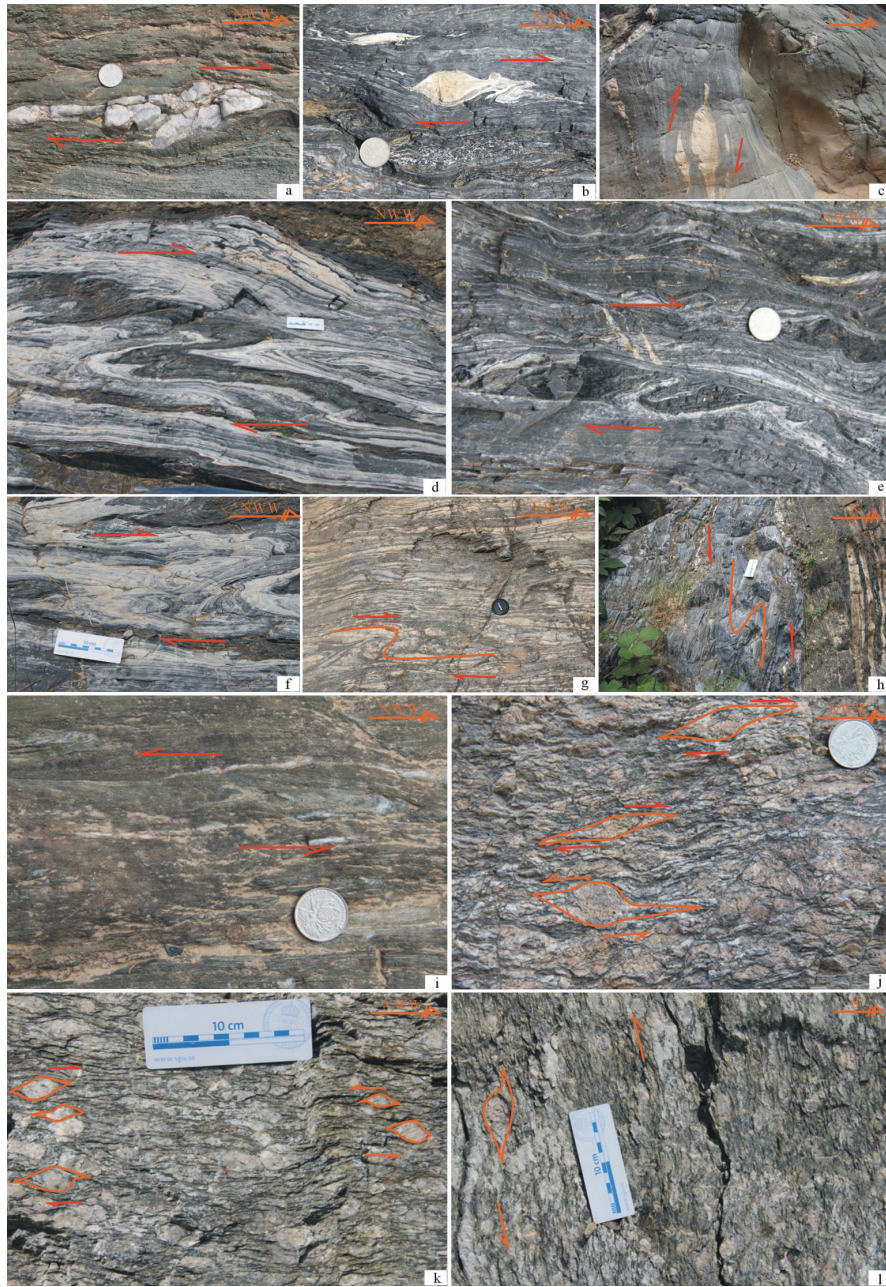


图6 新阳—元龙韧性剪切带野外构造变形照片

a—磨石沟绿片岩中的透镜体(平面);b—磨石沟黑云石英片岩中的透镜体(平面);c—磨石沟钙质糜棱岩中的石香肠构造(剖面);d—磨石沟钙质糜棱岩中的不对称褶皱(平面);e—磨石沟钙质糜棱岩中石香肠构造及不对称褶皱(平面);f—磨石沟钙质糜棱岩中的不对称褶皱(平面);g—细尾子沟花岗质糜棱岩中的不对称褶皱(平面);h—磨石沟钙质糜棱岩中的不对称褶皱(剖面);i—磨石沟绿片岩中的无根钩状褶皱(平面);j—细尾子沟花岗质糜棱岩中的不对称旋转碎斑(平面);k—元龙花岗质糜棱岩中的不对称旋转碎斑(平面);l—元龙花岗质糜棱岩中的不对称旋转碎斑(剖面)

Fig. 6 Photos of the tectonic deformation in the Xinyang-Yuanlong ductile shear zone

a-Tectonic lens in greenschist(Moshigou, plane); b-Tectonic lens in biotite quartz schist(Moshigou, plane); c-Boudinage in calc mylonite(Moshigou, profile); d-Asymmetric folded calcimylonite(Moshigou, plane); e-Boudinage and asymmetric fold of calc mylonite(Moshigou, plane); f-Asymmetric folded calc mylonite(Moshigou, plane); g-Asymmetric folded granitic mylonite(Xiweizigou, plane); h-Asymmetric folded calc mylonite(Moshigou, profile); i-Rootless hook-like fold of greenschist(Moshigou, plane); j-Asymmetric rotational porphyroblast structure in granitic mylonite(Xiweizigou, plane); k-Asymmetric rotational porphyroblast structure in granitic mylonite(Yuanlong, plane); l-Asymmetric rotational porphyroblast structure in granitic mylonite(Yuanlong, profile)

2.2 显微构造特征

显微构造特征可为韧性剪切带的构造变形分析提供更多的证据,对剪切带内糜棱岩的XZ面向薄片进行显微镜下观察,各薄片的变形特征见表1。从糜棱岩化岩石到糜棱岩中显微指向构造种类繁多且发育齐全,如波状消光、亚颗粒、动态重结晶、变形纹、核幔构造、石英拔丝构造、云母鱼、不对称旋转碎斑、多米诺碎斑等。

(1)石英条带:在新阳与元龙地区的花岗质糜棱岩中可见石英拉长呈多晶石英条带、单晶石英条带或者多晶石英集合体条带,石英新品呈长矩形,与其共生的长石多已细粒化(图7-a)。

(2)波状消光、变形纹、亚颗粒及动态重结晶:在两地的花岗质糜棱岩系列中可大量见到石英的波状消光,消光影呈带状、不规则带状或扇状连续扫过晶面,还可见到石英与长石的变形纹,变形纹狭窄细密而平直(图7-b),为晶内位错滑移产生^[49]。石英与长石发育大量亚颗粒与动态重结晶颗粒,但也有部分动态重结晶颗粒实现静态恢复重结

晶,恢复后颗粒粒度明显增大,边界也变得平直。石英由于晶内位错而产生若干个消光位稍有差异的区域,从而构成亚颗粒,亚颗粒进一步旋转、边界迁移形成动态重结晶颗粒,使得重结晶颗粒边界呈不规则状的花边结构;当岩石的宏观变形终止后,颗粒为达到稳定,发生静态重结晶,重结晶颗粒从鼓胀式(BLG)、亚颗粒旋转重结晶(SGR)到颗粒边界迁移(GBM)都有发育。此外新阳地区钙质糜棱岩中可见到较多动态重结晶的方解石颗粒,但后期多静态恢复。

(3)机械双晶:常见于新阳与元龙地区花岗质糜棱岩系列中的斜长石,多发育一组双晶,双晶纹较为细密,表现断续,分布具有局部化,常发生尖灭或宽度与长度有所改变,各条纹厚度差异较大(图7-c),偶见其双晶纹发生扭折弯曲。也可见于新阳磨石沟钙质糜棱岩的方解石中,为一组厚式机械双晶,数量较少,双晶纹较厚(1~5 μm),形成温度可能在150℃以上^[50-51]。

(4)旋转碎斑系:在眼球状花岗质糜棱岩中发

表1 新阳—元龙韧性剪切带定向薄片显微构造特征一览

Table 1 Microtectonic features of oriented thin sections from Xinyang—Yuanlong ductile shear zone

薄片号	采样位置	岩石名称	微观变形特征
XYZ01	新阳镇磨	钙质糜棱岩	方解石颗粒较小,具有明显的定向性,均一化程度较高,多为动态重结晶颗粒,也有部分已恢复静态重结晶,发育有机双晶,双晶纹弯曲。指向性不明显
XYZ02	石沟	二长花岗	典型S-C结构,石英集合体多被拉长呈多晶石英条带,部分动态重结晶(SGR);微斜长石多呈不对称旋转碎斑,斜长石发育有机双晶、亚颗粒,少量发生膨凸重结晶(BLG);云母多为变形的丝带状,显示明显定向性,具云母鱼、肯克带。显示具有右行剪切运动方向,也显示左行特征
XYZ05	新阳镇磨 石沟	质糜棱岩	条带状构造,石英呈丝带状,发育亚颗粒与动态重结晶颗粒(SGR+BLG),发育波状消光;长石呈旋转碎斑,具有亚颗粒特征;云母呈条带状分布,具明显定向性,见云母鱼与肯克带;兼具左、右行特征
XYZ06	新阳镇细 尾巴沟	花岗岩 质糜棱岩	典型糜棱结构,发育S-C结构;长石颗粒较大,多为碎斑,石英颗粒较小,多为碎基;石英出现颗粒边界动态重结晶(GBM)与单晶石英条带;长石碎斑显示核幔构造,发育机械双晶、书斜构造,基质中长石重结晶颗粒以BLG为主;云母发育云母鱼、肯克带、书斜构造、波状消光等。多显示右旋指向,偶见左旋剪切
YL01	新阳镇细 尾巴沟	黑云花岗 质糜棱岩	石英多呈条带状,动态重结晶颗粒SGR与BLG为主;长石发育波状消光、机械双晶与动态重结晶;云母发育波状消光、云母鱼及肯克带;剪切指向不明显,只能通过云母鱼判断右行剪切特征
YL03	元龙	二云花岗 质糜棱岩	矿物呈条带状分布,石英集合体以单晶、多晶条带状为主;长石重结晶颗粒以SGR与BLG为主,旋转碎斑指向不明显;云母也呈条带状,具云母鱼与肯克带,白云母与黑云母共生,据其交切关系判别白云母为晚期产物;剪切指向不明显,云母中偶见右行剪切特征
YL04	元龙	二云花岗 质糜棱岩	矿物呈条带状分布,云母发育云母鱼、肯克带,指示右行剪切特征;石英以多晶条带为主,具有波状消光、亚颗粒,见少量动态重结晶颗粒;长石显示亚颗粒与机械双晶
YL05	元龙	二云花岗 质糜棱岩	

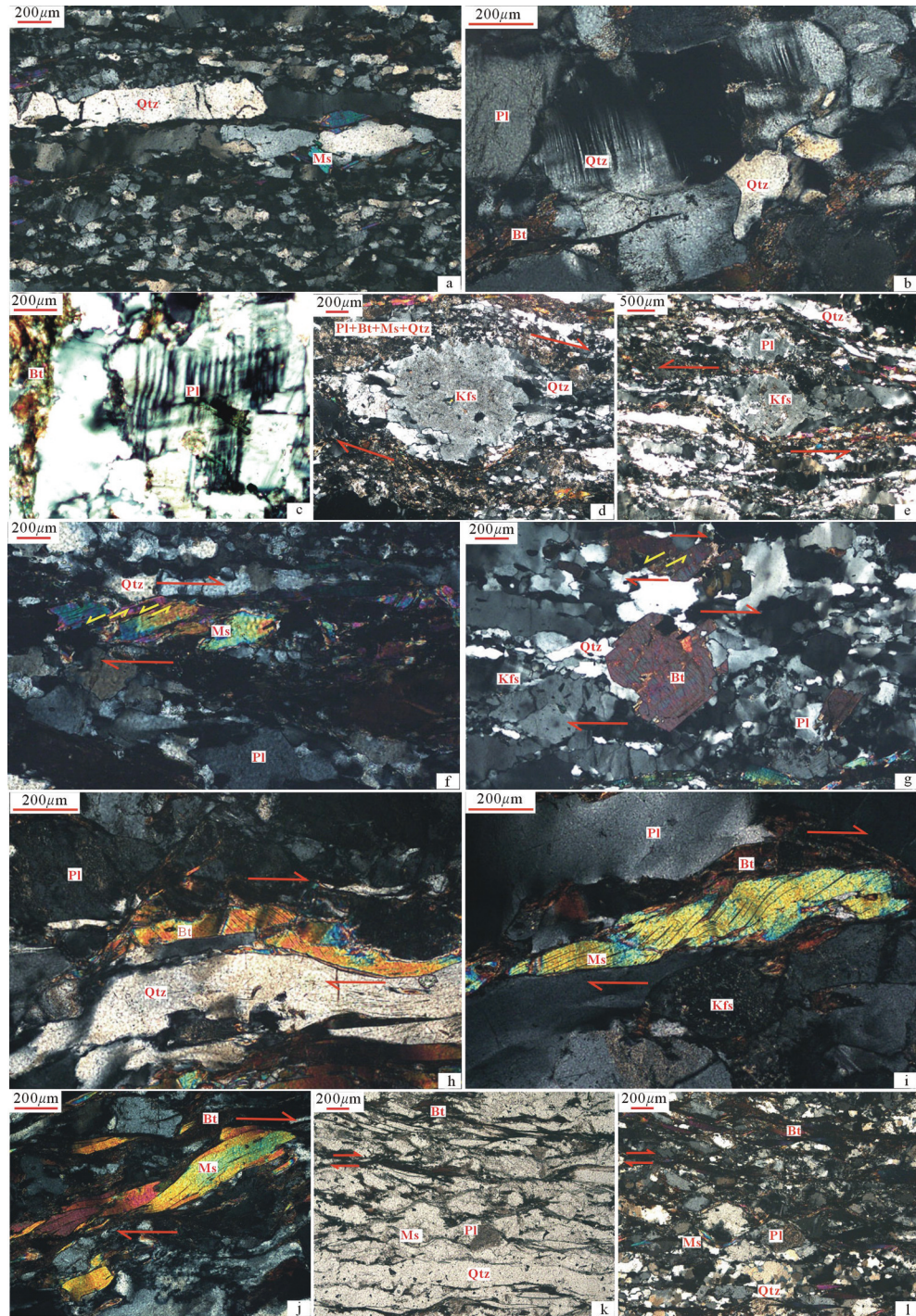


图7 新阳—元龙韧性剪切带中岩石显微构造特征

a—石英条带(+), 细尾子沟 XYZ06; b—石英变形纹(+), 元龙 YL05; c—斜长石机械双晶(+), 元龙 YL05; d, e—不对称旋转碎斑(+), 细尾子沟 XYZ06; f—书斜构造(+), 细尾子沟 XYZ05; g—压力影与书斜构造(+), 元龙 YL04; h—云母背克带(+), 元龙 YL05; i—云母鱼及解理膝折构造(+), 元龙 YL05; j—云母鱼构造(+), 元龙 YL03; k, l—S-C 组构, 元龙 YL01; Qtz—石英; Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母; Ms—白云母

Fig.7 Characteristics of rock microscopic structure in the Xinyang-Yuanlong ductile shear zone

a-Quartz ribbons(+), Xiweizigou XYZ06; b-Deformation lamella of quartz(+), Yuanlong YL05; c-Mechanical twin of plagioclase(+), Yuanlong YL05; d, e-Asymmetric rotational porphyroblast structure(+), Xiweizigou XYZ06; f-Bookshelf structure(+), Xiweizigou XYZ05; g-Pressure shadow and bookshelf structure(+), Yuanlong YL04; h-Kink bands of mica(+), Yuanlong YL05; i-Mica fish and kink bands of mica cleavage(+), Yuanlong YL05; j-Mica fish(+), Yuanlong YL03; k, l-S-C Fabric, Yuanlong YL01; Qtz-Quartz; Pl-Plagioclase; Kfs-K-feldspar; Bt-Biotite; Ms-Muscovite

育最为典型,脆性的长石构成残斑,石英、云母则表现为塑性变形构成基质,残斑内部常发育有裂隙或碎为几个颗粒,也具有波状消光等特征。碎斑系以“ σ ”型为主,根据其拖尾的不对称性可判断其多为右行剪切,也有左行剪切特征(图7-d、e)。

(5) 书斜构造:偶见于元龙地区花岗质糜棱岩的斜长石、云母及角闪石中,在不均匀简单剪切作用下,长石、云母等矿物被较规则地破碎成若干个小碎片,并沿碎片间的小裂隙发生旋转,形成倾斜叠置的一系列碎片,碎片滑动面与外部剪切运动指向夹角多大于 50° ,故碎片间相对滑动与外部剪切运动指向相反(图7-f、g)。

(6) 肯克带:多发育于新阳与元龙地区花岗质糜棱岩系列中的云母与斜长石中,均为单斜扭折带,云母多表现为解理弯曲扭折,扭折带较为细密(图7-h),而斜长石为双晶面发生扭折。Etheridge研究指出云母在温度较低($300 \sim 500^\circ\text{C}$),应变速率较高的条件下,扭折带密集狭窄^[52],据此可判断云母韧性变形温度较低。

(7) 云母鱼:在新阳与元龙地区花岗质糜棱岩系列中大量见到,多为白云母,有单个云母鱼,也有很多云母组成“鱼群”。云母在变形过程中形成类似鱼状的“ σ ”型拖尾,尾部常有细小的石英重结晶晶粒。云母鱼尾部与头部平行于剪切方向,据其不对称性可以判断运动剪切方向(图7-i~j)。

(8) 压力影:偶见于新阳细尾子沟花岗质糜棱岩中,压力影的“核晶”为黑云母或角闪石,“阴影”为长石、石英等碎基矿物,阴影显示出不对称剪切特征,也类似于“ σ ”型拖尾,其不对称性可指示剪切运动方向(图7-g)。

(9) S-C组构:在两地的花岗质糜棱岩中均可见到,C面理主要由黑云母、石英等组成,S面理主要由微斜长石碎斑、斜长石定向构成,S面与C面夹角较小(小于 45°),趋于平行,根据S面与C面锐夹角方位可以判断剪切运动方向(图7-k~l)。

显微镜下构造变形特征差异性显示剪切带内韧性变形的复杂多样性^[53]。对本区宏观与微观构造变形特征分析中,可知区内岩石的韧性变形是非常明显的,剪切指向既有右行,又有左行,但以右行为主,说明剪切变形虽然是复杂的,但主体上为右行剪切,在韧性变形的某一时期、某一部位可能存在

左行运动。宏观构造上具有明显的由NNE向SSW逆冲特征,但多受后期构造改造。故可推测区内韧性变形时早期曾受到了近N-NNE向的挤压应力作用,形成了近东西向展布倾向SSW向的紧闭同斜褶皱,具有由NNE向SSW左行逆冲特点;后期又经历近W-NWW向的剪切力作用,形成近东西向展布的右行韧性剪切带,伴随有NWW向拉伸线理及大量的右行不对称褶皱、透镜体、旋转碎斑系等。

3 岩石组构特征

韧性剪切带中矿物晶格优选方位(LPO)运用先进有效的电子背散射(electron backscatter diffraction, EBSD)技术,通过晶体背散射衍射图像(EBSP)来确定晶轴方向,进而确定晶体颗粒排列的取向性,其具有高分辨率,高晶向敏感度及精准的晶向分布与结构图像,更能客观反映样品中矿物晶格优选方位定向。本文EBSD组构分析所选样品为剪切带内的花岗质糜棱岩及钙质糜棱岩,样品位置见图2、4,样品显微特征见表1。首先根据岩石的宏观矿物线理和面理严格定向,即X轴平行于矿物的拉伸线理方向,Z轴平行于岩石面理的法线方向,Y轴在面理面内垂直线理方向,为运动学涡度矢量方向。沿垂直面理和平行线理的方向切制光学薄片,厚度约为 $30 \mu\text{m}$ 。EBSD分析在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行,测试样品要先经过高度机械抛光及贴导电胶条,然后将样品以 70° 左右倾斜置于SEM样品室进行测定,具体实验流程及相关参数见文献[54]。为保证测试精度,测试颗粒多选细小颗粒,做图采用下半球投影,极点等密度线以所占百分数表示。测定的矿物为石英、方解石。

3.1 石英晶格优选方位

本文对6件花岗质糜棱岩样品(XYZ05、XYZ06、YL01、YL03、YL04、YL05)的石英颗粒进行EBSD分析。由于石英颗粒的标定率较低,常需通过优化软件参数或者去掉不可信的分析数据来提高标定率,故本文为提高实验精度与可信度,采用机器识别、手工标定石英矿物模式。本次EBSD测定选择投影要素为石英颗粒的C轴 $\langle 0001 \rangle$ 及晶面 $\{10-10\}$, $\{10-11\}$, $\{11-20\}$ 。由于低温石英为三方晶系,C轴 $\langle 0001 \rangle$ 组构图与 $\{11-20\}$ 极图、C轴 \langle

$\{10\bar{1}0\}$ 与 $\{10\bar{1}0\}$ 极图呈法线关系,而 $\{11\bar{2}0\}$ 面与 $\{10\bar{1}0\}$ 面之间的夹角为 30° 。本次测定所获得各投影要素的组构图图形及等密线有所差异,但各图形之间具有明显一致性,均可反映矿物优选方位同一特点,本文选取最能表达极性特征的石英C轴 $\langle 0001 \rangle$ 组构图进行分析。

前人研究结果显示不同温度条件石英发育不同滑移系,即底面滑移系 $\{0001\}\langle a \rangle$,形成温度 $T < 400^\circ\text{C}$;菱面滑移系 $\{1\bar{1}01\}\langle a \rangle$,形成温度 $T = 400\sim 550^\circ\text{C}$;柱面 $\langle a \rangle$ 滑移系 $\{10\bar{1}0\}\langle a \rangle$,形成温度 $T = 550\sim 650^\circ\text{C}$;柱面 $\langle C \rangle$ 滑移系 $\{10\bar{1}0\}\langle C \rangle$,形成温度 $T > 650^\circ\text{C}$ ^[10, 55-57],故可根据石英晶格优选方位特征判断石英发育的滑移系,进而推断岩石形成温度^[58],此外也可根据组构对称性判断其运动方向^[10]。测试结果显示,样品XYZ05石英晶格优选方位呈单斜单环带型式,靠近Z轴具有2个集密部,最强集密部为3.34%,以中低温菱面组构为主,其组构对称性指示NWW向的右行剪切。样品XYZ06石英晶格优选

方位也呈单斜单环带型式,在Z轴附近出现多个集密部,最强集密为3.92%,出现低温底面组构与中低温菱面组构,具有NWW向右行剪切特征。样品YL01为交叉环带型式,一环带清晰,另一环带模糊,靠近X轴与Z轴有多个集密部,最强集密为3.09%,发育中温柱面 $\langle a \rangle$ —中低温菱面—低温底面组构演化,低温组构指示左行剪切,中温组构指示NWW向右行剪切特征。样品YL03显示呈单斜单环带型式,X轴出现集密部,最强集密为5.13%,显示中温柱面 $\langle a \rangle$ 组构—低温底面组构的演化,其对称性指示强烈右行剪切。样品YL04为交叉环带型式,靠近X轴与Z轴具有2个集密部,最强集密为3.49%,显示以中温柱面 $\langle a \rangle$ 组构与低温底面组构为主,兼具低温左行剪切与中温右行剪切特征。YL05为单斜水平环带,靠近Z轴两侧出现集密,最强集密为3.39%,显示以低温底面组构为主,组构对称性指示右行剪切。

因此,石英晶格优选方位多呈单斜大圆环带型

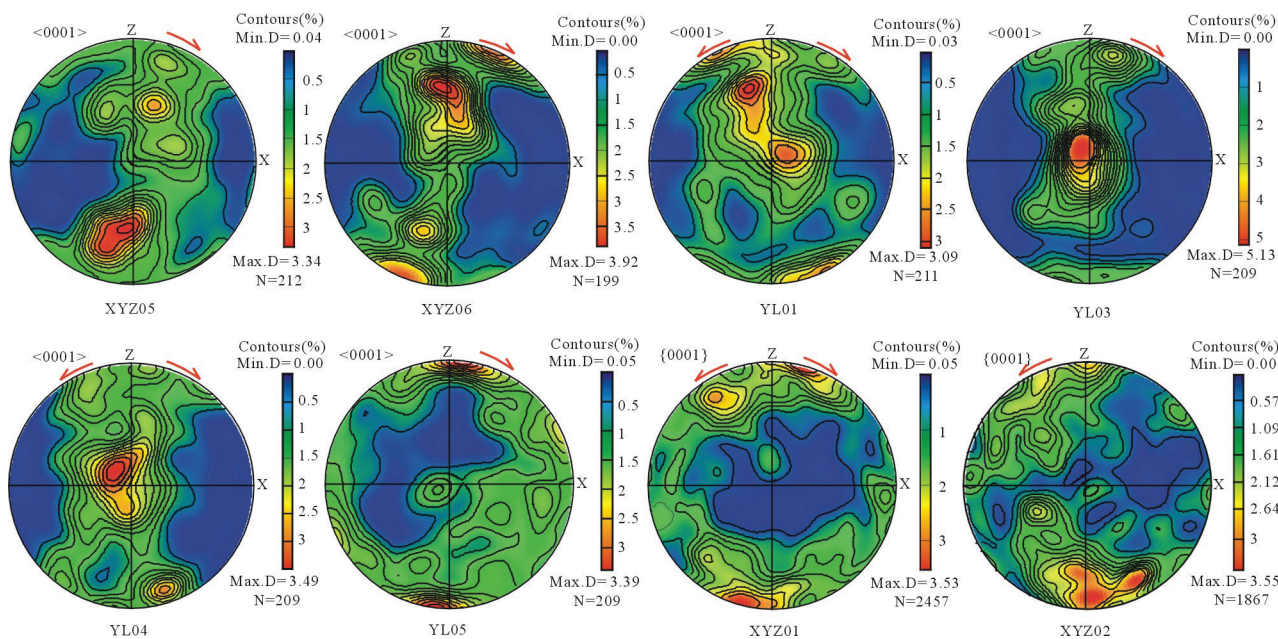


图8 新阳—元龙韧性剪切带矿物晶格优选定向(EBSD测量)

为下半球等面积投影;XYZ05、XYZ06、YL01、YL03、YL04、YL05为石英晶格优选定向;XYZ01、XYZ01为方解石晶格优选定向;

X—拉伸线理方向,XY—面理,N—测量的点数;Max.D—最大密度,Min.D—最小密度

Fig.8 LPOs of minerals from rocks of the Xinyang-Yuanlong ductile shear zone on the north margin of Western Qinling Mountains (by EBSD measurement)

Lower hemisphere, equal area projection;XYZ05, XYZ06, YL01, YL03, YL04, YL05 are LPOs of quartz and XYZ01, XYZ01 are LPOs of calcite;

X—Stretching lineation, XY—Foliation plane, N—Measurement points; Max.D—Maximum density, Min.D—Minimum density

式,指示非共轴变形,其组构研究表明剪切带中变形岩石经历了中温(550~650℃)—中低温(400~500℃)—低温(<400℃)的一系列韧性变形过程,其组构对称性均指示明显的NWW向的右行剪切及不太明显的左行剪切滑移方向,右行韧剪变形温度为中温—中低温—低温,而左行韧剪变形温度以低温为主,偶见中低温。显微镜下单晶石英条带、石英的颗粒边界迁移动态重结晶(GBM)及长石的亚颗粒旋转重结晶(SGR)的出现指示中温组构,石英的多晶条带、亚颗粒旋转重结晶(SGR)及长石的膨凸重结晶(BLG)、扭折带、核幔构造、书斜构造等韧性变形指示中低温组构,而石英波状消光、变形纹、亚颗粒,长石的波状消光、机械双晶及云母的塑性变形均显示低温组构变形特征。野外观察到的早期左行逆冲构造与显微镜下及石英组构显示的NWW向左行剪切为同期构造,后期又经历强烈右行走滑运动,野外露头、显微构造及石英组构均保留明显痕迹。

3.2 方解石晶格优选方位

本文对2件钙质糜棱岩样品(XYZ01、XYZ02)的方解石颗粒进行EBSD分析,测试颗粒多选细小颗粒,由于实验过程对方解石识别率可达99%以上,故实验过程采用机器自动识别与标定方解石矿物。本次EBSD测定选择投影要素为方解石颗粒的C轴<0001>及晶面{10-10}, {10-11}, {11-20}。方解石属三方晶系,各投影要素的组构图之间具有相关性,其等密线虽有所差异,但具有明显一致性,故本文只选择具有普遍意义且有效的方解石C轴<0001>的优选方位型式进行。

郑伯让等^[59]对前人大量实验研究结果总结指出,方解石具有三种滑移系:① e_1 双晶滑动,滑动方向为 $[e_1:r_2]$,指向为正,温度为20~800℃;② r_1 平移滑动,滑动方向为 $[f_1:f_2]$,指向为负(也有利于 e 双晶滑动),温度为300~400℃或更高;③ f_1 平移滑动,滑动方向为 $[f_1:f_2]$,指向正、负均可,滑移温度为500~600℃^[55]。本次测试的2件样品的方解石晶格优选方位均为单斜大圆环带型式,靠近Z轴两侧出现集密,最强集密分别为3.53%、3.55%,组构显示明显 e_1 双晶滑移与 r_1 平移滑动,据此可以推断滑移温度为300~400℃。组构对称性分别显示较清晰的NWW向右行剪切与左行剪切,这与石英晶格优选方位、

野外露头及显微构造所得结论一致。

4 变形温压环境分析

岩石与矿物的变形受控于温度、压力,岩石、矿物在不同的温压环境条件下,受不同的变形机制控制,会显示出不同的变形行为与变形现象及变形矿物、基质矿物组合特征。故可根据矿物特定的变形现象及矿物晶格优选方位,变形矿物、基质矿物组合来推断其变形时的温压条件^[49,57]。在新阳一元龙韧性剪切带不同区段岩石矿物的变形习性稍有差异,既可见到低绿片岩相条件(300~400℃)下石英波状消光、变形纹、亚颗粒、膨凸重结晶颗粒(BLG)及长石的波状消光、机械双晶及云母的塑性变形现象,也可见到高绿片岩相条件(400~500℃)下石英的多晶条带、亚颗粒旋转重结晶(SGR)及长石的膨凸重结晶(BLG)、扭折带、核幔构造、书斜构造等韧性变形,甚至可见到低角闪岩相条件(500~600℃)下单晶石英条带、石英的颗粒边界迁移动态重结晶(GBM)及长石的亚颗粒旋转重结晶(SGR)的出现。其基质矿物组合为:石英+斜长石+微斜长石+云母(黑云母、白云母)+(锆石+磁铁矿+少量绿泥石等),代表绿片岩相—低角闪岩相变形环境。此外,EBSD石英组构优选方位也显示出低温—中温组构演化特征,与上述所得结果基本一致。造成这一变化与差异性的原因有多种,可能为相同条件下不同应变速率所造成的差异性,但早古生代以来该区域内多期多层次构造叠加可能为其主要原因。因此,新阳一元龙韧性剪切带经历了低绿片岩相—高绿片岩相—低角闪岩相韧性变形环境,从而形成中、低温转化岩石矿物变形行为、变形现象及矿物晶格优选方位型式。

5 韧性剪切带形成演化过程与大地构造意义

新阳一元龙韧性剪切带具有多期构造变形特征,显示韧性逆冲与走滑双重特征。韧性逆冲型和滑脱型剪切带的形成及演化一般与大洋(盆)俯冲增生和弧陆—陆陆碰撞造山过程的中下地壳收缩有关;而走滑型韧性剪切带常与地体之间的斜向汇聚和碰撞有成因联系^[8]。

近年来大量研究表明,新阳一元龙韧性剪切带

表2 新阳—元龙韧性剪切带内矿物晶格优选方位EBSD测试结果

Table 2 EBSD-measured results of rocks from the Xinyang–Yuanlong ductile shear zone on the north margin of Western Qinling Mountains

构造位置	样品编号	岩性	产状		测试矿物	EBSD测点	组构类型 (变形温度/°C)	主要剪切指向	次要剪切指向
			面理	线理					
天水新阳镇磨石沟	XYZ01	钙质糜棱岩	0°∠86°	278°∠20°	方解石	2457	e ₁ 双晶滑移(20~800)与r ₁ 平移滑动(300~400)	右旋剪切	左旋剪切
	XYZ02	钙质糜棱岩	5°∠85°	280°∠20°	方解石	1867	e ₁ 双晶滑移(20~800)与r ₁ 平移滑动(300~400)	左旋剪切	
天水新阳镇尾子沟	XYZ05	二长花岗岩质糜棱岩	348°∠33°	290°∠17°	石英	212	菱面组构(400~550)	右行剪切	
	XYZ06	花岗闪长质糜棱岩	5°∠43°	295°∠16°	石英	199	底面组构(<400)与菱面组构(400~550)	右旋剪切	
天水元龙	YL01	黑云花岗岩质糜棱岩	215°∠66°	135°∠30°	石英	211	柱面<a>(550~650)一菱面(400~550)一底面(<400)组构	右旋剪切(中温—中低温—低温)	左旋剪切(低温)
	YL03	二云花岗岩质糜棱岩	185°∠50°	145°∠35°	石英	209	柱面<a>(550~650)一底面(<400)组构	右旋剪切(中温—低温)	
	YL04	二云花岗岩质糜棱岩	195°∠48°	140°∠35°	石英	209	柱面<a>组构(550~650)与底面组构(<400)	右旋剪切(中温—低温)	左旋剪切(低温)
	YL05	二云花岗岩质糜棱岩	175°∠41°	145°∠31°	石英	209	底面组构(<400)	右旋剪切	

内发育大量新元古代早期(980~910 Ma)的同碰撞花岗岩,响应Rodinia超大陆汇聚^[27, 41~43]。东秦岭地区蔡凹后碰撞I型花岗岩体((889±10)Ma)^[60]与商南后碰撞I型花岗岩体((889±22)Ma)^[61~63]等岩体的同位素年龄的确定,标志着北秦岭新元古代碰撞汇聚事件的结束。然而,剪切带内中未见到再次裂解扩张的物质记录,可能指示北秦岭微地块和陇山地块于新元古代早期汇聚拼合之后直至早古生代早期一直处于相对稳定阶段,从未响应Rodinia超大陆于新元古代晚期的裂解事件。秦岭地区南部大范围的大陆溢流型火山岩^[63~65]、陆内裂谷岩浆活动^[17~19]及800 Ma左右代表伸展拉张作用岩浆活动^[59]指示秦岭地区在剪切带南侧的“商丹—天水—武山”一线发生裂解,标志着原特提斯洋近华北地块南缘的一个边缘多岛洋分支——“商丹—天水—武山”洋盆开始打开。而秦祁结合部位天水—武山构造带在古生代的构造演化过程就是在新元古代末期原特提斯洋的形成演化基础上延续和发展的。新阳—元龙韧性剪切带的构造变形与构造演化也响应天水—武山构造带在古生代的构造演化过程。

早古生代时期西秦岭北缘构成古洋陆构造格局,并经历了天水—武山洋壳的形成、洋壳由南向

北的俯冲消减直至弧—陆或陆—陆碰撞造山的构造演化过程^[28]。晚寒武世关子镇—武山蛇绿岩为代表的古洋盆于奥陶纪发生由南向北的俯冲消减,形成了以奥陶系李子园群为代表的岛弧—弧前盆地变质火山—沉积岩系^[23]。而后发生大规模向北的俯冲,形成典型岛弧环境下的晚奥陶世草滩沟群变质火山岩^[66]、岛弧型流水沟岩浆杂岩((471±1.4)Ma)^[67]与百花岩浆杂岩((449.7±3.1)Ma)^[68]及俯冲型红花铺英云闪长岩体((450.5±1.9)Ma)^[64]。志留纪俯冲消减结束,进入全面陆—陆或陆—弧碰撞,形成一系列碰撞型岩浆岩,如党川花岗岩体的形成时代为(438±3) Ma^[69]、熊山沟花岗岩体的形成时代为(438.1±2.6) Ma(裴先治,未刊),草川铺花岗岩体的形成时代为(434±10) Ma^[70]。同时在祁连造山带东段也发育以阎家店石英闪长岩(440.2±0.92 Ma)^[25]和黄门川花岗闪长岩((440.5±4.4)Ma)^[71]为代表的加里东期岛弧型深成侵入岩体,另外在北祁连东段葫芦河流域发育以葫芦河群为代表的一套类前陆盆地浅变质碎屑沉积岩系(LA-ICP-MS碎屑锆石年龄上限(447~434)Ma)^[29]为代表的类前陆盆地沉积。这表明在早古生代,北祁连东端和西秦岭北缘主洋盆已大规模俯冲消减、陆弧—陆陆碰撞造山。

早古生代西秦岭北缘的俯冲-碰撞不仅造成大规模的岩浆活动与之响应,还使秦祁结合部位出现大规模的区域构造变形。北秦岭构造带和北祁连造山带东段各岩石单位中均可见指示左行逆冲剪切变形特征(不对称褶皱、固态流变褶皱、拉伸线理、不对称构造透镜体等),可能是志留纪天水-武山洋闭合导致大规模的NNE-SSW向的陆-弧或陆-陆碰撞逆冲的强烈响应,位于天水-武山主缝合带北侧的新阳一元龙韧性剪切带中发育的左行逆冲剪切构造变形(包括宏观与微观特征)是对此次构造运动的最好记录。NNW向的左行剪切运动是对NNE-SSW向的挤压应力的调整,意味着志留纪大规模NNE-SSW向的陆-弧或陆-陆碰撞逆冲开始,北祁连造山带东段与北秦岭构造带的碰撞逆冲实现了二者之间的早期韧性剪切变形。

经历晚志留世一早泥盆世后碰撞之后,中泥盆世秦祁结合部位进入陆内演化阶段。丁仁平等^[44]最新获得新阳一元龙韧性剪切带花岗质糜棱岩中黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar同位素坪年龄(新阳(347.95±2.17)Ma,元龙(351.70±1.72)Ma),而本次EBSD石英C轴组构获得带内花岗质糜棱岩形成温度可达中温(550~650°C),明显高于黑云母的封闭温度(300±50°C)^[72-73],推断该年龄为韧性剪切带形成后黑云母的冷却年龄,代表该韧性剪切带的形成上限,即该韧性剪切带在早石炭世时已发生了强烈的右行走滑运动。受海西构造运动的影响,秦祁结合部位位于晚泥盆世一早石炭世发生强烈的陆内造山作用,使得北秦岭与北祁连造山带东段之间发生强烈的NNW向大规模右行走滑运动,受鄂尔多斯刚性块体阻挡,北祁连造山带东段与北秦岭构造带整体产生向东挤入鄂尔多斯刚性块体南缘的趋势,同时使得南秦岭发生向西的挤出运动,最终使得秦祁结合部位发生右旋剪切,从而造成泥盆纪及之前的地层发生扭动形成现今秦祁结合部位反“S”型构造样式,最终形成了新阳一元龙大型右行韧性走滑边界构造带。在秦祁结合部位确定的华力西期花岗岩以及获得的晚泥盆世一早石炭世构造热事件的年龄值,表明剪切带内发生强烈的右行韧性剪切作用的同时还伴有广泛的区域性褶皱构造以及岩浆活动。在这一构造运动过程中,剪切带内发育大量右行剪切构造形迹(不对称褶皱、构造透镜体及S-C

组构等),先期左行剪切运动已被强烈改造,元龙地区面理的一致南倾也是受该大型旋扭而发生的构造变位。而后,该剪切带可能被抬升至地表浅层次,发生脆性变形。

综上,新阳一元龙韧性剪切带在古生代经历了至少2期强烈的韧性构造变形:一是志留纪韧性左行逆冲构造变形,对应志留纪天水-武山洋闭合导致的大规模的俯冲碰撞事件;二是晚泥盆世一早石炭世右行走滑构造变形,对应秦祁结合部位强烈的大规模右行走滑拼贴运动,从而使祁连造山带与秦岭造山带,呈巨大的反“S”的几何斜接构造关系拼贴在一起,之后共同经历印支期及中生代陆内构造作用的叠加改造。

6 结 论

通过对新阳一元龙韧性剪切带的构造变形特征系统研究,对其几何学、运动学与动力学进行分析,初步探讨其变形环境与变形演化历史。本文得出以下结论:

(1)新阳一元龙韧性剪切带宽3~4.5 km,沿渭河流域呈NNW向分布,不同部位韧性变形强度有所不同,剪切带内发育不对称褶皱、不对称旋转碎斑系及S-C组构等宏观构造特征,新阳地区面理一致北倾,线理倾伏向为NNW向,而元龙地区面理一致南倾,线理倾伏向为SEE向,可能是右行走滑剪切作用造成。也发育波状消光、旋转碎斑、云母鱼等微观构造特征,不同显微构造变形显示剪切带内岩石经历初期变形—强韧性变形—调整恢复—重结晶的韧性变形。不对称构造指示剪切指向既有右行,又有左行,但以右行为主,宏观构造上具有明显的由NNE向SSW逆冲特征,但多受后期构造改造。

(2)EBSD分析结果表明,石英C轴优选方位指示非共轴变形,显示柱面<a>、菱面、底面组构,显示明显的右行剪切及不太明显左行剪切特征,右行韧剪变形以中温柱面<a>-中低温菱面-低温底面组构为特征,而左行韧剪变形以低温底面组构为主,偶见中低温;方解石C轴组构显示e₁双晶滑移与r₁平移滑动,推断滑移温度约为300~400°C,具有左行、右行剪切特征。反映本区可能经历了中温-中低温-低温,以右行韧性走滑为主并曾出现过左行逆冲的复杂变形过程。

(3)通过显微构造、变质矿物组合及矿物晶格优选方位综合分析,推断新阳—元龙韧性剪切带经历了低绿片岩相—高绿片岩相韧性变形环境,部分甚至可达低角闪岩相变形环境。

(4)通过区域对比分析,新阳—元龙韧性剪切带响应古生代构造演化的构造变形记录主要为两期:一是志留纪天水—武山洋闭合导致大规模NNE—SSW向的陆—弧或陆—陆碰撞逆冲造成的左行逆冲剪切变形;二是晚泥盆世—早石炭世秦祁结合部位强烈的大规模右行走滑拼贴运动形成的右行剪切变形和反“S”构造样式。

致谢: EBSD测试过程中得到中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室的支持与帮助,野外工作和论文写作过程中得到李小兵、陈国超博士及魏方辉、高景民、吴树宽、王银川、胡楠、杨杰等硕士的大力帮助,在此表示衷心的感谢。同时感谢评审专家及编辑部李亚萍老师提出的宝贵意见。

参考文献(References):

- [1] 郑亚东,常志忠. 岩石有限应变测量及韧性剪切带[M]. 北京:地质出版社,1985:103-174.
Zheng Yadong, Chang Zhizhong. Rock Finite Strain Measurement and Ductile Shear Zone[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 103-174(in Chinese).
- [2] Reston T J. Mantle shear zone and the evolution of the northern North Sea basin[J]. *Geology*, 1990, 18: 272-275.
- [3] 唐哲明,陈方远. 剪切指向转换的韧性剪切带——中国大陆科学钻探工程(CCSO)主孔中韧性剪切带(深度2010~2145m)的EBSD特征及运动学研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(12): 3309-3316.
Tang Zheming, Chen Fangyuan. Ductile shear zone of changed shear sense: EBSD characteristics and kinematics of ductile shear zone from 2010 to 2145 m Of the main borehole in Chinese Continental Scientific Drilling(CCSO)[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(12): 3309-3316(in Chinese with English abstract).
- [4] Stefano Vitale, Stefano Mazzoli. Strain analysis of heterogeneous ductile shear zones based on the attitudes of planar markers[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(3): 321-329.
- [5] Brígida Castro de Machuca, Sergio Delpino, Lorena Previley, et al. Tectono-metamorphic evolution of a high- to medium- grade ductile deformed metagabbro/metadiorite from the Arenosa Creek Shear Zone, Western Sierras Pampeanas, Argentina[J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 42: 261-278.
- [6] 李小兵,裴先治,刘成军,等. 东昆仑东段东昆中构造带韧性剪切作用及其地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(2): 419-436.
Li Xiaobing, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, et al. Ductile shearing in the eastern segment of Central Kunlun tectonic belt and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2014, 41(2): 419-436 (in Chinese with English abstract).
- [7] 齐金忠,戚学祥,陈方远. 南苏鲁高压变质带南岗—高公岛韧性剪切带特征及EBSD石英组构分析[J]. *中国地质*, 2005, 32(2): 287-298.
Qi Jinzhong, Qi Xuexiang, Chen Fangyuan. Characteristics of the Nangang—Gaogongdao ductile shear zone in the South Su—Lu high-pressure metamorphic belt and EBSD fabric analysis of quartz[J]. *Geology in China*, 2005, 32(2): 287-298(in Chinese with English abstract).
- [8] 曹淑云,刘俊来. 岩石显微构造分析现代技术——EBSD技术及应用[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(10): 1091-1096.
Cao Shuyun, Liu Junlai. Modern techniques for the analysis of rock microstructure: EBSD and its application[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(10): 1091-1096(in Chinese with English abstract).
- [9] 许志琴,蔡志慧,张泽明,等. 喜马拉雅东构造结——南迦巴瓦构造及组构运动学[J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1463-1476.
Xu Zhiqin, Cai Zhihui, Zhang Zeming, et al. Tectonics and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7): 1463-1476(in Chinese with English abstract).
- [10] 许志琴,王勤,梁风华,等. 电子背散射衍射(EBSD)技术在大陆动力学研究中的应用[J]. *岩石学报*, 2009, 25(7): 1721-1736.
Xu Zhiqin, Wang Qin, Liang Fenghua, et al. Electron backscatter diffraction(EBSD) technique and its application to study of continental dynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(7): 1721-1736(in Chinese with English abstract).
- [11] 杨晓勇. 论韧性剪切带研究及其地质意义[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 765-771.
Yang Xiaoyong. On the studies of ductile share zones: their geological significance[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(7): 765-771(in Chinese with English abstract).
- [12] Wang Yongsheng, Xiang Biwei, Zhu Guang, et al. Structural and geochronological evidence for Early Cretaceous orogen-parallel extension of the ductile lithosphere in the northern Dabie orogenic belt, East China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2011, 33: 362-380.
- [13] 宋志高,贾群子,张治洮,等. 北秦岭—北祁连(天水—宝鸡间)早古生代火山岩系及其构造连接关系的研究[J]. *西北地质科学*, 1991, 34: 1-82.
Song Zhigao, Jia Qunzi, Zhang Zhitao, et al. The early Palaeozoic volcanic rock series and its interconnection relationship between the north Qinling and the north Qilian Orogens[J]. *Northwest Geoscience*, 1991, 34: 1-82(in Chinese with English abstract).
- [14] 张维吉,孟宪陶,胡健民,等. 祁连—北秦岭造山带接合部位构造特征与造山过程[M]. 西安:西北大学出版社,1994:1-283.

- Zhang Weiji, Meng Xianxun, Hu Jianmin, et al. Structure Characteristics and Orogenic Process in the Junction of Qilian Orogenic Belt and Northern Qinling Orogenic belt[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1994: 1-283(in Chinese).
- [15] 张国伟, 于在平, 董云鹏, 等. 秦岭区前寒武纪构造格局与演化问题探讨[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 11-21.
- Zhang Guowei, Yu Zaiping, Dong Yunpeng et al. On Precambrian framework and evolution of the Qinling belt.[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(1): 11-21(in Chinese with English abstract).
- [16] 张国伟, 郭安林, 姚安平. 中国大陆构造中的西秦岭—松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 23-32.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Yao Anping. Western Qinling—Songpan continental tectonic node in China's continental tectonics[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 23-32(in Chinese with English abstract).
- [17] 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 秦岭中—新元古代地质演化及对RODINIA 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-194.
- Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong, et al. Mesoproterozoic—early Neoproterozoic Evolution of the Qinling Orogen and on the Response of the Rodinia supercontinent events[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2003: 1-194 (in Chinese).
- [18] 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中—新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, 2004, 23(2): 107-112.
- Lu Songnian, Chen Zhihong, Li Huaikun, et al. Late Mesoproterozoic—Early Neoproterozoic evolution of the Qinling orogen[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(2): 107-112(in Chinese with English abstract).
- [19] 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带[J]. 地质学报, 2005, 79(2): 165-173.
- Lu Songnian, Chen Zhihong, Li Huaikun, et al. Two Magmatic Belts of the Neoproterozoic in the Qinling Orogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2): 165-173(in Chinese with English abstract).
- [20] 裴先治, 丁仁平, 胡波, 等. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1202-1208.
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Hu Bo, et al. Definition of the Guanzizhen ophiolite in Tianshui area, western Qinling, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(12): 1202-1208(in Chinese with English abstract).
- [21] 裴先治, 李勇, 陆松年, 等. 西秦岭天水地区关子镇中基性岩浆杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2005, 24(1): 23-29.
- Pei Xianzhi, Li Yong, Lu Songnian, et al. Zircons U-Pb ages of the Guanzizhen intermediate-basic igneous complex in Tianshui area, West Qinling, and their geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(1): 23-29(in Chinese with English abstract).
- [22] 裴先治, 李佐臣, 丁仁平, 等. 西秦岭天水地区岛弧型基性岩浆杂岩的地球化学特征及形成时代[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 529-540.
- Pei Xianzhi, Li Zuochen, Ding Saping, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb ages of island-arc basic igneous complexes in the Tianshui area, West Qinling[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 529-540(in Chinese with English abstract).
- [23] 裴先治, 刘会彬, 丁仁平, 等. 西秦岭天水地区李子园群变质火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(2): 193-205.
- Pei Xianzhi, Liu Huibin, Ding Saping, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of the meta-volcanic rocks in the Liziyuan Group from Tianshui area, Westren Qinling Orogen[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(2): 193-205 (in Chinese with English abstract).
- [24] 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代: 来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1550-1561.
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Li Zuochen, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the gabbro from the Guanzizhen ophiolite in the northern margin of the Western Qinling and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1550-1561 (in Chinese with English abstract).
- [25] 裴先治, 刘战庆, 丁仁平, 等. 甘肃天水地区百花岩浆杂岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球科学进展, 2007, 22(08): 818-827.
- Pei Xianzhi, Liu Zhanqing, Ding Saping, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of the gabbro from the Baihua igneous complex in Tianshui Area, Eastern Gansu, and its geological significance[J]. Advance in Earth Science, 2007, 22(8): 818-827 (in Chinese with English abstract).
- [26] 裴先治, 孙仁奇, 丁仁平, 等. 陇东地区阎家店闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 8-16.
- Pei Xianzhi, Sun Renqi, Ding Saping, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Yanjiadian diorite in the eastern Qilian Mountains and its geological significance[J]. Geology in China, 2007, 34(1): 8-16(in Chinese with English abstract).
- [27] 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 西秦岭北缘新元古代花岗质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 772-786.
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Zhang Guowei, et al. Zircons LA-ICP-MS U-Pb dating of Neoproterozoic granitoid gneisses in the north margin of West Qinling and geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 773-786(in Chinese with English abstract).
- [28] 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 西秦岭北缘早古生代天水—武山构造带及其构造演化[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1547-1564.
- Pei Xianzhi, Ding Saping, Li Zuochen, et al. Early Paleozoic

- Tianshui—Wushan Tectonic zone of the northern margin of West Qinling and its tectonic evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(11): 1547–1564(in Chinese with English abstract).
- [29] 裴先治, 李佐臣, 李瑞保, 等. 祁连造山带东段早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄: 源区特征和沉积时代的限定[J]. *地学前缘*, 2012, 19(5): 205–224.
Pei Xianzhi, Li Zuochen, Li Ruibao, et al. LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircon from the meta-detrital rocks of the Early Palaeozoic Huluhe Group in eastern part of Qilian orogenic belt: Constraints of material source and sedimentary age[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(5): 205–224(in Chinese with English abstract).
- [30] Pei Xianzhi, Li Zuochen, Liu Huibin, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb isotopic ages of island-arc basic igneous complexes from the Tianshui area in West Qinling[J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2007, 1(1): 49–59.
- [31] Pei Xianzhi, Ding Saping, Zhang Guowei, et al. The LA-ICP-MS zircons U-Pb ages and geochemistry of the Baihua basic igneous complexes in Tianshui area of West Qinling[J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 2007, 50(supp.2): 264–276.
- [32] 丁仁平, 裴先治, 李勇, 等. 西秦岭天水地区“李子园群”的解体及其构造环境浅析[J]. *地质通报*, 2004, 23(12): 1209–1214.
Ding Saping, Pei Xianzhi, Li Yong, et al. Analysis of the disintegration and tectonic setting of the “Liziyuan Group” in the Tianshui area, western Qinling[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(12): 1209–1214(in Chinese with English abstract).
- [33] 丁仁平, 裴先治, 胡波, 等. 甘肃天水地区新生代火山岩地球化学特征及其成因[J]. *地质与勘探*, 2005, 41(1): 33–37.
Ding Saping, Pei Xianzhi, Hu Bo, et al. Geochemical characteristics and origin of cenozoic acid volcanic rocks in the Tianshui area, Gansu Province[J]. *Geology and Prospecting*, 2005, 41(1): 33–37(in Chinese with English abstract).
- [34] 胡波, 裴先治, 丁仁平, 等. 甘肃天水地区红土堡变基性岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *地质通报*, 2005, 24(3): 258–263.
Hu Bo, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. Geochemical characteristics of the Hongtubao Metabasic rocks in the Tianshui area, Gansu, and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(3): 258–263(in Chinese with English abstract).
- [35] 董云鹏, 张国伟, 杨钊, 等. 西秦岭武山 E-MORB 型蛇绿岩及相关火山岩地球化学[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(S1): 199–208.
Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Yang Zhao, et al. Geochemical characteristics of Wushan E-MORB ophiolite and related volcanic rocks in West Qinling[J]. *Science in China(Series D)*, 2007, 37(S1): 199–208(in Chinese).
- [36] Dong Yunpeng, Genser Johann, Neubauer Franz, et al. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the exhumation history of the North Qinling terrane, China[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(4): 881–893.
- [37] Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Hauzenberger Christoph, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. *Lithos*, 2011, 122(12): 39–56.
- [38] Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer Franz, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(3): 213–237.
- [39] 何进忠, 姚书振. 新元古代以来甘肃西秦岭造山过程的地球化学证据及其成矿背景[J]. *中国地质*, 2011, 38(3): 637–656.
He Jinzhong, Yao Shuzhen. Geochemical evidence for the orogenic process of West Qinling in Gansu since Neoproterozoic and its metallogenic background[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 637–656(in Chinese with English abstract).
- [40] 陈伟男, 裴先治, 刘成军, 等. 西秦岭舒家坝地区太阳寺岩组碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *中国地质*, 2014, 41(3): 741–755.
Chen Weinan, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, et al. U-Pb ages of detrital zircons from Taiyangsi Rock Group in Shujiba area of West Qinling Mountains and their geological significance[J]. *Geology in China*, 2014, 41(3): 741–755(in Chinese with English abstract).
- [41] 刘会彬, 裴先治, 丁仁平, 等. 西秦岭天水市元龙地区新元古代花岗质片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(11): 1315–1320.
Liu Huibin, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Neoproterozoic granitic gneisses in the Yuanlong area, Tianshui City, West Qinling, China, and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(11): 1315–1320(in Chinese with English abstract).
- [42] 丁仁平, 裴先治, 刘会彬, 等. 西秦岭天水地区新元古代花岗质片麻岩的锆石 LA-ICP-MS 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2006, 33(6): 1217–1225.
Ding Saping, Pei Xianzhi, Liu Huibin, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of the Xinyang Neoproterozoic granitoid gneisses in the Tianshui area, western Qinling, and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2006, 33(6): 1217–1225(in Chinese with English abstract).
- [43] 刘成军, 裴先治, 李佐臣, 等. 西秦岭北缘天水地区新元古代花岗质片麻岩地球化学特征及其形成环境[J]. *地质通报*, 2012, 31(10): 1588–1601.
Liu Chengjun, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. Geochemical features and tectonic setting of the Neoproterozoic granitic gneiss in Tianshui area on the northern margin of West Qinling[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(10): 1588–1601(in Chinese with English abstract).
- [44] 丁仁平, 裴先治, 李勇, 等. 西秦岭北缘新元—元龙韧性剪切带中花岗质糜棱岩黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质意义[J]. *地质学报*, 2009, 83(11): 1624–1632.

- Ding Saping, Pei Xianzhi, Li Yong, et al. Biotite ^{40}Ar – ^{39}Ar Ages of Granitic Mylonite at the Xinyang—Yuanlong Ductile Shear Zone in the north margin of West Qinling and their geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(11): 1624–1632 (in Chinese with English abstract).
- [45] 任纪舜. 中国大陆构造的基本模型[J]. *地球学报*, 1995, 3: 328–330.
- Ren Jishun. The model of Chinese continental tectonics[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1995, 3: 328–330(in Chinese with English abstract).
- [46] 丁仁平. 西秦岭—祁连造山带(东段)交接部位早古生代构造格架及构造演化[D]. 长安大学博士学位论文, 2008: 1–162.
- Ding Saping. Early Palaeozoic Tectonic Framework and Evolution in the Junction of Western Qinling Orogenic Belt and Qilian Orogenic Belt[D]. Doctoral thesis(Chang an University), 2008: 1–162(in Chinese with English abstract).
- [47] Passchier C W, Simpson C. Porphyroclasts systems as kinematic indicators[J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8(8): 831–843.
- [48] Passchier C W. Mixing in flow perturbations: a model for development of mantled porphyroclasts in mylonites[J]. *Journal of Structural Geology*, 1994, 16(5): 733–736.
- [49] 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 等. 变形显微构造识别手册[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1–83.
- Hu Ling, Liu Junlai, Ji Mo, et al. Deformation of Microscopic Structure Identification Manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 1–83(in Chinese).
- [50] Ferrill D A. Calcite twin widths and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone[J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(6): 667–675.
- [51] Ferrill D A, Morris A P. Contrasting styles of fault zone deformation in limestones of the Glen Rose Formation, Edwards Group, and Buda Limestone in the Balcones fault system, south-central Texas (in Geological Society of America, 2005 annual meeting, Anonymous) [R]. Abstracts with Programs—Geological Society of America, 2005, 37(7): 215.
- [52] Etheridge M A. Experimental Investigations of the Mechanisms of Mica Preferred Orientation in Foliated Rocks[D]. Australian National University, Canberra, ACT, Australia, Doctoral Thesis, 1971: 228.
- [53] 刘俊来. 上部地壳岩石流动与显微构造演化——天然与实验岩石变形证据[J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 503–509.
- Liu Junlai. Flow and microstructural evolution of rocks in the upper crust: Evidence from naturally and experimentally deformed rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(4): 503–509 (in Chinese with English abstract).
- [54] 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用[J]. *地质通报*, 2008, 27(10): 1638–1645.
- Liu Junla, Cao Shuyun, Zou Yunxin, et al. EBSD analysis of rock fabrics and its application[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(10): 1638–1645(in Chinese with English abstract).
- [55] Bouchez J L. Plastic deformation of quartzites at low temperature in an area of natural strain gradient[J]. *Tectonophysics*, 1977, 39 (1–3): 25–50.
- [56] Mainprice D, Bouchez J L, Blumenfeld P, et al. Dominant c-slip in naturally deformed quartz: implications for dramatic plastic softening at high temperature[J]. *Geology*, 1986, 14: 819–822.
- [57] Passchier C W, Trouw R A J. *Microtectonics*[M]. Springer-Verlag, Berlin, 2005: 1–306.
- [58] 夏浩然, 刘俊来. 石英结晶学优选与应用[J]. *地质通报*, 2011, 30 (1): 58–70.
- Xia Haoran, Liu Junlai. The crystallographic preferred orientation of quartz and its applications[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(1): 58–70(in Chinese with English abstract).
- [59] 郑伯让, 金淑燕. 构造岩岩组学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1989: 1–123.
- Zheng Borang, Jin Shuyan. *Petrotectonics*[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1989: 1–123(in Chinese).
- [60] 张成立, 刘良, 张国伟, 等. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2004, 11(3): 33–42.
- Zhang Chengli, Liu Liang, Zhang Guowei, et al. Determination of Neoproterozoic post-collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 33–42(in Chinese with English abstract).
- [61] 裴先治, 王涛, 王洋, 等. 北秦岭晋宁期主要地质事件及其构造背景探讨[J]. *高校地质学报*, 1999, 5(2): 137–147.
- Pei Xianzhi, Wang Tao, Wang Yang, et al. Major geological events of Jinning period and their tectonic settings in the north Qinling[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, 5(2): 137–147(in Chinese with English abstract).
- [62] 裴先治, 王涛, 丁仁平, 等. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义[J]. *中国地质*, 2003, 30(4): 372–381.
- Pei Xianzhi, Wang Tao, Ding Saping, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling[J]. *Geology in China*, 2003, 30(4): 372–381(in Chinese with English abstract).
- [63] 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1–348.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Liu Dunyi, et al. *Geochronology and Geochemistry of Ophiolites, Granites and Clastic Sedimentary Rocks in Qinling Orogenic Belt*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1–348(in Chinese).
- [64] 张本仁. 秦岭地幔柱源岩浆活动及其动力学意义[J]. *地学前缘*, 2001, 8(3): 57–66.
- Zhang Benren. Magmatic activities from plum E-source in the Qinling Orogenic Belt and its dynamic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(3): 57–66(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- [65] 张国伟, 于在平, 董云鹏, 等. 秦岭区前寒武纪构造格局与演化问题探讨[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 11-21.
Zhang Guowei, Yu Zaiping, Dong Yunpeng, et al. On Precambrian framework and evolution of the Qinling belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(1): 11-21(in Chinese with English abstract).
- [66] 胥晓春, 裴先治, 刘成军, 等. 西秦岭天水阴崖沟早古生代草滩沟群火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 851-865.
Xu Xiaochun, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, et al. Geochemical characteristics of the Yinaigou Early Paleozoic Caotangou Group volcanic rocks in Tianshui of West Qinling Mountains and their geological significance[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 851-865(in Chinese with English abstract).
- [67] 杨钊, 董云鹏, 柳小明, 等. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2006, 25(11): 1321-1325.
Yang Zhao, Dong Yunpeng, Liu Xiaoming, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Guanzizhen ophiolite, Tianshui, West Qinling, China[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11): 1321-1325(in Chinese with English abstract).
- [68] 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 北秦岭西段红花铺俯冲型侵入体 LA-ICP-MS 定年及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 536-544.
Wang Hongliang, He Shiping, Chen Juanlu, et al. LA-ICP-MS dating of zircon U-Pb and tectonic significance of Honghuapu subduction-related intrusions in the west segment of Northern Qinling Mountains[J]. Geoscience, 2006, 20(4): 536-564(in Chinese with English abstract).
- [69] 王婧, 张宏飞, 徐旺春, 等. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学, 2008, 33(4): 474-486.
Wang Jing, Zhang Hongfei, Xu Wangchun, et al. Petrogenesis of granites from Dangchuan area in West Qinling Orogenic Belt and its tectonic implication[J]. Earth Science, 2008, 33(4): 474-486 (in Chinese with English abstract).
- [70] Zhang Hongfei, Zhang Benren, Nigel Harris, et al. U-Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic composition of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic affinity[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 27(6): 751-764.
- [71] 魏方辉, 裴先治, 李瑞保, 等. 甘肃天水地区早古生代黄门川花岗岩闪长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及构造意义[J]. 地质通报, 2012, 31(9): 1496-1509.
Wei Fanghui, Pei Xianzhi, Li Ruihao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Early Paleozoic Huangmenchuan granodiorite in Tianshui area of Gansu Province and its tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(9): 1496-1509(in Chinese with English abstract).
- [72] Scheuber E, Hammerschmidt K, Friedrichsen H. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr analyses from ductile shear zones from the Atacama Fault zone, northern Chile: the age of deformation[J]. Tectonophysics, 1995, 250(1-3): 61-87.
- [73] 戚学祥, 张建新, 李海兵, 等. 北祁连南缘右行韧性走滑剪切带的同位素年代学及其地质意义[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 469-479.
Qi Xuexiang, Zhang Jianxin, Li Haibing, et al. Geochronology of the dextral strike ductile shear zone in south margin of the Northern Qilian Mountains and its geological significance[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 469-479(in Chinese with English abstract).