

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2017-5-14

扬子板块西北缘碧口地块中—新生代变质、变形与年代限定

许晨光¹, 颜丹平^{1,*}, 古术航¹, 孟祥坤¹, 邱亮¹, Michael L. WELLS²,
王继斌¹, 马芳³

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

2. Department of Geoscience, University of Nevada, Las Vegas, Nevada, USA

3. 北京大学地球与空间科学学院; 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

XU Chenguang¹, YAN Danping^{1,*}, GU Shuhang¹, MENG Xiangkun¹, QIU Liang¹,
Michael L. WELLS², WANG Jibin¹, MA Fang³

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

2. Department of Geoscience, University of Nevada, Las Vegas, Nevada, USA

3. School of Earth and Space Sciences, Peking University; Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (Ministry of Education), Beijing 100871, China

XU Chenguang, YAN Danping, GU Shuhang, et al. Deformation sequence and geochronological constraints on the metamorphism of the Bikou terrane, northwestern margin of the Yangtze Block. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(1): 080-094

Abstract: The Bikou terrane lies on the northwestern margin of the Yangtze Block. It comprises pelitic rocks in the north and mafic-intermediate volcanic rocks in the south. Rocks in the north metamorphosed into phyllite and mica schist, while rocks in the south experienced greenschist-blueschist facies metamorphism. Presently, there are no detailed analyses on the deformation sequence and regional metamorphism of the Bikou terrane; geochronological constraints for regional metamorphism are also lacking. As a result, nature of the Bikou terrane and age of regional metamorphism and tectonic settings are not known, causing controversy over the orogenies of West Qinling and Longmen Mountain. Here, after detailed field study and structural analysis, we divided the Bikou terrane deformation sequence into three stages, D₁, D₂ and D₃. D₁ is marked by tight fold, foliation S₁ and mineral lineation L₁; D₂ is normal ductile shear dipping to the south, transforming thrust faults and resulting in formation of Jurassic half-graben basins; and D₃, formed in the sinistral strike-slip thrust in the Himalayan, is characterized by brittle deformation. In this study, we obtained U-Pb zircon age of 227.2 ± 6.2 Ma from deformed felsic veins in the Bikou terrane. Since the undeformed intrusive plutons after D₁ deformation yielded age of 226 – 215 Ma in previous studies, the age of regional metamorphism in the Bikou terrane is constrained at ca. 220 Ma. Therefore we infer that, D₁ formed during subduction and collision between the North and South China blocks in the Late Triassic, when regional metamorphism of the Bikou terrane occurred, and D₂ and D₃ were related to eastward expansion of the Tibetan Plateau.

Key words: Bikou terrane; regional metamorphism; Yangtze Block; Triassic

收稿日期: 2016-12-01; 修回日期: 2017-02-24

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20120022110013); 国家自然科学基金项目(41372212); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2014CB440903)

作者简介: 许晨光(1989—), 男, 博士研究生, 构造地质学专业, 主要从事区域构造解析及构造年代学研究。E-mail: cgxu@cugb.edu.cn

* 通讯作者简介: 颜丹平(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事构造地质教学与科研工作, 研究方向为构造地质学、构造地球化学及盆地构造。E-mail: yandp@cugb.edu.cn

摘要:碧口地块位于扬子板块西北缘,由北部变质沉积岩系及南部变质中基性火山岩组成。碧口地块北部岩石变质为千枚岩、云母石英片岩,南部岩石经历绿片岩-蓝片岩相变质。由于对碧口地块变形特征及区域变质作用分析深度不够,缺少精确的变质时间限定,碧口地块变质杂岩系性质、区域变质年代及其大地构造属性始终处于争议之中,导致对西秦岭和龙门山造山过程的认识产生分歧。通过详细区域构造解析,将碧口地块划分为3期变形:D₁期以紧闭褶皱、面理 S₁ 及矿物线理 L₁ 为特征;D₂期形成于由北向南的正断拆离作用,显示韧性变形特征,D₂期变形改造先期逆断层并形成半地堑盆地;D₃期形成于喜山期逆冲走滑运动,以脆性变形为主要特征。本研究获得碧口变质岩中变形脉锆石 U-Pb 年龄(227.2±6.2) Ma,碧口地块已报道的 D₁期变形后期侵入体年龄为 226~215 Ma,从而限定 D₁期碧口区域变质变形年龄为约 220 Ma。因此推测 D₁期形成于三叠纪末华南、华北板块碰撞,碧口地块区域变质主要形成于这一时期的俯冲碰撞作用;D₂与 D₃期则与青藏高原的东向扩张有关。

关键词:碧口地块;区域变质;扬子板块;三叠纪

中图分类号:P542 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2018)01-0080-15

0 引言

碧口地块位于陕甘川三省交界处,在地质单元上位于扬子板块西北缘。其西侧为松潘—甘孜造山带,北接秦岭造山带,处于三大构造单元交汇部位^[1-6](图1)。碧口地块经历绿片岩-蓝片岩相区域变质,然而其变质时间缺乏年代学制约,变形序列缺乏精细研究,碧口杂岩性质、区域变质年代及其大地构造属性始终处于争议之中。碧口地块变质与变形的精细解析对于秦岭和龙门山造山过程研究具有重要意义。

碧口地块被认为代表扬子板块西北缘新元古代沟弧盆体系,指示了新元古代板块边界^[7-16]。相应地,碧口绿片岩-蓝片岩相区域变质被认为形成于新元古代俯冲背景^[10-11,13-16]。然而,扬子板块北缘高压变质带被证实形成于三叠纪,指示了中生代的俯冲碰撞作用^[17-22]。显然,碧口地块绿片岩-蓝片岩相变质作用及变形的详细研究对于厘清扬子板块西北缘性质具有重要意义。

本研究详细描述了碧口地块区域变质特征。通过详细构造解析确定碧口地块的变形序列;通过变形花岗岩脉中锆石 U-Pb 测年确定绿片岩-蓝片岩相区域变质的年代。该成果有助于进一步提升对扬子板块北缘、秦岭及龙门山造山过程的认识。

1 地质背景

碧口地块位于秦岭—大别造山带、扬子板块与松潘—甘孜造山带复合部位,岩性和地质构造复杂。岩石类型包括南部的新元古代火山岩及火山碎屑

岩,北部的碎屑沉积岩,二者均遭受变质改造。碧口地块被新元古代岩体及三叠纪花岗岩侵入,盖层包括震旦系至侏罗系。

1.1 地层

碧口地块主要由南部新元古代碧口群火山岩与北部横丹群碎屑岩组成^[1-3,7-9,13,23-24]。碧口地块整体经历低级变质作用,南部火山岩经历绿片岩-蓝片岩相变质^[25-26],北部碎屑岩变质为砂质千枚岩、云母石英片岩等。南部火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年获得 846~776 Ma^[9],北部碎屑岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年获得 850~750 Ma^[7]。

震旦系出露于略阳、康县等地,主要由灰岩、白云岩、浅变质泥岩组成。寒武系至奥陶系,主要分布于略阳、宁强等地,由深灰色泥岩、页岩、砂岩及灰岩组成^[2]。志留系广泛出露于青川—平武断裂南侧,地层经历区域变质发生褶皱,实际厚度约 3 000 m^[2]。本区志留系以变余糜棱岩、绢云母石英千糜岩及灰黑色千糜状板岩为主,与碧口群之间为断层接触关系^[2]。泥盆系危关群出露于平武西南地区,呈条带状,岩性主要为灰色绢云母石英千糜岩、碳硅质千糜岩、薄层结晶灰岩及条带状石英砂岩等,与下伏志留系茂县群为整合接触^[2]。三叠系关家沟组主要分布于文县—两河口以北,厚度约 2 050 m,主要岩石包括未变质的砾岩和杂砂岩系,为向上变粗变浅的进积层序。侏罗系地层零星分布于青川—平武断裂附近,研究区内的青川、白水等地可见出露宽度约 30 m 的侏罗系,岩性主要为紫红色砾岩(图2)。

1.2 岩浆岩

研究区岩浆岩主要由火山岩和多期侵入岩组成,侵入岩出露于青川—平武断层以北碧口地块内部以及轿子顶核部等地,包括新元古代和中生代两

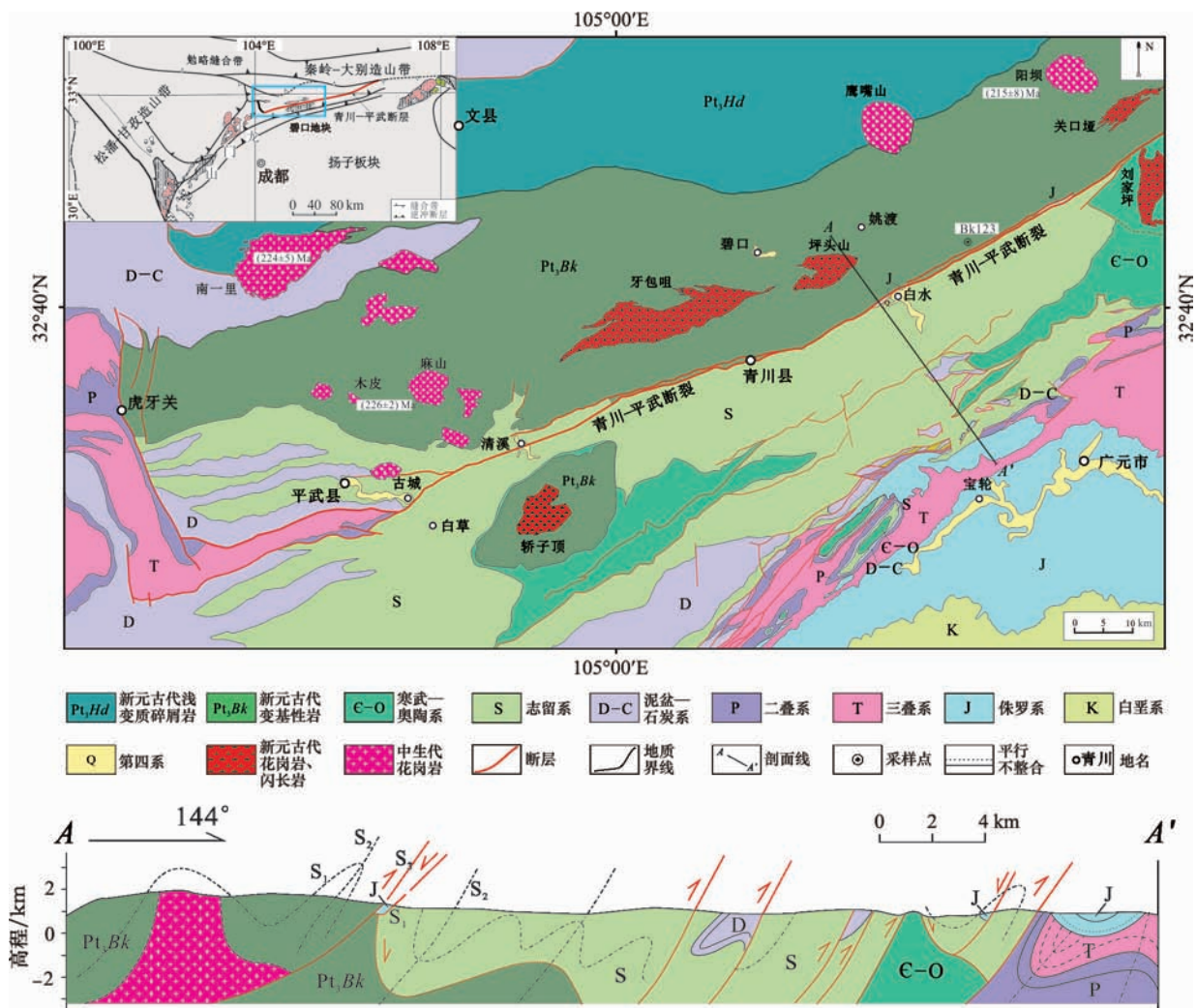


图1 碧口地块及相邻区域地质图^[1-6]

Fig.1 Geological map of Bikou terrane and its adjacent area^[1-6]

个时期的侵入体。

1.2.1 新元古代花岗岩和闪长岩

新元古代花岗岩侵入体包括轿子顶花岗岩体、牙包咀闪长岩体、坪头山闪长岩体、关口垭闪长岩体及刘家坪闪长岩体等。坪头山闪长岩体出露于碧口镇以南, 锆石 U-Pb 测年获得(884±5.5) Ma^[8]。关口垭闪长岩体出露于姚渡以东, 锆石 U-Pb 测年获得(884±14) Ma^[8]。轿子顶花岗岩体出露于轿子顶穹隆体核部, 锆石 SHIMP U-Pb 测年获得(792±11) Ma 和(793±11) Ma^[12]。

1.2.2 中生代花岗岩

中生代花岗岩侵入体在研究区内出露较多, 如南一里、木皮、麻山、阳坝及鹰嘴山等地。南一里花岗闪长岩体, 锆石 U-Pb 测年获得(223.1±2.6) Ma^[27]。阳坝花岗闪长岩体锆石 U-Pb 测年获得(215.4±8.3) Ma^[28]。木皮和麻山黑云母花岗岩体出露于碧

口地块西部平武县北, 锆石 U-Pb 测年获得(226.4±2.3) Ma^[29]。

1.3 区域构造

碧口地块走向近北东南西, 全长约 120 km, 位于秦岭-大别造山带、松潘-甘孜造山带及扬子板块交界处。碧口地块南侧以青川-平武走滑断裂为界与扬子板块分隔, 北侧以文县-康县断裂为界与勉略缝合带及秦岭-大别造山带分隔, 西侧以虎牙关断裂为界与松潘-甘孜造山带分隔。

中、晚三叠世华南板块与华北板块的碰撞^[30-35]及其后秦岭-大别造山带南缘的大规模逆冲推覆控制了扬子西北缘和松潘-甘孜造山带的构造演化^[36-37]。松潘-甘孜造山带区域内形成巨厚的三叠系西康群复理石。而在碧口地区及龙门山北段形成一系列的叠瓦状逆冲推覆构造, 造成地壳的大规模加厚^[4, 37-38]。

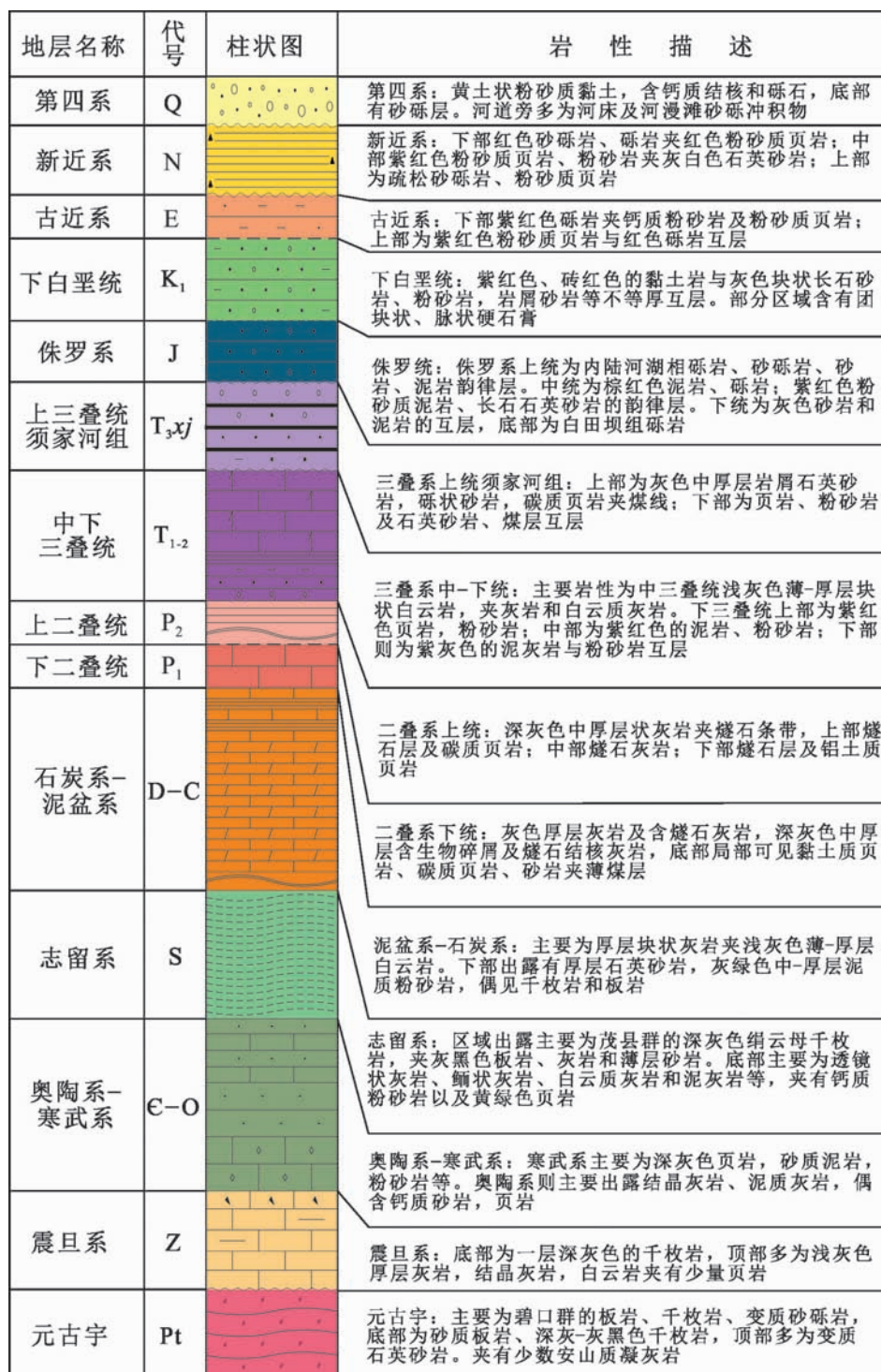


图 2 碧口地块及邻区地层柱状图^[1-5]

Fig. 2 Stratigraphic column of Bikou terrane and its adjacent area^[1-5]

扬子板块西缘(松潘—甘孜造山带东缘)在中生代造山作用以后经历了区域性伸展作用, 沿龙门山—盐源前陆逆冲构造带的腹陆部位出露了一系列穹隆状变质杂岩^[2,6,38-41]。碧口地块发育倾向近南的低角度基底拆离断层, 将新元古界基底与上覆地

层分隔^[6]。在新生代喜马拉雅造山期龙门山左旋压扭性作用影响下^[17,42-46], 碧口地块以南形成了压扭性的青川—平武走滑断裂, 并发生区域地层的大规模褶皱及脆性变形^[47]。

2 变形序列与区域变质作用

2.1 D₁ 期构造变形及区域变质特征

D₁ 期变形发育于碧口地块及龙门山北段新元古界至三叠系。碧口地块形成大规模褶皱、逆冲推覆及区域变质。碧口地块南部发育绿片岩-蓝片岩相区域变质。蓝片岩出露于白水、安乐河及麻柳铺等地, 呈残片状或条带状存留于绿片岩中。

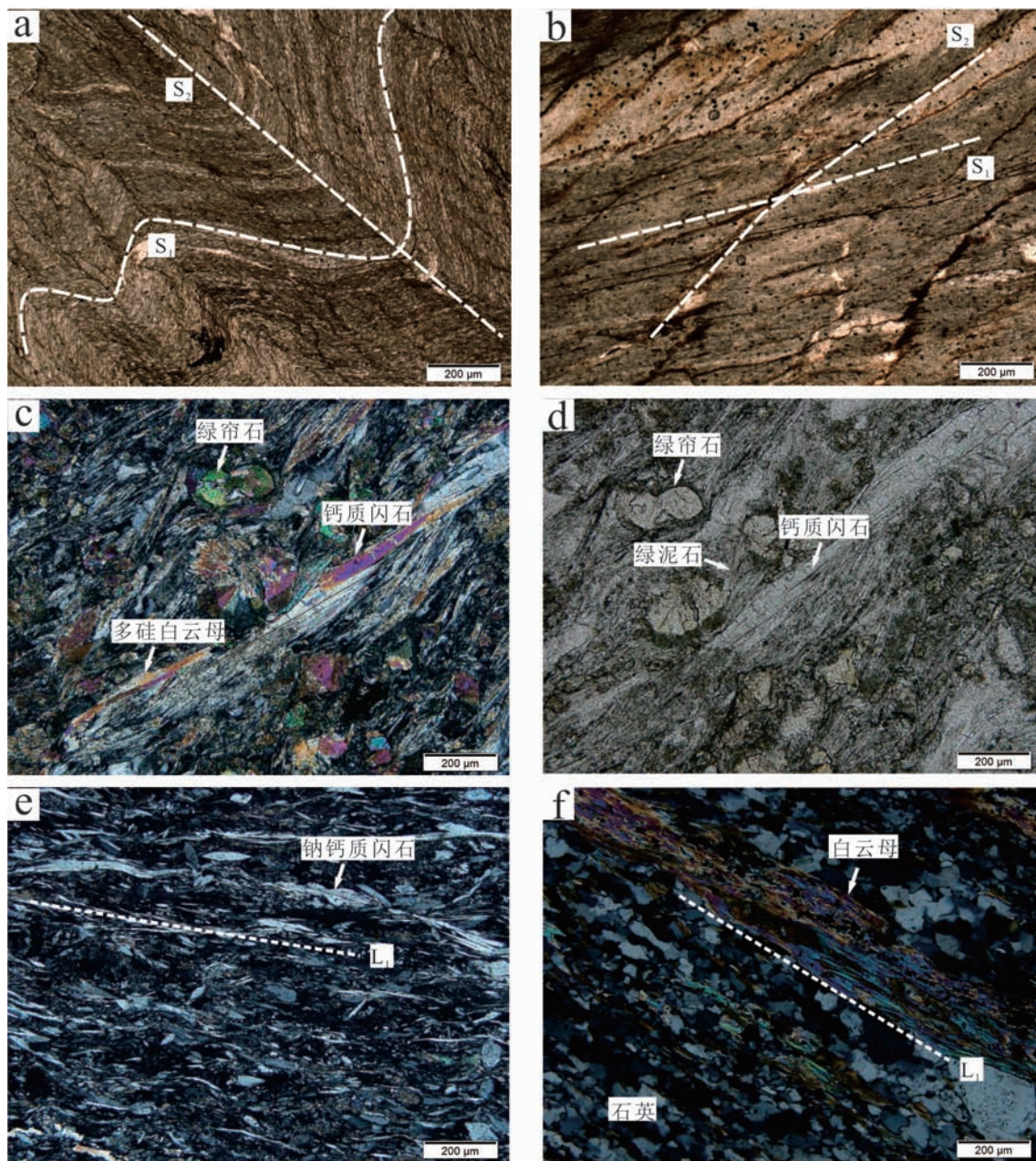
矿物组合为钠质闪石+绿帘石+绿泥石+多硅白云母, 其中代表性钠质闪石为青铝闪石与镁钠闪石^[26]。绿片岩变质矿物组合为钙质闪石+绿帘石+绿泥石+多硅白云母(图 4c、d)。矿物组合特征指示蓝片岩相到绿片岩相为近等温降压的退变质作用^[26]。基性变质岩中绿帘石、钙质-钠钙质角闪石及绿泥石等形成矿物线理 L₁(图 4), 变质分异形成的绿帘石、钠长石及绿泥石条带等构成面理 S₁(图 3c—f)。



a—基性岩 D₁ 期区域变质作用下形成片理 S₁, 被后期韧性剪切变形改造; b—基性岩 D₁ 期区域变质作用下形成片理 S₁, 被后期变形改造形成不对称褶皱; c—基性岩 D₁ 期经绿片岩相变质作用, 形成钠长石、石英及绿帘石分异条带; d—区域变质条件下基性岩形成绿帘石及绿泥石条带 S₁; e—长英质变质岩中, 石英脉 S₁ 指示 D₁ 区域变质; f—D₁ 期面理在后期构造变形中发生膝折。

图 3 D₁ 期变形野外特征

Fig. 3 Field features of the D₁ deformation



a—面理 S_1 在后期变形中形成对称褶皱；b—面理 S_1 在后期变形中被截切；c—南部基性岩经历绿片岩相变质，显微照片可见矿物组合钙质闪石、绿帘石、绿泥石及多硅白云母，正交光；d—南部基性岩经历绿片岩相变质，显微照片可见矿物组合钙质闪石、绿帘石、绿泥石及多硅白云母，单偏光；e—南部基性变质岩中，钠钙质闪石定向排列形成矿物生长线理 L_1 ；f—长英质岩中，云母及石英定向排列形成矿物线理 L_1 。

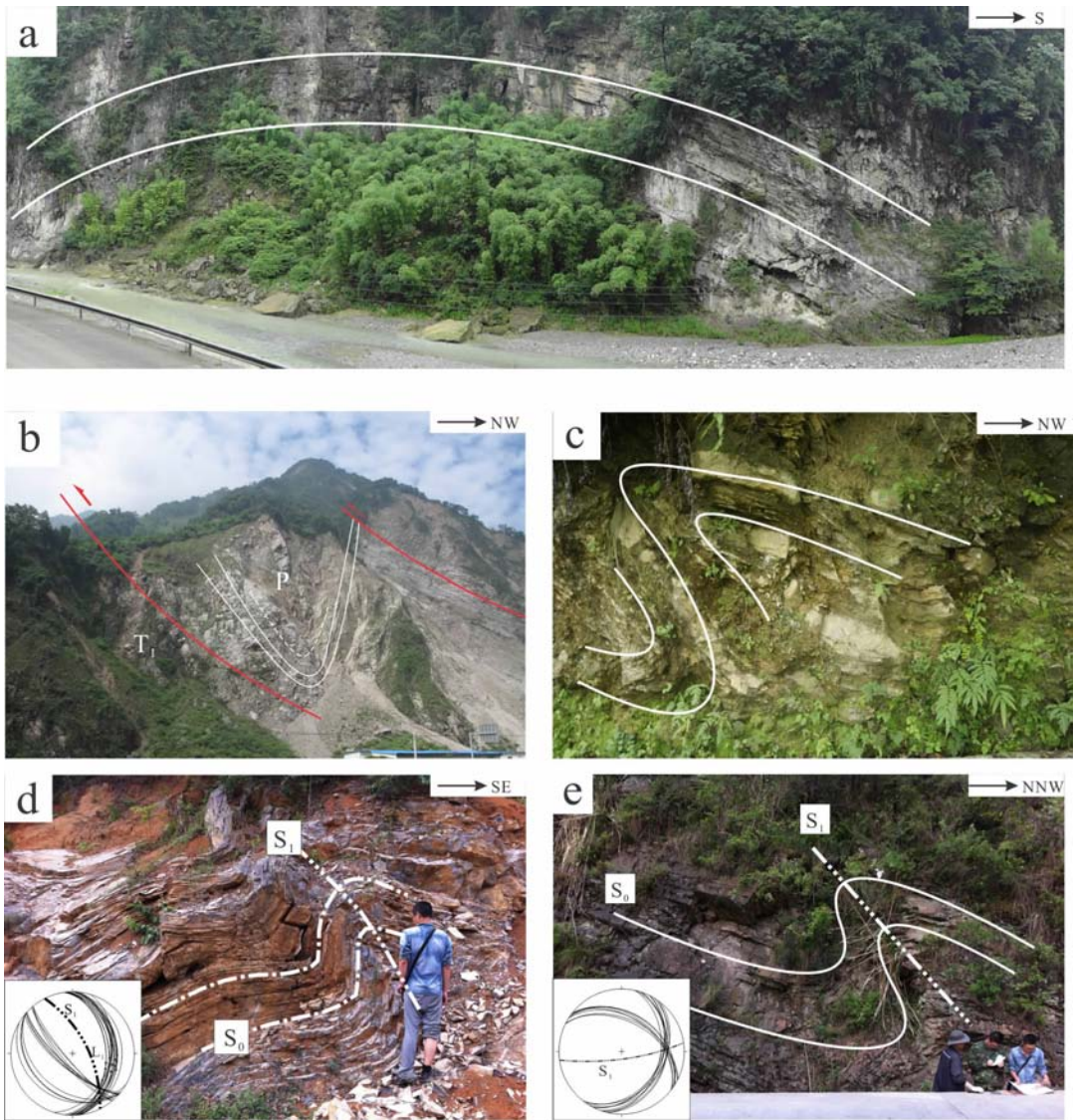
图4 D_1 期变形变质显微特征

Fig. 4 Microscopic pictures showing deformation and metamorphic features of Bikou terrane

北部地区出露碎屑沉积岩，经区域变质形成板岩至千枚岩。露头 and 显微尺度下构造变形产物有紧闭褶皱(图 4a)、面理 S_1 (图 4a、b)和矿物线理 L_1 (图 4e、f)。北部千枚岩、片岩中云母定向形成 L_1 ，云母及石英片理构成 S_1 ，粉砂质千枚岩在 D_1 期区域变质中形成片理 S_1 (图 4a、b)。

D_1 期变形在碧口地块南侧青川、宁强及平武

地区形成大规模逆冲推覆构造，卷入变形地层包括寒武系至三叠系。野外观察运动学标志均指示由北向南的逆冲推覆。以平武地区为例(图 5)，推覆体北段褶皱核部至翼部为石炭至二叠系，褶皱轴面北倾(图 5a—c)。背斜北西翼向北倾，倾角较缓($25^\circ \sim 32^\circ$)，南东翼倾向北东，倾角较陡($65^\circ \sim 75^\circ$)。背斜核部变形强烈，可见大量次级褶皱发



a—平武地区南段宽缓背斜;b—平武地区南段逆冲断层,上盘为二叠系地层,下盘为三叠系地层,逆冲推覆作用由北向南;c—平武地区中段发育大量次级褶皱,形态为尖棱褶皱;d、e—平武地区北段褶皱,指示由北向南逆冲推覆作用, S_0 为岩石层面, S_1 为褶皱轴面。

图 5 平武地区逆冲推覆带野外特征

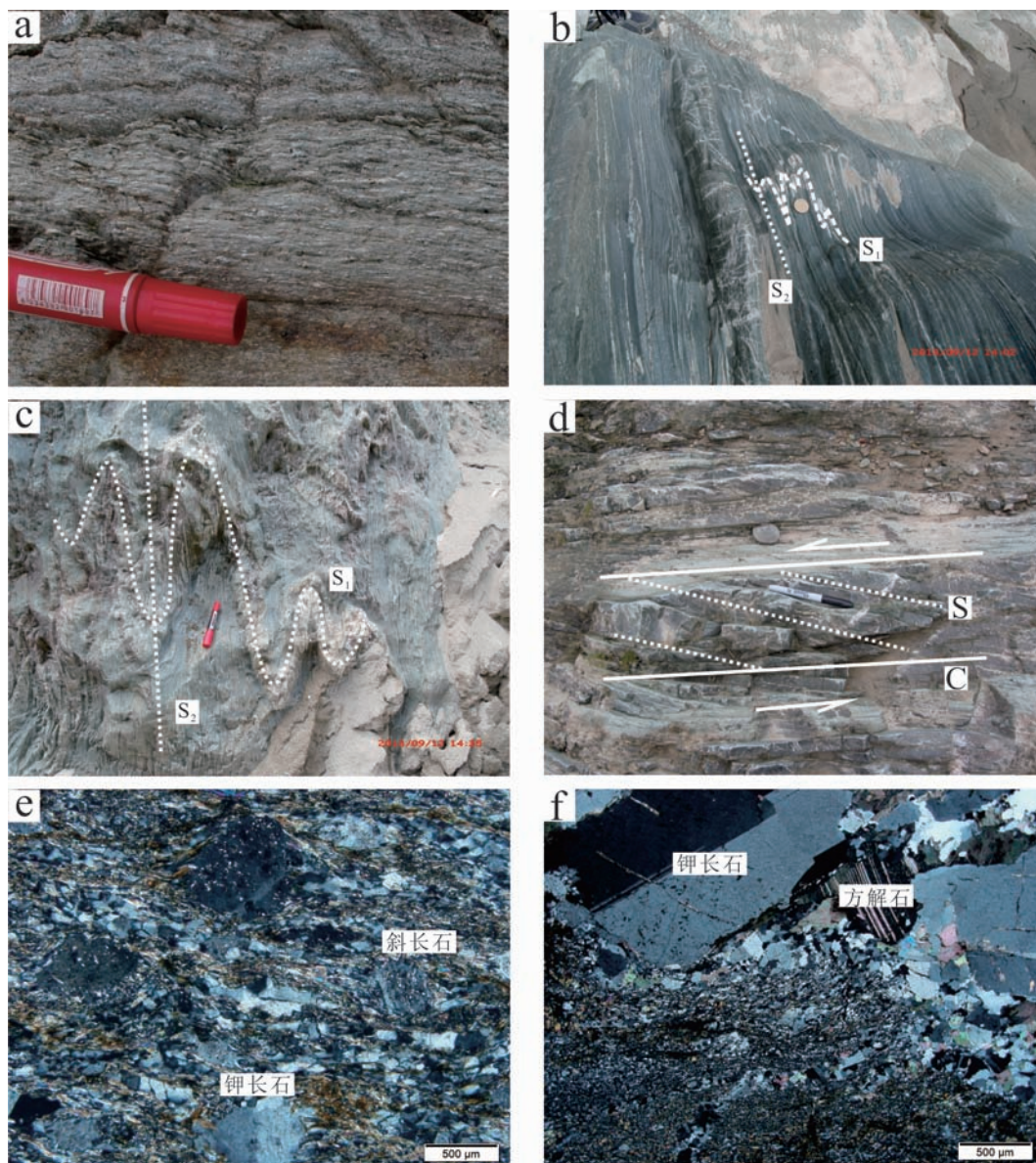
Fig. 5 Field pictures of thrust belt in Pingwu region

育,形态为尖棱褶皱(图 5d、e),轴面劈理与间隔劈理均倾向北西,倾角为 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。褶皱中段核部为下三叠统,翼部为上三叠统,背斜南东翼倾向北东,倾角较缓($28^{\circ} \sim 40^{\circ}$),北西翼倾向南,倾角较陡($65^{\circ} \sim 80^{\circ}$)。南段为宽缓背斜,倾角较小,出露上三叠统地层。碧口地块南侧志留系千枚岩绢云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年获得该区域 D_1 变形年龄约为 $210 \text{ Ma}^{[6]}$ 。

2.2 D_2 期构造变形特征

D_2 期变形主要为韧性剪切,构造变形产物有发育韧性剪切带(图 6)、面理 S_2 及局部断裂被改造形

成的正断层。 D_2 期构造将青川—平武断层局部改造成正断层,在青川县白水附近发育正断层控制的半地堑盆地,形成紫红色侏罗系砾岩。碧口地块南侧青川—平武断层发育糜棱岩,其野外露头可见“ σ ”型和“ δ ”型旋转碎斑(图 6)。长英质岩中,片理在 D_2 期变形过程中形成不对称褶皱及糜棱面理 S_2 (图 6b、c)。石英脉标志层经韧性剪切变形形成面理 S_2 (图 3e)。部分地区,韧性剪切形成 S-C 组构,指示了左行剪切特征(图 6d)。镜下观察可见钾长石、斜长石形成旋转碎斑,石英颗粒发生膝凸重结晶,而长石也发生脆性变形(图 6e、f)。



a—青川—平武断层发育糜棱岩,野外露头可见“σ”型和“δ”型旋转碎斑;b—长英质糜棱岩,韧性变形石英脉轴面代表 D₂ 期变形;c—长英质糜棱岩,D₂ 期变形过程中形成不对称褶皱及糜棱面理 S₂;d—D₂ 期韧性剪切形成 S-C 组构,指示了左行剪切特征;e—糜棱岩,钾长石及斜长石形成旋转碎斑;f—糜棱岩与脉体的边界,糜棱岩中石英出现膨凸重结晶,脉中钾长石及石英无明显变形。

图 6 D₂ 期变形野外及显微特征

Fig. 6 Field and microscopic features of the D₂ deformation

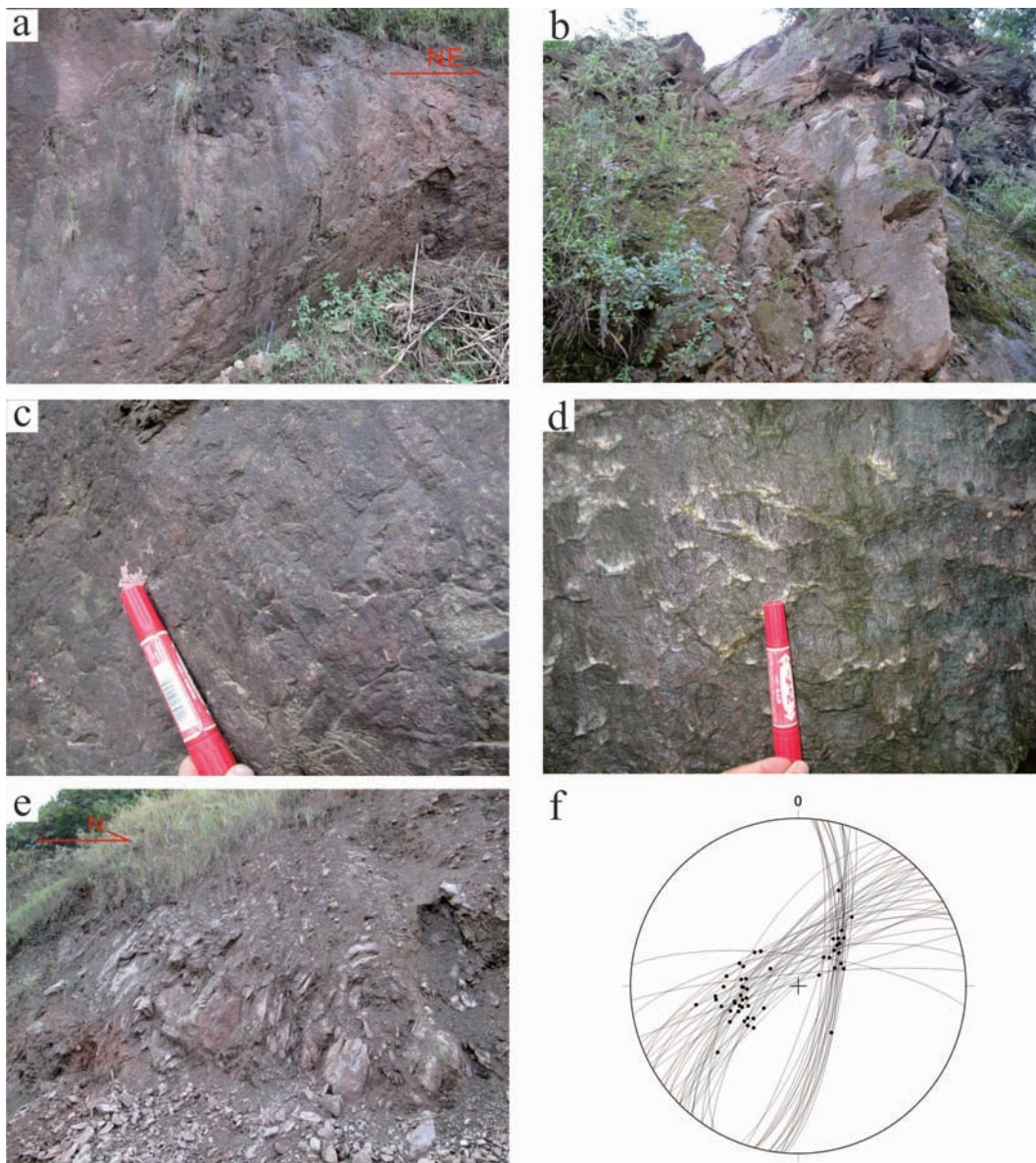
2.3 D₃ 期构造变形特征

D₃ 期碧口地块受青藏高原隆升的影响,青川—平武断裂形成走滑运动^[17,42-43],其变形特征为韧—脆性和脆性变形。野外实测剖面观察到平武及青川大部分地区 D₃ 期变形特征发育,构造变形交切关系明显。D₃ 期脆性断层活动发育,例如在白水附近切穿侏罗系紫红色砾岩形成近直立的断层面(图 7a、b)。断层面发育石英粉晶形成擦痕及阶步(图 7c、d),附近发育构造破碎带,形成碎裂岩带及断层泥(图

7b—e)。断层面及擦痕产状见赤平投影(图 7f)。

3 碧口地块长英质侵入脉特征

野外剖面调查可观察到基性变质岩和长英质侵入脉,脉体卷入变形(图 8a、c、d)。露头尺度下可观察到脉体弯曲变形与片理面一致。长英质脉主要成分为石英及正长石,可见典型岩浆岩结构(图 8c)。长石与石英均为半自形状,粒径约 1 mm。石英单偏



a—白水附近侏罗系紫红色砾岩及近直立断层面；b—侏罗系紫红色砾岩及近直立断层面及构造破碎带；c—断层面发育擦痕；d—断层面发育石英粉晶形成擦痕及阶步；e—断层附近发育构造破碎带，指示 D₃ 脆性变形；f—断层面产状及擦痕赤平投影图(下半球)。

图 7 D₃ 期变形野外特征

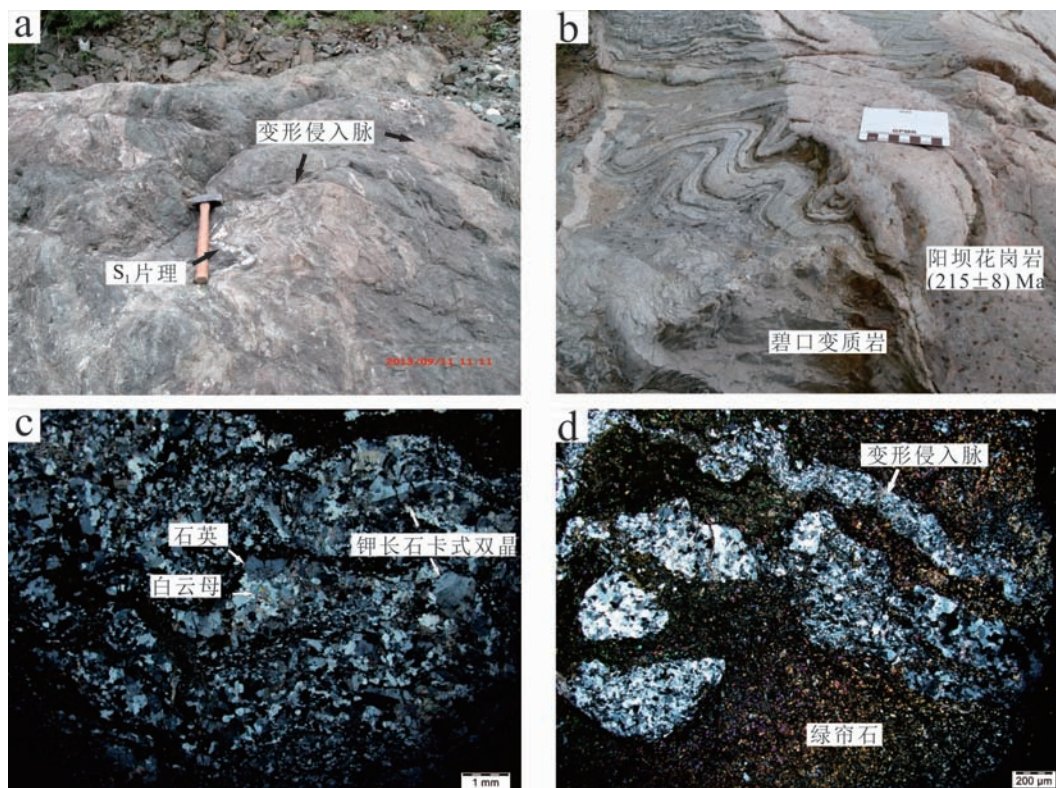
Fig. 7 Field features of the D₃ deformation

光下无色，正交光一级灰干涉色，含量约 50%。钾长石单偏光下无色，表面污浊，正交光下可见典型的钾长石卡氏双晶，含量约 40%。野外观察脉体可分为两类，一类脉体较宽，约 50 mm；另一类脉体较细，宽约 1 mm，脉平行穿插于基性围岩岩中。基性围岩颜色较深，为绿片岩相变火山岩。显微尺度下，可观察到钙质闪石+绿帘石+绿泥石+多硅白云母矿物组合，钙质闪石定向生长(图 4c、d)。脉体周围为基性矿物，镜下可见大量绿帘石(图 8d)。由野外及镜下变形特征可确定脉体卷入了 D₁ 期变形。

4 测试与方法

4.1 测试方法

本研究选取基性变质岩(样品号 BK123-1)及其中变形侵入脉(样品号 BK123-2)两件样品进行锆石分选测年。锆石的分选工作在诚信地质服务有限公司(廊坊)进行，样品经过粉碎、淘洗、磁选及重液分选后筛选出锆石。在显微镜下挑选出具有代表性的锆石制成靶。在锆年领航地质服务公司(北京)电子



a—基性片岩与其中变形侵入脉,长英质侵入脉卷入 D₁ 变形;b—阳坝花岗岩体侵入围岩碧口片岩;c—长英质侵入脉变形特征,长石发生扭折及破裂,石英发生膨凸重结晶;d—脉体在显微尺度下发生变形,形成面理 S₁。

图 8 变形侵入脉野外及显微特征

Fig. 8 Field and microscopic pictures showing features of the deformed felsic veins

探针仪器上进行锆石阴极发光照相,以确定锆石颗粒内的结构。锆石 U-Pb 同位素定年在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室激光烧蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)微区分析实验室完成,激光剥蚀系统为美国 Coherent 公司的 COMPex Pro102 型准分子激光器,ICP-MS 为 Agilent 公司生产 Agilent 7500。测试标样选用 91500、NIST610、NIST612 和 NIST614。锆石测点的 U-Pb 同位素比值处理和表面年龄计算使用 Glitter 软件完成,普通铅校正使用 Andersen^[48]的方法,加权平均年龄的计算和 U-Pb 谐和图的绘制使用 Isoplot^[49]。锆石颗粒年龄老于 1 000 Ma 采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶U 年龄,小于 1 000 Ma 则采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄。

矿物电子探针分析在中国地质大学(北京)地学实验中心电子探针室完成。电子探针仪器型号为 EPMA-1600,加速电压为 15 kV,电子束流为 10 nA,电子束斑直径对所有矿物均设定为 1 μm,依据方法为《电子探针定量分析方法通则》(GB/T 15074—94),结果校正用 PRZ 方法,误差≤2%。

4.2 测试结果

锆石 U-Pb 测试获得 27 个有效年龄数据(图 9、表 1)。样品 BK123-1 为基性围岩中锆石,具有完整晶形及生长环带,Th/U 分布于 0.5~1.65,为岩浆锆石。年龄分布于 934~781 Ma,加权平均年龄为(803.7±7.8) Ma(图 9),代表新元古代成岩年龄。BK123-2 为变形脉中锆石,锆石具有完整晶形及生长环带,Th/U 为 0.21~1.13,年龄分布于 240~217 Ma。获得约 800 Ma 锆石年龄可能来源于捕获新元古代围岩。侵入脉锆石获得变形侵入脉体锆石加权平均年龄为(227.2±6.2) Ma(图 9)。

绿片岩矿物组合电子探针分析获得了 18 个点位测试结果。角闪石进行了 6 个点位测试,成分均为钙质闪石,主要特征为富钙(0.8~1.56 pfu)而贫钠。云母电子探针获得 6 个点位分析数据,其成分为多硅白云母,硅值分布于 3.34~3.43 pfu。绿泥石电子探针分析获得 6 个点位分析数据,镁值分布于 5.21~5.93 pfu。矿物分子式计算,角闪石以 23 个氧原子为基准,白云母以 11 个氧原子,绿泥石以 14 个氧原子为基准。矿物电子探针获得 FeO* 含

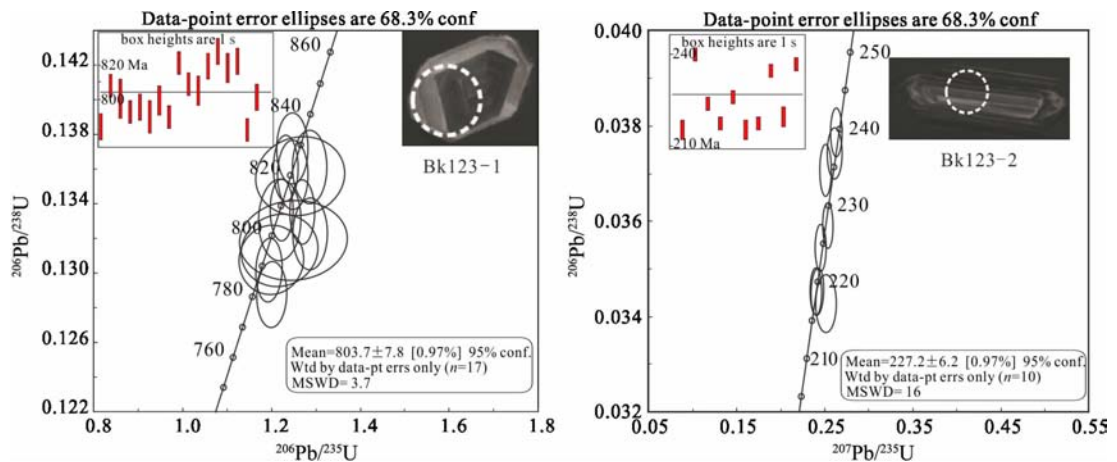


图9 锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄谱和图
Fig. 9 Zircon cathodoluminescence image and U-Pb age concordia diagram

量, 分析结果见表 2。

5 讨论

20 世纪 90 年代地矿部“秦巴地区重大基础地质问题和主要成矿规律研究”获得一系列放射性同位素年龄, 碧口火山岩锆石测年“双带源逐层蒸发法”获得锆石年龄 853~764 Ma, 火山岩全岩 Rb-Sr、全岩 K-Ar、角闪石 K-Ar 及方铅矿测年等获得年龄 1 230~808 Ma^[16]。值得注意的是, 这些测年结果误差较大。Yan 等^[9] 获得碧口火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 846~776 Ma。Xiao 等^[8] 获得关口垭闪长岩体与刘家坪辉长岩等侵入岩体年龄 884~877 Ma, 并认为碧口火山岩年龄跨度应大于 884~776 Ma。本研究利用锆石 U-Pb 测年获得围岩锆石平均年龄为 803 Ma, 代表了新元古代成岩年龄。该结果与碧口地块火山岩已获得的大量年代学结果一致^[8-9, 12, 16]。赵祥生等^[16] 根据同位素测年及其他证据将碧口划分为 4 期构造变形: 第 1 期晋宁期(约 800 Ma), 第 2 期澄江期(750~650 Ma), 第 3 期加里东期(550~350 Ma) 和第 4 期华力西期(350~230 Ma)。碧口地区变质程度很低, 赵祥生等^[16] 全岩年龄很可能指示其成岩年龄而非变质年龄, 考虑到 20 世纪 80 年代放射性同位素测量技术制约, 结果误差可能较大, 该构造期次划分并不准确。

通过详细构造解析, 本研究将碧口地块变形划分为如下 3 期。

D₁ 期变形形成于印支期华南与华北板块碰撞^[30-35, 50], 秦岭造山带南缘发生大规模逆冲^[36-37]。

松潘—甘孜造山带区域及碧口地块均遭受变形^[37, 39, 51]。D₁ 期变形在碧口地区形成一系列叠瓦状逆冲推覆构造并伴随绿片岩—蓝片岩相区域变质。变形侵入脉中锆石 Th/U 为 0.21~1.13, 大于 0.1, 表明脉体中锆石同位素体系在区域低级变质条件下未发生改造。侵入脉中锆石年龄分布于 240~217 Ma, 加权平均年龄为 227 Ma, 从而可判断碧口地块的区域变质应晚于 227 Ma。前人研究获得碧口群变质岩中侵入体年龄为 226~215 Ma^[28-29]。鉴于锆石 U-Pb 测年误差, 二者在误差范围内一致。以上结果限定了碧口地块区域变质年龄为约 220 Ma, 即形成于晚三叠世。Li 等^[52] 在碧口地块北侧三河口群获得变质年龄 219 Ma, Yan 等^[6] 通过白云母⁴⁰Ar/³⁹Ar 在碧口地块南侧获得约 220 Ma 变质年龄, 与本研究所吻合。

D₂ 期变形形成于早—中侏罗世。扬子板块西缘在中生代造山作用以后经历了区域性伸展作用, 沿龙门山—盐源前陆逆冲构造带的腹陆部位露出了一系列的变质杂岩体^[37, 39-41, 51, 53]。D₂ 期伸展拆离作用构造变形特征为: (1) 沿青川—平武断层发育大规模韧性剪切带, 形成糜棱岩, 并发育 S-C 组构、顺层剪切褶皱和石英脉固态流变等; (2) 伸展作用将局部断裂改造成为正断层, 发育正断层控制的半地堑盆地。

D₃ 期变形形成于新生代。碧口地块以南形成了压扭性的青川—平武断裂, 并发生区域地层褶皱及脆性变形。变形切割并改造先期构造, 切穿早期侏罗系砾岩形成陡倾的断层面, 发育擦痕、阶步及构造破碎带。D₃ 变形受喜马拉雅造山期龙门山左旋运动的影响, 是青藏高原东向扩张在该区域内的体现。

表 1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb zircon dating result

样号	$\alpha_{\text{Pb}}/10^{-6}$						比值						年龄/Ma			
	^{238}U		^{235}U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
	^{206}Pb	^{238}U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	^{235}U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
1231-02	112.51	208.77	0.87	0.0033	1.2293	0.0565	0.1291	0.0014	0.0392	0.0003	901	100	814	26	783	8
1231-03	144.12	262.42	0.84	0.0011	1.2698	0.0189	0.1336	0.0012	0.0420	0.0010	898	16	832	8	808	7
1231-04	71.12	103.65	0.50	0.0090	1.2996	0.1633	0.1321	0.0021	0.0400	0.0015	967	272	846	72	800	12
1231-05	70.05	109.19	0.89	0.0031	4.1881	0.0602	0.1560	0.0016	0.1022	0.0025	2784	11	1672	12	934	9
1231-06	164.97	303.12	0.70	0.0027	1.1997	0.0475	0.1308	0.0013	0.0399	0.0003	823	87	800	22	792	7
1231-07	120.66	214.01	0.59	0.0032	1.2181	0.0573	0.1313	0.0014	0.0400	0.0004	847	103	809	26	795	8
1231-08	70.27	116.84	0.97	0.0066	1.3870	0.1163	0.1303	0.0018	0.0391	0.0005	1127	175	883	49	789	10
1231-09	77.38	131.43	0.63	0.0017	1.9734	0.0297	0.1430	0.0014	0.0630	0.0016	1626	14	1106	10	862	8
1231-10	91.27	155.25	0.70	0.0045	1.2485	0.0800	0.1319	0.0015	0.0401	0.0005	888	138	823	36	799	9
1231-11	110.13	205.35	0.64	0.0012	1.1933	0.0195	0.1302	0.0012	0.0407	0.0011	822	19	798	9	789	7
1231-12	128.07	228.45	1.06	0.0011	1.2314	0.0190	0.1361	0.0013	0.0415	0.0011	795	17	815	9	822	7
1231-13	193.58	351.46	0.52	0.0010	1.2214	0.0170	0.1337	0.0012	0.0411	0.0011	816	15	810	8	809	7
1231-14	29.14	53.12	1.65	0.0019	1.2174	0.0325	0.1331	0.0016	0.0401	0.0012	818	36	809	15	805	9
1231-15	78.95	141.18	0.66	0.0013	1.2474	0.0218	0.1357	0.0013	0.0423	0.0012	829	21	822	10	820	8
1231-16	70.45	124.55	0.68	0.0013	1.2474	0.0227	0.1372	0.0014	0.0440	0.0013	805	22	822	10	829	8
1231-17	56.83	100.03	0.76	0.0036	1.2656	0.0665	0.1355	0.0016	0.0413	0.0004	860	115	830	30	819	9
1231-18	55.82	99.43	0.88	0.0014	1.2850	0.0250	0.1361	0.0014	0.0423	0.0013	883	24	839	11	823	8
1231-19	126.02	237.29	0.52	0.0013	1.2021	0.0210	0.1288	0.0013	0.0396	0.0013	861	20	802	10	781	7
1231-20	65.99	120.93	0.76	0.0015	1.2877	0.0252	0.1323	0.0014	0.0441	0.0014	947	24	840	11	801	8
1232-01	35.84	253.27	0.65	0.0017	0.2514	0.0077	0.0343	0.0004	0.0101	0.0004	338	47	228	6	217	3
1232-02	95.17	176.88	0.80	0.0012	1.1583	0.0202	0.1303	0.0013	0.0411	0.0013	758	21	781	9	790	7
1232-03	274.51	1754.91	0.21	0.0008	0.2628	0.0039	0.0379	0.0003	0.0126	0.0004	211	18	237	3	240	2
1232-04	68.71	50.39	0.95	0.0021	4.9825	0.0902	0.3801	0.0037	0.0997	0.0034	1791	17	1816	15	1839	18
1232-05	316.84	2210.66	0.36	0.0015	0.4363	0.0064	0.0347	0.0003	0.0213	0.0007	1451	15	368	5	220	2
1232-06	189.62	1294.61	1.13	0.0009	0.2449	0.0041	0.0354	0.0003	0.0109	0.0003	201	22	222	3	225	2
1232-07	45.87	79.81	0.70	0.0018	1.3902	0.0328	0.1391	0.0016	0.0423	0.0017	1001	29	885	14	839	9
1232-08	166.2	1164.71	0.36	0.0009	0.2397	0.0041	0.0345	0.0003	0.0113	0.0004	212	23	218	3	219	2
1232-09	73.19	69.96	1.22	0.0035	1.2733	0.0581	0.1200	0.0050	0.0360	0.0032	1119	995	834	260	731	29
1232-10	66.74	122.95	0.69	0.0014	1.2026	0.0245	0.1313	0.0014	0.0414	0.0015	821	25	802	11	795	8
1232-11	443.89	2987.65	0.49	0.0008	0.2535	0.0038	0.0359	0.0003	0.0115	0.0004	250	18	229	3	227	2
1232-12	137.11	723.66	0.72	0.0070	0.2174	0.0328	0.0342	0.0004	0.0116	0.0012	246	274	200	27	217	3
1232-13	30.50	148.46	0.84	0.0017	0.3669	0.0114	0.0497	0.0006	0.0154	0.0007	355	49	317	8	312	4
1232-14	112.4	786.49	0.21	0.0011	0.2417	0.0047	0.0345	0.0003	0.0108	0.0005	231	28	220	4	219	2
1232-15	19.74	36.50	1.90	0.0068	1.2356	0.0454	0.1307	0.0019	0.0417	0.0017	887	52	817	21	792	11
1232-16	124.94	813.96	0.49	0.0010	0.2508	0.0049	0.0371	0.0004	0.0113	0.0005	152	27	227	4	235	2
1232-17	105.82	195.31	0.91	0.0013	1.1394	0.0218	0.1308	0.0013	0.0432	0.0017	714	24	772	10	793	7
1232-18	105.08	189.15	0.93	0.0013	1.1985	0.0229	0.1341	0.0014	0.0419	0.0016	768	24	800	11	811	8
1232-19	40.92	260.24	0.62	0.0050	0.2341	0.0236	0.0349	0.0004	0.0111	0.0004	132	227	214	19	221	3
1232-20	246.14	1587.94	0.67	0.0011	0.2610	0.0052	0.0374	0.0004	0.0113	0.0005	223	28	235	4	237	2

表 2 碧口绿片岩相矿物组合电子探针分析结果
Table 2 Representative analysis of the mineral paragenesis of the Bikou greenschist

样品号	矿物	$w_B/\%$																				
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total											
QC33-5	钙	54.02	0.01	1.71	17.83	0.32	12.92	5.09	5.14	0.03	97.08	7.97	0.03	0.26	0.00	0.38	1.82	0.04	2.84	0.80	1.47	0.01
QC33-6	钙质	54.69	0.00	1.79	14.78	0.35	15.23	8.68	3.38	0.12	99.02	7.83	0.17	0.14	0.00	0.51	1.27	0.04	3.25	1.33	0.94	0.02
QC33-7	质	53.91	0.00	1.74	16.16	0.30	14.40	7.01	3.75	0.11	97.38	7.88	0.12	0.18	0.00	0.49	1.49	0.04	3.14	1.10	1.06	0.02
QC33-8	闪	54.81	0.02	0.79	14.85	0.26	15.26	8.12	3.00	0.06	97.17	7.97	0.03	0.11	0.00	0.62	1.19	0.03	3.31	1.27	0.85	0.01
QC33-9	石	54.92	0.09	2.00	12.43	0.32	14.89	9.15	2.70	0.05	96.55	7.95	0.05	0.29	0.01	0.75	0.76	0.04	3.21	1.42	0.76	0.01
QC33-10	多	54.07	0.00	0.79	15.37	0.56	15.03	9.94	1.43	0.00	97.19	7.91	0.09	0.41	0.00	0.77	1.11	0.07	3.28	1.56	0.41	0.00
QC33-11	多	49.51	0.11	24.47	5.16	0.04	3.12	0.11	0.40	11.37	94.30	3.42	0.58	1.41	0.01	0.30	0.00	0.00	0.32	0.01	0.05	1.00
QC33-12	硅	49.46	0.24	24.54	5.27	0.27	3.05	0.20	0.94	11.30	95.27	3.40	0.60	1.38	0.01	0.30	0.00	0.02	0.31	0.01	0.13	0.99
QC33-13	白	50.11	0.23	23.94	5.89	0.10	3.20	0.08	0.36	11.58	95.51	3.43	0.57	1.37	0.01	0.34	0.00	0.01	0.33	0.01	0.05	1.01
QC33-14	云	49.02	0.29	26.78	4.80	0.12	2.55	0.08	0.33	11.28	95.25	3.34	0.66	1.49	0.01	0.27	0.00	0.01	0.26	0.01	0.04	0.98
QC33-15	云	49.75	0.27	26.80	4.31	0.05	2.66	0.08	0.15	11.51	95.57	3.37	0.63	1.51	0.01	0.24	0.00	0.00	0.27	0.01	0.02	0.99
QC33-16	母	49.39	0.14	26.41	4.74	0.00	2.41	0.00	0.49	10.65	94.42	3.38	0.62	1.52	0.01	0.27	0.00	0.00	0.25	0.00	0.07	0.93
QC33-17	绿	27.39	0.00	18.39	21.13	0.50	18.94	0.00	0.37	0.00	86.72	5.69	2.31	2.22	0.00	0.00	0.00	0.09	5.87	0.00	0.30	0.00
QC33-18	绿	27.64	0.00	18.53	20.85	0.41	19.02	0.04	0.36	0.00	86.85	5.73	2.27	2.27	0.00	0.00	0.00	0.07	5.87	0.01	0.29	0.00
QC33-19	泥	27.91	0.00	18.53	20.53	0.45	19.21	0.03	0.25	0.00	86.92	5.78	2.22	2.30	0.00	0.00	0.00	0.08	5.93	0.01	0.20	0.00
QC33-20	泥	26.45	0.02	19.35	23.08	0.60	16.51	0.10	0.23	0.00	86.32	5.60	2.40	2.45	0.00	0.00	0.00	0.11	5.21	0.02	0.19	0.00
QC33-21	石	26.86	0.02	18.31	23.21	0.67	17.48	0.18	0.34	0.00	87.07	5.63	2.37	2.18	0.00	0.00	0.00	0.12	5.46	0.04	0.28	0.00
QC33-22	石	25.86	0.03	19.46	25.74	0.92	14.45	0.08	0.27	0.00	86.81	5.54	2.46	2.46	0.00	0.00	0.00	0.17	4.61	0.02	0.22	0.00

注: FeO* 为全铁含量。

大量研究认为碧口地块代表扬子地块西北缘新元古代沟弧盆体系, 指示了新元古代板块边界^[7-12,14,16]。相应地, 碧口绿片岩-蓝片岩相区域变质被认为形成于新元古代俯冲背景^[10-11,13-16]。陶洪祥等^[8] 研究认为碧口沟弧盆体系与扬子北缘发育变质带代表了新元古代俯冲边界。裴先治^[10-11] 研究认为碧口地块岩性组合代表新元古代蛇绿岩套及海沟型复理石堆积, 与碧口发育的区域变质共同指示了新元古代的俯冲活动。扬子板块北缘发育蓝片岩带与东部大别山及苏-鲁地区榴辉岩、蓝片岩横亘于中国中部, 构成长达 1 000 多千米的巨型高压变质带。大别山榴辉岩 Sm-Nd 矿物等时线年龄及其他高压变质矿物(多硅白云母及钠质闪石)中 K-Ar, ⁴⁰Ar/³⁹Ar 矿物等时线年龄均指示变质年龄为晚三叠世^[18-22]。本研究利用锆石 U-Pb 测年获得的碧口地块变质年龄与邻区已获得研究成果一致, 表明碧口地块区域变质形成于印支期华北华南板块碰撞。

6 结论

(1) 碧口地块经历 3 期变形: D₁ 期形成于印支期区域变质及逆冲推覆作用, D₂ 期形成于侏罗世伸展拆离作用, D₃ 期形成于喜马拉雅期青川—平武断层走滑运动。

(2) 碧口绿片岩-蓝片岩相区域变质年龄约为 220 Ma, 其构造背景与中国中部蓝片岩和榴辉岩带一致, 形成于印支期华北、华南板块碰撞。

感谢北京大学魏春景教授、中国地质大学(北京)程素华副教授及刘俊来教授悉心指导; 感谢木红旭、李解、石玉砚同学和邱亮博士提供的图片和帮助; 感谢唐香丽、周玉、陈涛、巩凌霄及李芳等同学在野外工作中的协助。两位审稿人对原稿提出了建设性意见, 作者在此致以诚挚谢意。

参考文献

- [1] 陕西省地质局. 1: 20 万区域地质调查报告(略阳幅)[R]. 北京: 全国地质资料馆, 1961.
- [2] 陕西省地质局. 1: 20 万区域地质调查报告(碧口幅)[R]. 北京: 全国地质资料馆, 1967.
- [3] 陕西省地质局. 1: 20 万区域地质调查报告(文县幅)[R]. 北京: 全国地质资料馆, 1970.
- [4] 四川省地质矿产局. 1: 20 万区域地质调查报告(广元幅)[R]. 北京: 全国地质资料馆, 1966.
- [5] 四川省地质矿产局. 1: 20 万区域地质调查报告(平武幅)

- [R]. 北京: 全国地质资料馆, 1977.
- [6] YAN D P, ZHOU M F, LI S B, et al. Structural and geochronological constraints on the Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the Longmen Shan thrust belt, eastern Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 2011, 30(6): 1-24.
- [7] DRUSCHKE P, HANSON A D, YAN Q, et al. Stratigraphic and U-Pb SHRIMP detrital zircon evidence for a Neoproterozoic Continental Arc, Central China: Rodinia implications[J]. *The Journal of Geology*, 2015, 114(5): 627-636.
- [8] XIAO L, ZHANG H F, NI P Z, et al. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of early Neoproterozoic mafic-intermediate intrusions from NW margin of the Yangtze Block, South China: implication for tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 2007, 154(3): 221-235.
- [9] YAN Q, HANSON A D, WANG Z, et al. Neoproterozoic subduction and rifting on the northern margin of the Yangtze plate, China: implications for Rodinia reconstruction[J]. *International Geology Review*, 2004, 46(9): 817-832.
- [10] 裴先治. 南秦岭碧口群岩石组合特征及其构造意义[J]. *地球科学与环境学报*, 1989, 11(2): 46-56.
- [11] 裴先治. 碧口地区复理石岩系特征及其构造环境[J]. *地球科学与环境学报*, 1992, 14(1): 42-49.
- [12] 裴先治, 李佐臣, 丁仁平, 等. 扬子地块西北缘轿子顶新元古代过铝质花岗岩: 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和岩石地球化学及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2009, 16(3): 231-249.
- [13] 陶洪祥. 扬子古陆核北缘西段元古宙侵入岩岩石组合的划分及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 1983, 8(2): 24-34.
- [14] 陶洪祥, 高肇英, 王全庆, 等. 扬子板块西北缘高压低温蓝闪片岩带的地质特征[J]. *地球科学与环境学报*, 1986, 8(2): 23-31.
- [15] 陶洪祥, 王全庆, 高肇英, 等. 略论扬子古陆北缘中晚元古代岛弧构造及其演化[J]. *地球科学与环境学报*, 1986, 8(3): 7-18.
- [16] 赵祥生, 马少龙, 邹湘华, 等. 秦巴地区碧口群时代层序、火山作用及含矿性研究[J]. *西北地质科学*, 1990(29): 1-144.
- [17] 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: 地球科学*, 1996, 26(4): 289-295.
- [18] 李曙光, HART S R, 郑双根, 等. 中国华北、华南陆块碰撞时代的钐-铽同位素年龄证据[J]. *中国科学 B 辑: 化学 生命科学 地学*, 1989, 1(3): 312-319.
- [19] 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等. 大别山南麓含柯石英榴辉岩的 Sm-Nd 同位素年龄[J]. *科学通报*, 1992, 37(4): 346-349.
- [20] 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等. 中国中部蓝片岩的形成时代[J]. *地质科学*, 1993, 28(1): 21-27.
- [21] 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等. 扬子陆块北缘地壳的钐同位素组成及其构造意义[J]. *地球化学*, 1994, 23(1): 10-17.
- [22] 张树业, 胡克, 刘晓春, 等. 中国中部元古宙蓝片岩-白片岩-榴辉岩带: 古陆内板块裂撞带的三位一体特征[J]. *矿物岩石地球化学通讯*, 1989, 8(2): 101-104.
- [23] 闫全人, 王宗起, HANSON A D, 等. 南秦岭横丹浊积岩系: 晚古生代发育于扬子板块被动陆缘上的弧前盆地充填物[J]. *地质通报*, 2002, 21(8): 495-500.
- [24] 张二朋, 牛道韞, 霍有光, 等. 秦巴地区主要地质-构造特征梗概[J]. *西北地质科学*, 1992, 13(2): 31-46.
- [25] 魏春景. 陕甘川交界区碧口群的绿帘石及其岩石学意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 1993, 12(4): 332-340.
- [26] 魏春景. 陕甘川交界区碧口群的变质作用及其地质意义[J]. *地质学报*, 1994, 68(3): 241-254.
- [27] 李佐臣, 裴先治, 丁仁平, 等. 川西北平武地区南一里花岗岩体地球化学特征及其构造环境[J]. *地质学报*, 2009, 83(2): 260-271.
- [28] 秦江锋, 赖绍聪, 李永飞. 扬子板块北缘碧口地区阳坝花岗岩闪长岩体成因研究及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 697-710.
- [29] 吕崧, 颜丹平, 王焰, 等. 碧口地块麻山、木皮岩体岩石地球化学与地质年代学: 对构造属性的指示意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(6): 1889-1901.
- [30] LAI S C, ZHANG G W, DONG Y P, et al. Geochemistry and regional distribution of ophiolites and associated volcanics in Mianlüe suture, Qinling-Dabie Mountains[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47(4): 289-299.
- [31] LAI S C, ZHANG G W, LI S Z. Ophiolites from the Mianlüe Suture in the southern Qinling and their relationship with the eastern Paleotethys evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(1): 107-117.
- [32] LAI S C, ZHANG G W, YANG R Y. Geochemistry of the volcanic rock association from Lianghe area in Mianlüe suture zone, southern Qinling and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(3): 317-326.
- [33] ZHANG G W, DONG Y P, LAI S C, et al. Mianlüe tectonic zone and Mianlüe suture zone on southern margin of Qinling-Dabie orogenic belt[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47(4): 300-316.
- [34] 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 秦岭一大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(12): 1121-1135.
- [35] 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.
- [36] MATTAUER M, MALAVIEILLE J, CALASSOU S, et al. The Songpan-Garze Triassic belt of west Sichuan and eastern Tibet: a decollement fold belt on passive margin[J]. *Comptes Rendus De L Academie Des Sciences Serie II*, 1992, 314(6): 619-626.
- [37] 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 等. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- [38] YAN D P, ZHOU M F, SONG H L, et al. Structural style

- and tectonic significance of the Jianglang dome in the eastern margin of the Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2003, 25(5): 765-779.
- [39] 颜丹平, 刘鹤, 魏国庆, 等. 龙门山后山震旦系—古生界变形变质作用: 松潘—甘孜造山带中生代伸展垮塌下的中地壳韧性流壳层[J]. *地学前缘*, 2008, 15(3): 186-198.
- [40] ZHOU M F, MA Y X, YAN D P, et al. The Yanbian terrane (Southern Sichuan Province, SW China): a Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze block [J]. *Precambrian Research*, 2006, 144(1): 19-38.
- [41] ZHOU M F, YAN D P, KENNEDY A K, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196(1): 51-67.
- [42] WORLEY B A, WILSON C J L. Deformation partitioning and foliation reactivation during transpressional orogenesis: an example from the Central Longmen Shan, China[J]. *Journal of Structural Geology*, 1996, 18(4): 395-411.
- [43] 李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制[J]. *地球学报*, 1995 (1): 1-9.
- [44] 王成善, 丁学林. 青藏高原隆升研究新进展综述[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 17-23.
- [45] 王二七, 孟庆任, 陈智樑, 等. 龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因[J]. *地学前缘*, 2001, 8(2): 375-384.
- [46] 刘鹤, 颜丹平, 魏国庆. 扬子板块西北缘碧口地块变形变质作用序列: 松潘—甘孜造山带伸展垮塌事件的意义[J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 464-579.
- [47] ANDERSEN T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report Pb-204[J]. *Chemical Geology*, 2002, 192 (1): 59-79.
- [48] LUDWIG K R. User's manual for Isoplot 3. 00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- [49] 赖绍聪, 张国伟, 裴先治, 等. 南秦岭康县—琵琶寺—南坪构造混杂带蛇绿岩与洋岛火山岩地球化学及其大地构造意义[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 25(1): 10-19.
- [50] 颜丹平, 李书兵, 曹文涛, 等. 龙门山多层分层剥离地壳结构: 新构造变形与深部构造证据[J]. *地学前缘*, 2010, 17 (5): 106-116.
- [51] LI J Y, WANG Z Q, ZHAO M. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronological constraints on the timing of collisional orogeny in the Mianlüe collision belt, southern Qinling Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(2): 208-215.
- [52] 颜丹平, 周美夫, 宋鸿林, 等. 华南在 Rodinia 古陆中位置的讨论: 扬子地块西缘变质岩浆杂岩证据及其与 Seychelles 地块的对比[J]. *地学前缘*, 2002, 9(4): 249-256.