

江西银坑铅锌银矿田基底褶皱构造特征与南北向矿化带研究

杨人毅¹, 吕承训², 吕古贤³

YANG Renyi¹, LÜ Chengxun², LÜ Guxian³

1. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541000;

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

1. China Nonferrous Guilin Research Institute of Geology and Minerals Co., Ltd., Guilin 541000, Guangxi, China;

2. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China;

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

摘要:为了探究银坑铅锌银多金属矿田的构造特征和找矿潜力,选取区内基底复式褶皱作为研究区,开展野外调查和室内分析。揭示基底褶皱几何学和应力场特征并探讨对成矿的控制作用,重点研究褶皱作用晚期纵张断裂中的SN向交代充填石英矿脉的成矿特征。通过实测褶皱轴迹与两翼产状,分析其几何形态特征为:枢纽走向由北至南为NE→NNE→SN→NNW,翼间角范围为33°~52°,褶皱类型为紧闭陡立尖棱状褶皱。通过褶皱分析法与节理统计法,求得基底褶皱自加里东期至燕山期主应力方向变化为EW→NWW→NNW→NEE。基底地层早期受EW向挤压而形成SN向构造带与大量的SN向褶皱理带。应力场转换期间地层受到的应力由挤压向拉张转换,促进褶皱理带内形成SN向纵张裂隙,为后期NE向矿化提供空间。通过实测与观察,基底褶皱首次发现近SN向矿化石英矿脉充填于褶皱作用晚期的切层纵张和次级横张裂隙。含矿性分析显示,脉中铅、锌平均含量为0.133%和0.190%,金、银的平均含量0.127 g/t和15.33 g/t,具有较高的矿化特征。在桥子坑矿区地表和牛形坝矿区60、104和140中段新发现12条SN向矿脉,表明该区有巨大的成矿潜力。

关键词:江西银坑;铅锌银矿田;基底褶皱;构造分析;SN向矿带

中图分类号:P618.42;P618.43;P618.52 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)11-1783-10

Yang R Y, Lü C X, Lü G X. Research on the characteristics of basement fold structure and SN-trending mineralization zone in the Yinkeng lead-zinc-silver orefield in Jiangxi. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1783-1792

Abstract: In order to explore the structural characteristics and prospecting potential of the Yinkeng lead-zinc-silver polymetallic orefield, the authors selected the basement folds in this area as the research area to conduct field investigation and indoor analysis and reveal the basement fold geometry and stress field characteristics. The focus was on the mineralization characteristics of SN-trending metasomatic filling quartz veins, which are developed in the longitudinal tension faults formed in the late stage of folding. Through the actual measurement of the fold axis trace and the attitudes of the two wings, the geometric characteristics were summarized as follows: the direction of the hub is NE→NNE→SN→NNW from north to south, the angle between wings ranges from 33° to 52°, and the fold type is the closed, steep and sharp prismatic fold. Through the fold analysis method and the joint statistical method, the principal stress directions of the basement folds from the Caledonian to the Yanshanian were EW→NWW→NNW→NEE. The basement strata

收稿日期:2020-03-10;修订日期:2020-08-20

资助项目:中国有色集团科技计划项目《中国有色矿业集团矿山资源现状调查与找矿潜力分析》(编:2019KJH02)

作者简介:杨人毅(1987-),男,硕士,工程师,从事矿田构造与成矿学研究。E-mail:714450068@qq.com

通讯作者:吕古贤(1949-),男,研究员,博士生导师,从事地质力学、区域成矿、矿产预测及矿田地质学和构造物理化学方面的研究。

E-mail:lvguxian@126.com

were squeezed in the EW direction in the early stage to form an SN-trending structural belt and a large number of SN-trending fold cleavage belts. During the transition of the stress field, the stress on the formation changed from compression to tension, which promoted the formation of SN-trending longitudinal fractures in the fold cleavage zone, and provided space for later NS-trending mineralization. Through actual measurement and observation, it is the first time to discover mineralized quartz veins in nearly SN direction in the basement fold. This quartz vein filled the longitudinal and secondary transverse tension fractures in the section at the late stage of folding. Mineralization analysis shows that the quartz vein has high mineralization characteristics. The average values of lead and zinc in mineralized quartz veins are 0.133% and 0.190%, and the average values of gold and silver are 0.127 g/t and 15.33 g/t. Twelve new SN-trending veins were discovered on the surface of the Qiaozikeng mining area and the 60, 104, and 140 level of the Niuxingba mining area, indicating that this area has huge metallogenic potential.

Key words: Yinkeng Town, Jiangxi; lead-zinc-silver orefield; basement folds; structural analysis; SN-trending ore belt

银坑矿田位于南岭稀有、有色及贵金属成矿带的东段北侧,是重要的铅锌银等多金属矿产集中区^[1]。矿田内的矿床包括桥子坑银金多金属矿、芹子坑银金多金属矿、柳木坑银铅矿、老虎头银铅锌矿等中型矿床^[2]。主要矿化类型有:层控型、风化堆积型、蚀变破碎岩型、隐爆角砾岩型、岩体接触带型矿化等^[1-2]。

前人在矿田范围内做了大量很有价值的研究工作,在构造研究方面,前人认为矿田内走向

NNE—NE 的叠瓦式逆冲推覆构造和近 EW 的构造是矿田内重要的控岩控矿构造^[2-3]。基底褶皱是成矿前构造, F_1 逆冲推覆断层是导矿构造, 与其派生的 NE 向断裂和基底褶皱 NWW—EW 向横张裂隙共同组成储矿构造^[3]。前人在单一构造控矿方面取得了很好的成果, 而对矿田基底褶皱构造特征与发展演化过程的研究相对薄弱, 矿田内主要矿床的形成与基底褶皱构造关系极为密切, 因此对该矿田基底褶皱构造进行几何学和构造演化过程进行研究

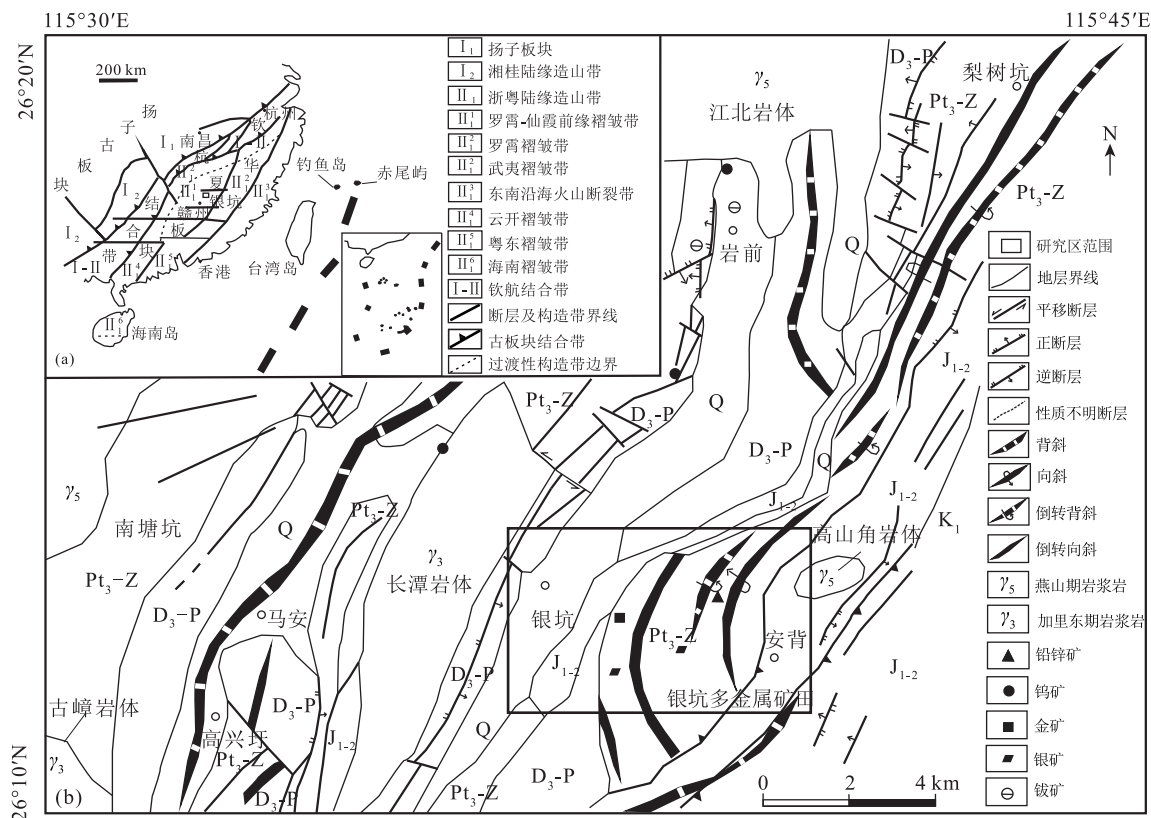


图1 江西银坑矿田构造位置图(a)及研究区地质简图(b)(底图据参考文献[9])

Fig. 1 Regional geological map of Yinkeng area, Jiangxi

Q—第四系; K_1 —下白垩统; J_{1-2} —中-下侏罗统; D_3-P —上泥盆统-二叠系; Pt_3-Z —青白口系-震旦系; γ_5 —燕山期岩浆岩; γ_3 —加里东期岩浆岩

十分重要^[4-8]。

在基底地层中的矿化研究方面,前人认为矿田基底褶皱内主要发育受层间破碎带控制的层控型铅锌矿化体与近 EW 向热液脉型矿化带^[9]。但是在基底地层内尚未发现近 SN 向脉状矿化类型,本文着重研究褶皱晚期纵张断裂中的 SN 向交代充填石英矿脉的成矿特征,认为这是成矿的新方向,对矿田内基底地层和深部找矿研究具有促进作用。

1 区域地质背景

研究区位于江西于都县银坑镇内,属于重要的铅、锌、银、钨和锡多金属矿集区。大地构造位置位于南岭 EW 向构造带东段北侧和新华夏系武夷-戴云隆起褶皱带西部的复合区^[10-13](图 1)。区域地层发育较齐全,包括青白口系、震旦系、泥盆系-石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系和第四系。其中青白口系与震旦系组成该区褶皱基底,上泥盆统一二叠系

组成该区盖层^[13-16]。

银坑矿田的地层主要为前寒武纪基底、晚古生代盖层与中生代断陷盆地沉积地层,矿田内主要控矿层位为前寒武纪和晚古生代地层^[14-15]。岩浆活动主要包括加里东期的黑云母二长花岗岩与燕山期的中酸性花岗闪长岩类,与矿田内贵多金属矿化关系紧密的是燕山期花岗闪长岩^[16-17]。矿田内的构造单元包括基底褶皱、盖层褶皱与 NE—NNE 向逆冲推覆构造带^[5, 18](图 2)。

2 银坑矿田 SN 向基底褶皱特征

2.1 SN 向基底褶皱及几何形态

矿田内新元古代基底地层受到早期 EW 向挤压作用,形成了近 SN 向复式褶皱与密集劈理带^[11, 18]。后期 NWW 向挤压作用不仅对基底褶皱进行改造,且形成褶皱东西两侧的 F_1 、 F_2 和 F_5 推覆构造带。基底复式褶皱 EW 向宽 4 km 左右,自西往东为松山背-大窝坑背斜、桥子坑复向斜、六工排-

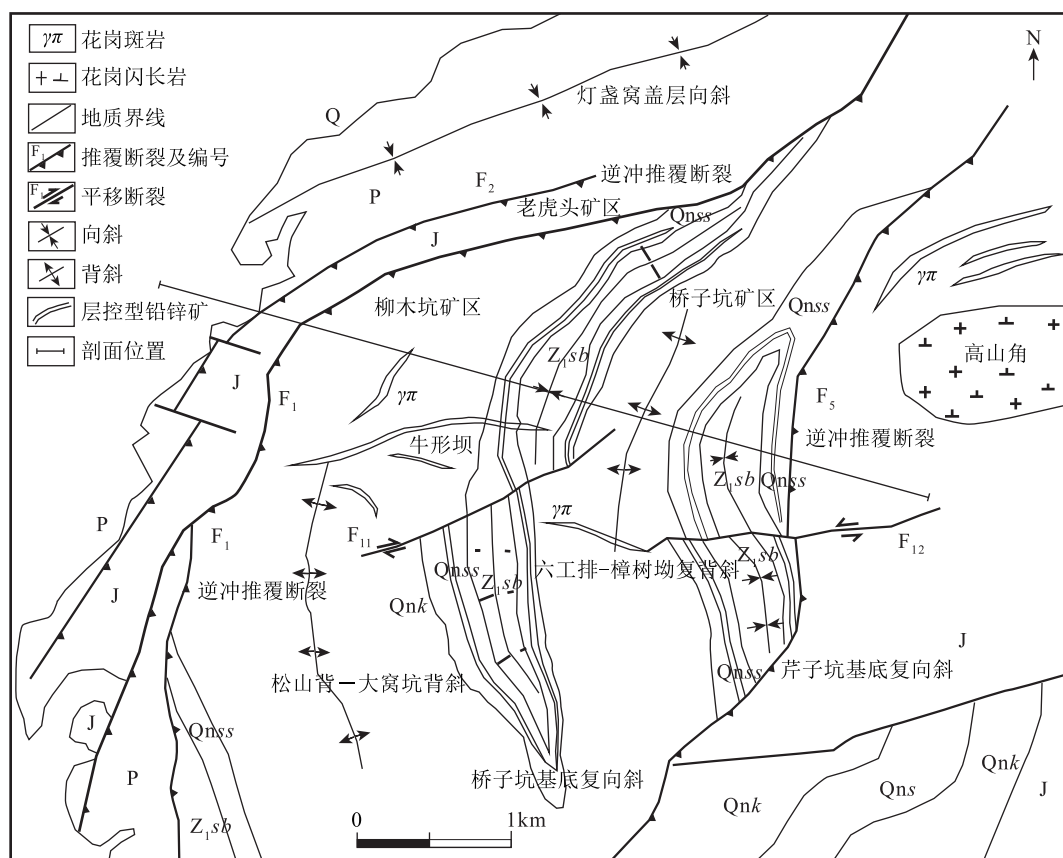


图 2 江西银坑铅锌银矿田构造简图(底图据参考文献[9])

Fig. 2 Structural map of the Yinkeng lead-zinc-silver orefield in Jiangxi

Q—第四系;J—侏罗系;P—二叠系;Z_{1sb}—下震旦统沙坝黄组;Q_{nss}—青白口系上施组;Q_{nk}—青白口系库里组

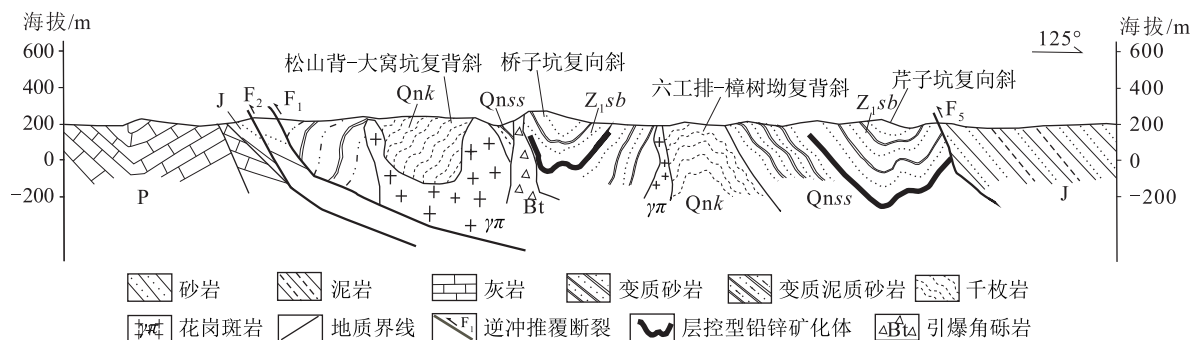


图3 银坑矿田基底构造剖面图(底图据参考文献[9]修改;地层代号注释同图2)

Fig. 3 Basement structure section of the Yinkeng orefield

樟树坳背斜与芹子坑复向斜。桥子坑复向斜和芹子坑复向斜是基底褶皱中层控型铅锌矿的重要控矿构造,其核部由震旦系沙坝黄组组成,两翼由青白口系库里组与上施组组成^[13](图3)。

矿田范围经历了多次强烈的构造运动,基底褶皱的枢纽与轴面在走向和倾向上均发生不同程度的变形,已非理想的圆柱状褶皱^[19]。本文对基底芹子坑复向斜和桥子坑复向斜的几何形态研究时将不规则褶皱划分成数个构造区段,并分别收集和实测各区段的构造变形数据,并制作各区段褶皱的 π 组构图解,然后结合野外观察证据和组构分析图解,最终确认褶皱的几何形态特征^[20-21]。

2.2 桥子坑复向斜几何形态分析

桥子坑复向斜位于矿田中部,其核部由震旦系沙坝黄组变质砾岩组成,两翼由青白口系库里组、上施组凝灰岩及变质粉砂岩组成,SN向长约4.5 km,EW向宽约1 km。

桥子坑复向斜轴迹从北至南依次为NE→NNE→SN→NNW向,变化较大,故将其从北至南依次划分为I-1、II-1、III-1、IV-1四个区段进行几何形态研究(图4)。

2.2.1 I-1区段几何形态分析

实测桥子坑复向斜I-1区段13组两翼地层产状数据显示,西翼地层总体倾向SEE(图5-a),倾角为 $42^{\circ}\sim 65^{\circ}$;东翼总体倾向NWW,倾角为 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 。层面极点等密图(图5-b)显示,岩层产状的极点分布在2个基本对称的集密区,表明I-1区段是平面非圆筒状褶皱。 π 图组构环带不完整,表明I-1区段的两翼形态为紧闭状,由 π 圆的极点投影得到褶皱枢纽产状为 $32^{\circ}\angle 6^{\circ}$ 。从极点等密图可知,东、

西两翼岩层的优选产状分别是 $151^{\circ}\angle 44^{\circ}$ 和 $313^{\circ}\angle 51^{\circ}$,求得I-1区段褶皱轴面产状为 $326^{\circ}\angle 82^{\circ}$ 。

2.2.2 II-1区段几何形态分析

实测桥子坑复向斜II-1区段32组两翼地层产状数据显示(图6-a),西翼地层总体倾向SEE,倾角为 $35^{\circ}\sim 55^{\circ}$;东翼总体倾向NWW,倾角为 $40^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。层面极点等密图(图6-b)显示,岩层产状的极点分布在2个基本对称的集密区,表明II-1区段是平面非圆筒状褶皱。 π 图组构环带不完整,表明II-1区段的两翼形态为紧闭状。由 π 圆的极点投影得到褶皱枢纽产状为 $183^{\circ}\angle 11^{\circ}$ 。从极点等密图可知东、西两翼岩层的优选产状分别是 $287^{\circ}\angle 45^{\circ}$ 和 $96^{\circ}\angle 55^{\circ}$,可求得该段褶皱的轴面产状为 $104^{\circ}\angle 84^{\circ}$ 。

2.2.3 III-1区段几何形态分析

实测该段两翼地层43组产状数据显示(图7-a),西翼地层总体倾向NEE,倾角为 $36^{\circ}\sim 56^{\circ}$;东翼总体倾向SWW,倾角为 $48^{\circ}\sim 62^{\circ}$ 。层面极点等密图(图7-b)显示,岩层产状的极点分布在2个基本对称的集密区,表明III-1区段是平面非圆筒状褶皱。 π 图组构环带不完整,表明III-1区段的两翼形态为紧闭状。由 π 圆的极点投影得到褶皱枢纽产状为 $174^{\circ}\angle 12^{\circ}$ 。从极点等密图可知东、西两翼岩层的优选产状分别是 $266^{\circ}\angle 41^{\circ}$ 和 $75^{\circ}\angle 53^{\circ}$,可求得该段褶皱的轴面产状为 $261^{\circ}\angle 86^{\circ}$ 。

2.2.4 IV-1区段几何形态分析

实测该段43组两翼地层产状数据显示(图8-a),西翼地层总体倾向为NE向,倾角范围为 $33^{\circ}\sim 62^{\circ}$;东翼总体倾向为SW向,倾角范围为 $45^{\circ}\sim 66^{\circ}$ 。层面极点等密图(图8-b)显示,岩层产状的极点分布在2个基本对称的集密区,表明IV-1区段是平面非

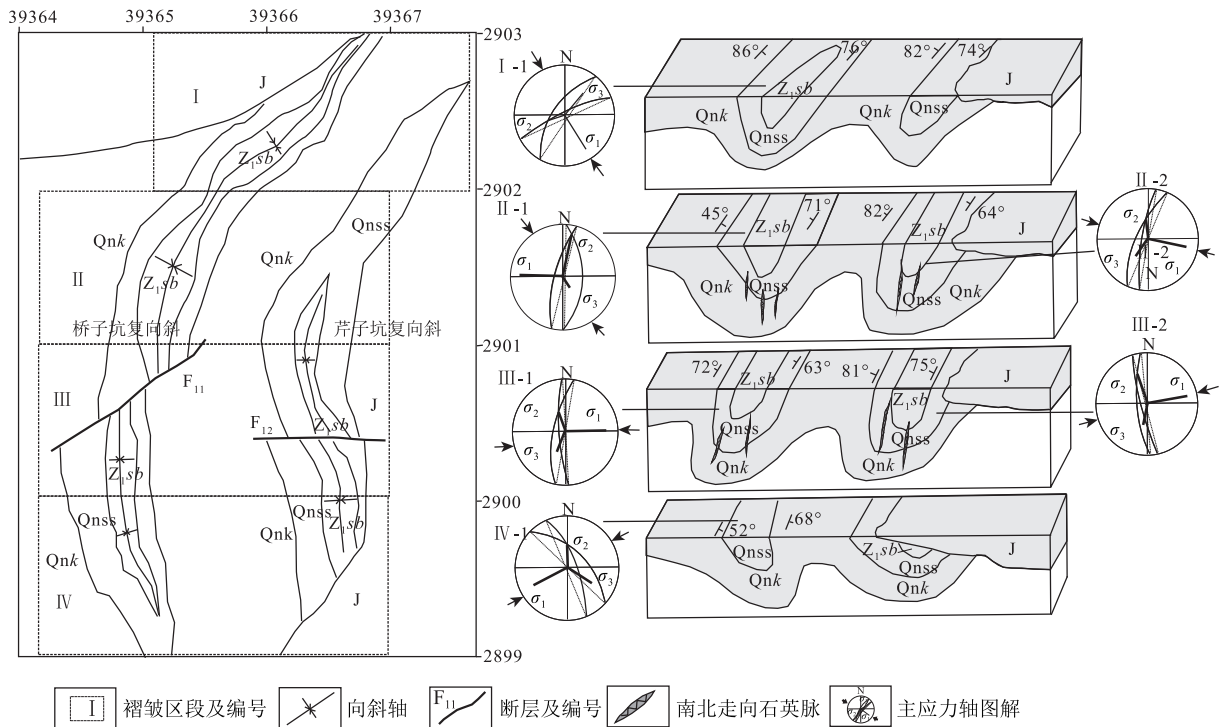


Fig. 4 The fold geometry and stress field distribution of the basement of the Yinkeng orefield

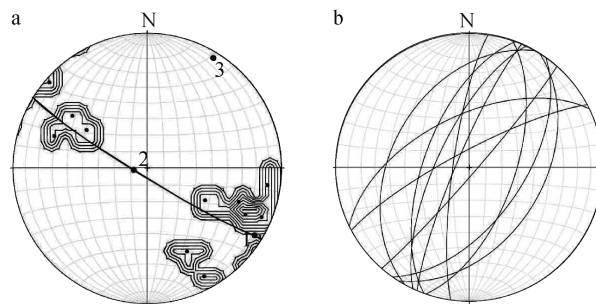


Fig. 5 Projection of stratigraphic attitude in I-1 section of Qiaozikeng compound syncline

a—两翼地层产状赤平投影图;b—层面极点等密图与 π 组构造图

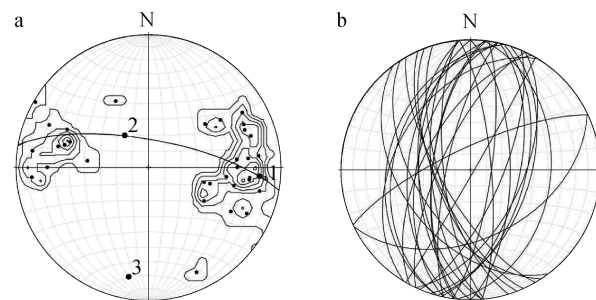


Fig. 6 Projection of stratigraphic attitude in section II-1 of Qiaozikeng complex syncline

a—两翼地层产状赤平投影;b—层面极点等密图与 π 组构造图

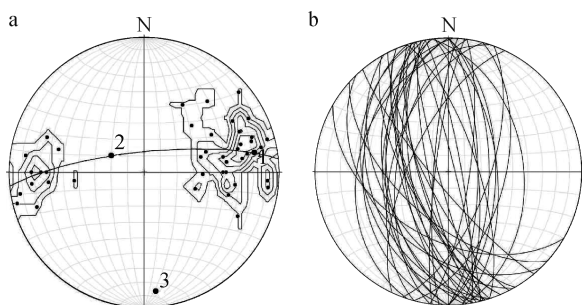


图7 桥子坑复向斜Ⅲ-1区段岩层产状投影图

Fig. 7 Projection of stratigraphic attitude in section Ⅲ-1 of Qiaozikeng complex syncline

a—两翼地层产状赤平投影;b—层面极点等密图与 π 组构造图

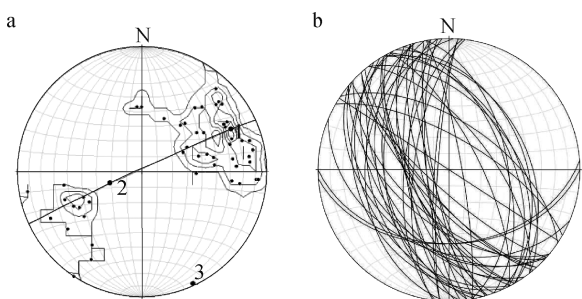


图8 桥子坑复向斜Ⅳ-1区段岩层产状投影图

Fig. 8 Projection of stratigraphic attitude in section Ⅳ-1 of Qiaozikeng complex syncline

a—两翼地层产状赤平投影;b—层面极点等密图与 π 组构造图

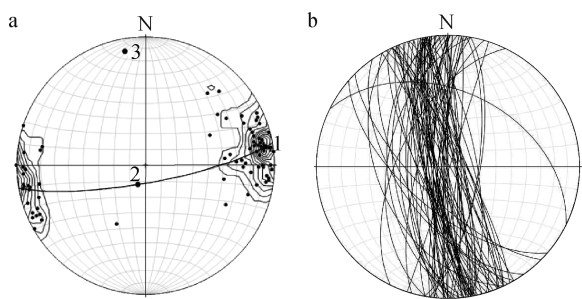


图9 芹子坑复向斜Ⅲ-2区段岩层产状投影图

Fig. 9 Projection of stratigraphic attitude in section Ⅲ-2 of Qinzikeng complex syncline

a—两翼地层产状赤平投影;b—层面极点等密图与 π 组构造图

圆筒状褶皱。 π 图组构造环带不完整,表明Ⅳ-1区段的两翼形态为紧闭状。由 π 圆的极点投影得到褶皱枢纽产状为 $155^{\circ} \angle 6^{\circ}$ 。从极点等密图可知,东、西两翼岩层的优选产状分别是 $244^{\circ} \angle 45^{\circ}$ 和 $66^{\circ} \angle 52^{\circ}$,可求得该段褶皱的轴面产状为 $66^{\circ} \angle 78^{\circ}$ 。

2.3 芹子坑复向斜Ⅲ-2区段几何形态分析

芹子坑复向斜出露长度为2 km左右,核部地

层是震旦纪沙坝黄组,两翼地层是晚元古代青白口纪库里组和上施组。实测88组向斜两翼地层产状数据可知(图9-a),两翼岩层产状较陡,倾角分布范围为 $60^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。图9-b显示,岩层产状的极点分布在2个基本对称的集密区,表明Ⅲ-2区段是平面非圆筒状褶皱。 π 图组构造环带不完整,表明Ⅲ-2区段的两翼形态为紧闭状。 π 圆的极点投影显示该段褶皱枢纽产状为 $345^{\circ} \angle 12^{\circ}$ 。从极点等密图可求出东、西两翼岩层的优选产状分别为 $233^{\circ} \angle 74^{\circ}$ 和 $95^{\circ} \angle 76^{\circ}$,褶皱轴面产状为 $252^{\circ} \angle 86^{\circ}$ 。

综上所述,平面上,基底复式褶皱轴迹走向由北至南的变化为NE $\rightarrow$ NNE $\rightarrow$ NNW,形态为南宽北窄,中间向NNW向突出的弧状;枢纽产状由北至南大致变化为 $32^{\circ} \angle 6^{\circ} \rightarrow 183^{\circ} \angle 11^{\circ} \rightarrow 174^{\circ} \angle 12^{\circ} \rightarrow 155^{\circ} \angle 6^{\circ}$,褶皱翼间角范围为 $32^{\circ} \sim 52^{\circ}$,桥子坑复向斜轴面总体倾向NNW,倾角 83° ,芹子坑复向斜轴面总体倾向SWW,倾角 85° 。经 π 图解分析确定,基底复式褶皱类型为西翼岩层较陡,东翼岩层较缓,轴面向西倾斜的紧闭陡立尖棱状斜歪褶皱。

3 基底褶皱的应力场解析

3.1 褶皱两翼优势产状求应力场

侧向挤压褶皱的应力场特征为最大主压应力 σ_1 与轴面相垂直,中间主应力 σ_2 与褶皱枢纽相平行,最小主应力 σ_3 沿轴面方向与 σ_2 相垂直^[22-23]。本文系统测量基底褶皱的两翼岩层的产状,并运用极点等密图和褶皱 π 图求出两翼岩层的优选产状,并运用赤平投影确定该褶皱的主应力轴方位^[23](表1;图4),得出褶皱各段的主应力方位。

桥子坑复向斜Ⅰ-1段的主应力方位为: σ_1 : $147^{\circ} \angle 17^{\circ}$ 、 σ_2 : $256^{\circ} \angle 54^{\circ}$ 、 σ_3 : $39^{\circ} \angle 37^{\circ}$;Ⅱ-1段的主应力方位为: σ_1 : $279^{\circ} \angle 8^{\circ}$ 、 σ_2 : $12^{\circ} \angle 6^{\circ}$ 、 σ_3 : $135^{\circ} \angle 74^{\circ}$;Ⅲ-1段的主应力方位为: σ_1 : $92^{\circ} \angle 18^{\circ}$ 、 σ_2 : $351^{\circ} \angle 36^{\circ}$ 、 σ_3 : $208^{\circ} \angle 44^{\circ}$;Ⅳ-1段的主应力方位为: σ_1 : $244^{\circ} \angle 27^{\circ}$ 、 σ_2 : $351^{\circ} \angle 36^{\circ}$ 、 σ_3 : $117^{\circ} \angle 38^{\circ}$ 。

芹子坑复向斜Ⅱ-2段的主应力方位为: σ_1 : $101^{\circ} \angle 12^{\circ}$ 、 σ_2 : $4^{\circ} \angle 31^{\circ}$ 、 σ_3 : $216^{\circ} \angle 41^{\circ}$;Ⅲ-2段的主应力方位为: σ_1 : $85^{\circ} \angle 10^{\circ}$ 、 σ_2 : $337^{\circ} \angle 36^{\circ}$ 、 σ_3 : $182^{\circ} \angle 51^{\circ}$ 。

通过以上分析可知,桥子坑复向斜各区段最大主应力方向为:Ⅰ-1段为近NNW—SSE向,Ⅱ-1

段和Ⅲ-1 段均为近 EW 向,Ⅳ-1 段为近 NEE—SWW 向。芹子坑复向斜各区段最大主应力方向为:Ⅱ-2 段和Ⅲ-2 段均为近 EW 向。

3.2 节理统计法求应力场

银坑矿田基底褶皱构造是在强烈构造活动作用下形成的,其间保存至今的节理裂隙等构造形迹可以反映当时的古构造应力场。基底地层内的节理构造主要为剪节理,部分呈共轭“X”状,局部伴随有张节理。本文系统收集与分析基底地层的节理构造,确定基底褶皱各个主应力轴的方向,并反演基底褶皱的古应力场特征。此次研究实测了基底褶皱地层中 10 个地质点的节理产状数据(图 10),每个观测点的节理产状统计数确保在 60 组以上,

这样统计结果更可靠^[23](表 2)。利用吴氏网绘制节理法线极点等密图和节理走向玫瑰花图,求出每处观察点节理构造的优势产状,然后结合典型共轭剪节理法求出各个主应力轴的方向,进而反映矿田基底褶皱的应力场分布特征^[24](图 10)。

3.2.1 桥子坑复向斜的应力场特征

在桥子坑复向斜共有 6 个节理统计点,分析得知基底褶皱的北部和中部的节理整体走向均为 NNW 和 NWW 向,南部则为 NEE 向和 EW 向。桥子坑复向斜最大主应力 σ_1 方向由北至南为 $338^\circ \angle 57^\circ \rightarrow 115^\circ \angle 51^\circ \rightarrow 205^\circ \angle 2^\circ \rightarrow 233^\circ \angle 70^\circ$ 。在这样富有变化的应力场作用下,使褶皱两翼地层发生扭动,并形成现在的弧状形态。

表 1 桥子坑-芹子坑复式向斜构造产状及应力方向数据

Table 1 Data of attitude and stress direction of Qiaozikeng-Qinzikeng compound syncline structure

区段 编号	位置	产状 数量	两翼岩层的优选产状		枢纽产状	轴面产状	点应力状态		
			东翼	西翼			σ_1	σ_2	σ_3
I-1	桥子坑复向斜	13	$151^\circ \angle 44^\circ$	$313^\circ \angle 51^\circ$	$32^\circ \angle 6^\circ$	$326^\circ \angle 82^\circ$	$147^\circ \angle 17^\circ$	$256^\circ \angle 54^\circ$	$39^\circ \angle 37^\circ$
II-1	桥子坑复向斜	32	$287^\circ \angle 45^\circ$	$96^\circ \angle 55^\circ$	$183^\circ \angle 11^\circ$	$104^\circ \angle 84^\circ$	$279^\circ \angle 8^\circ$	$12^\circ \angle 6^\circ$	$135^\circ \angle 74^\circ$
II-2	芹子坑复向斜	11	$272^\circ \angle 52^\circ$	$83^\circ \angle 57^\circ$	$182^\circ \angle 11^\circ$	$271^\circ \angle 85^\circ$	$101^\circ \angle 12^\circ$	$4^\circ \angle 31^\circ$	$216^\circ \angle 41^\circ$
III-1	桥子坑复向斜	43	$266^\circ \angle 41^\circ$	$75^\circ \angle 53^\circ$	$174^\circ \angle 12^\circ$	$261^\circ \angle 86^\circ$	$92^\circ \angle 18^\circ$	$351^\circ \angle 36^\circ$	$208^\circ \angle 44^\circ$
III-2	芹子坑复向斜	88	$233^\circ \angle 74^\circ$	$95^\circ \angle 76^\circ$	$345^\circ \angle 12^\circ$	$252^\circ \angle 86^\circ$	$85^\circ \angle 10^\circ$	$337^\circ \angle 36^\circ$	$182^\circ \angle 51^\circ$
IV-1	桥子坑复向斜	50	$244^\circ \angle 45^\circ$	$66^\circ \angle 52^\circ$	$155^\circ \angle 6^\circ$	$66^\circ \angle 78^\circ$	$244^\circ \angle 27^\circ$	$351^\circ \angle 36^\circ$	$117^\circ \angle 38^\circ$

注:测试精度为 1°,误差为 5°

表 2 银坑矿田基底褶皱节理统计数据

Table 2 Statistical data of basement fold joints in the Yinkeng orefield

点号	位置	构造归属	地层及岩性	节理 条数	共轭剪节理产状		主应力轴方向	
					S_1	S_2	σ_1	σ_3
1	八公排南	芹子坑复向斜南部西翼	Qnk 变质凝灰质砂岩	66	$101^\circ \angle 79^\circ$	$25^\circ \angle 46^\circ$	$141^\circ \angle 24^\circ$	$253^\circ \angle 31^\circ$
2	五公坑南	芹子坑复向斜南部中部	Qnk 变质砂岩	191	$252^\circ \angle 74^\circ$	$6^\circ \angle 74^\circ$	$129^\circ \angle 25^\circ$	$220^\circ \angle 1^\circ$
3	樟树坳东	芹子坑复向斜南部中部	Qnss 变质凝灰岩	178	$11^\circ \angle 79^\circ$	$214^\circ \angle 71^\circ$	$120^\circ \angle 55^\circ$	$21^\circ \angle 6^\circ$
4	樟树坳东	芹子坑复向斜南部西翼	Qnss 变质凝灰质砂岩	172	$343^\circ \angle 52^\circ$	$28^\circ \angle 71^\circ$	$84^\circ \angle 21^\circ$	$186^\circ \angle 29^\circ$
5	秀坑北东	桥子坑复向斜南部西翼	Qnk 粉砂岩	163	$347^\circ \angle 71^\circ$	$150^\circ \angle 61^\circ$	$233^\circ \angle 69^\circ$	$342^\circ \angle 7^\circ$
6	茶背东	桥子坑复向斜南部西翼	Qnk 砂质、粉砂质板岩	177	$340^\circ \angle 69^\circ$	$121^\circ \angle 40^\circ$	$206^\circ \angle 60^\circ$	$324^\circ \angle 14^\circ$
7	大山排东南	桥子坑复向斜南部西翼	Qnss 板岩	168	$313^\circ \angle 77^\circ$	$127^\circ \angle 71^\circ$	$210^\circ \angle 76^\circ$	$311^\circ \angle 2^\circ$
8	大山西	桥子坑复向斜南部西翼	Qnss 板岩	158	$92^\circ \angle 72^\circ$	$139^\circ \angle 75^\circ$	$205^\circ \angle 4^\circ$	$295^\circ \angle 16^\circ$
9	松山背东	桥子坑复向斜北部西翼	Qnk 变质凝灰质粉砂岩	170	$350^\circ \angle 83^\circ$	$203^\circ \angle 54^\circ$	$115^\circ \angle 51^\circ$	$8^\circ \angle 14^\circ$
10	桥子坑东	桥子坑复向斜北部东翼	Qnk 凝灰质板岩	158	$186^\circ \angle 76^\circ$	$48^\circ \angle 30^\circ$	$338^\circ \angle 57^\circ$	$201^\circ \angle 24^\circ$

注:测试精度为 1°,误差为 5°;表中地层代号注释同图 2

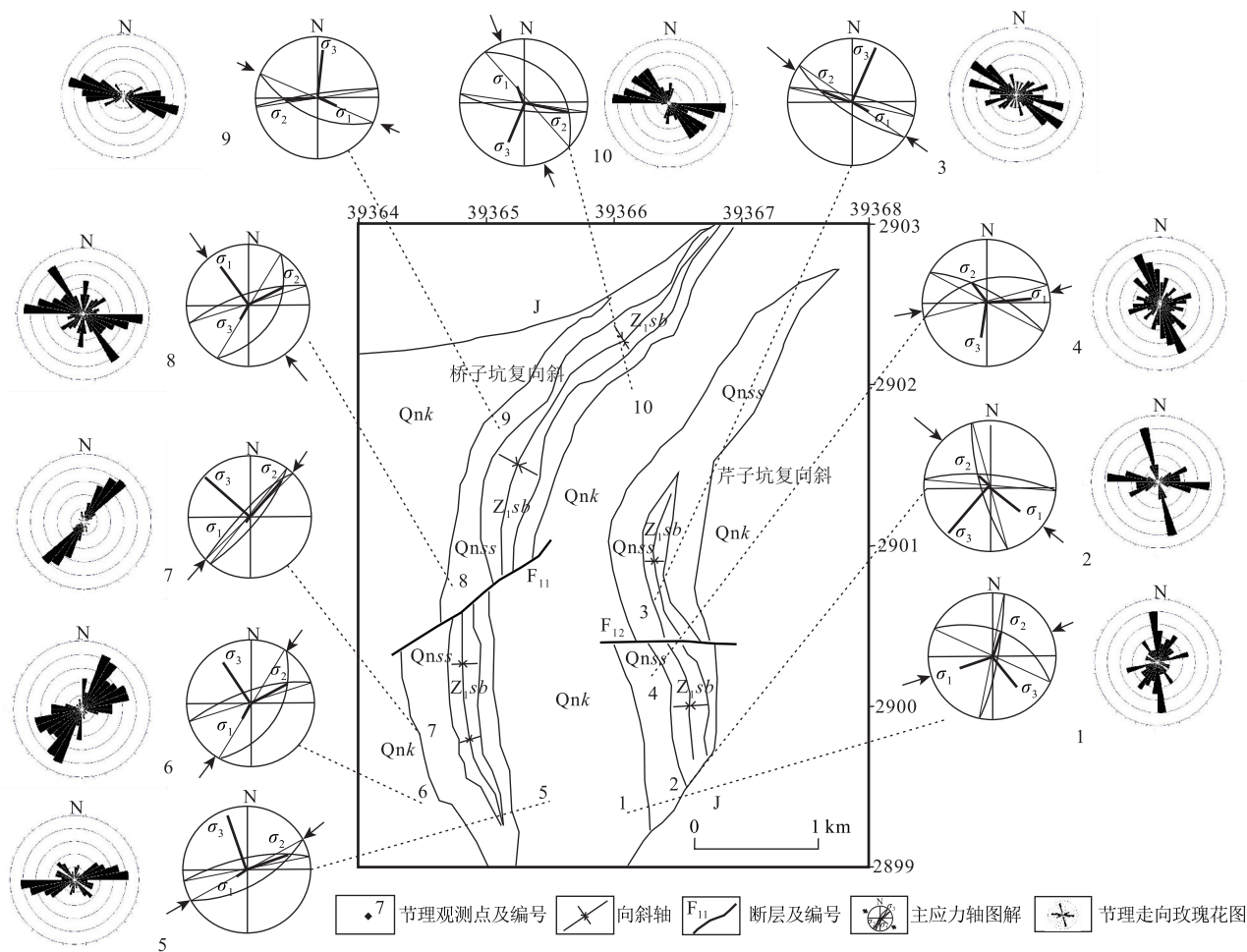


图 10 银坑矿田基底褶皱应力场分布图(地层代号注释同图 2)

Fig. 10 Distribution of stress field of basement folds in the Yinkeng orefield

3.2.2 芹子坑复向斜的应力场特征

芹子坑复向斜共 4 个节理统计点,此处节理的总体走向为 NWW 向和 NNW 向。芹子坑复向斜最大主应力 σ_1 的方向由北至南为 $120^\circ \angle 55^\circ \rightarrow 84^\circ \angle 21^\circ \rightarrow 141^\circ \angle 24^\circ$,在这样的应力作用下,褶皱核部地层产状近直立形态。

3.3 基底褶皱构造应力场及其控矿特征

结合基底褶皱两翼优势产状分析法和节理构造解析法,可知银坑矿田基底褶皱带的最大主应力方向由北至南分布为 NNW $\rightarrow$ NWW $\rightarrow$ EW $\rightarrow$ NEE 向。在构造应力场解析的基础上,结合前人对矿田内地质历史构造运动特征研究^[25-29],反演银坑矿田基底褶皱的构造发展史及其控矿作用,可知基底褶皱主应力方向自加里东期—燕山期依次转变为 EW $\rightarrow$ NWW $\rightarrow$ NNW $\rightarrow$ NEE 向。矿田基底地层在

加里东期运动早期 EW 向挤压形成 SN 向褶皱带与大量的 SN 向褶劈理带,应力场转换期间基底褶皱受到的挤压应力转为拉张应力,促进劈理带内形成一系列次级 SN 向纵张裂隙,后期成矿热液活动形成了 SN 向矿化石英脉。多期应力场的转换与叠加使得基底褶皱平面形态发生变化而呈反“S”状。

4 基底褶皱 SN 向成矿带的发现

银坑矿田是一个贵多金属矿田,前人认为矿田基底褶皱内主要发育受层间破碎带控制的层控型铅锌矿化体与近 EW 向热液脉型矿化带^[3]。本文提出基底褶皱 SN 向张裂隙控矿,并首次发现褶皱作用晚期的纵张断裂发育近 SN 向的交代充填石英矿脉,伴生次一级的横张石英脉。受加里东期近 EW 向挤压应力的作用,银坑矿田基底地层形成了以芹

子坑复向斜和桥子坑复向斜为主的复式褶皱与 SN 向褶劈理带为主的挤压应变构造。在牛形坝矿区井下桥子坑复向斜西翼的青白口系中,观察到褶劈理带内间或发育数条近 SN 向纵张裂隙。张裂隙产状与基底岩层斜交,稳定地切穿岩层层理和层状矿体,使其连续性遭到破坏。这些张性裂隙应形成于基底褶皱作用后期的应力场由挤压转拉张期间。纵张裂隙走向均为近 SN 向,倾角为 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$,长度不等,最长可延伸数十米。其间充填 SN 向含矿石英脉,间距为 $5\sim 30\text{ m}$,剖面上呈中部较厚大、上下变薄的长透镜状,且与围岩界线较为明显,在走向上呈舒缓波状延伸,且伴生有次一级的横张石英脉(图 11)。

在牛形坝矿井下的 60 中段、104 中段(图 12)和 140 中段首次发现 12 条近 SN 走向的含矿石英脉,并在 104 中段采集 6 块黄铁矿化石英脉进行含矿性分析,进一步了解其含矿特征。从表 3 可以看出,此类矿化石英脉样品的成矿元素含量普遍高于克拉克值,石英脉中 Pb 和 Zn 平均含量为 1325×10^{-6} 和 1890×10^{-6} ,Au 和 Ag 的平均含量为 0.127 g/t 和 15.33 g/t 。其中铅和锌的平均含量分别为克拉克值的 106 倍和 27 倍,Au 和 Ag 的平均含量分别为克拉克值的 32 倍和 219 倍,有显著的矿化特征。由这一新的发现可知,银坑矿田基底褶皱内的 SN 向矿化石英脉中的金、银、铅、锌多金属矿具有开发潜力。

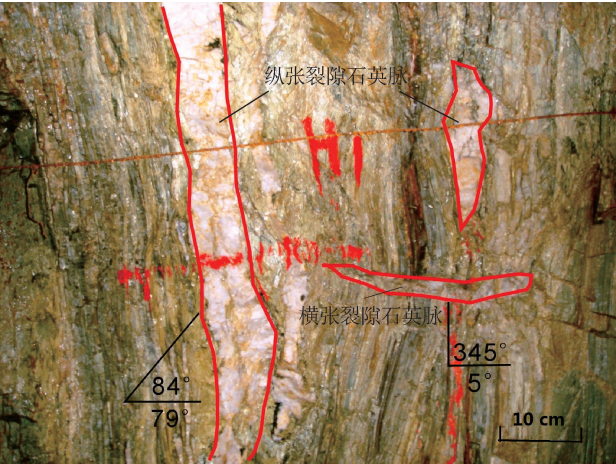


图 11 牛形坝矿区 104 中段的顺层挤压劈理、顺层和切层矿化石英脉图

Fig. 11 Bedding squeezing cleavage, bedding and cutting mineralized quartz veins in 104 level of the Niuxingba mining area

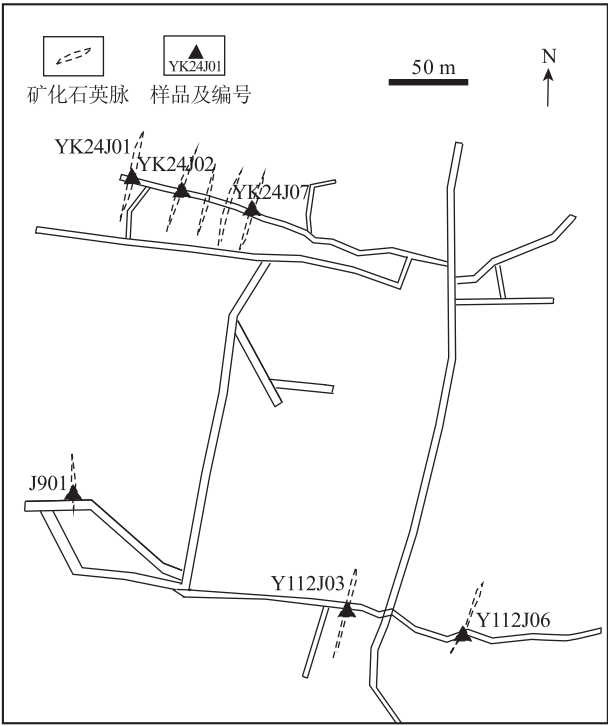


图 12 银坑矿田牛形坝矿区 104 中段的 SN 向矿化石英脉及样品分布图

Fig. 12 The distribution of the NS-trending mineralized quartz veins and samples in 104 level of the Niuxingba mining area, Yinkeng orefield

表 3 银坑矿田桥子坑矿区 SN 向矿化石英脉主要成矿元素含量

Table 3 Content of main metallogenic elements in the Qiaozikeng mining area, Yinkeng orefield

元素	10 ⁻⁶						地壳丰度 ^[30]
	YK24J01	YK24J02	YK24J07	J901	Y112J03	Y112J06	
Pb	93.60	6890.00	25.60	40.00	842.00	46.60	12.50
Zn	788.00	>10000	169.00	142.00	115.00	39.00	70.00
Ag	2.77	7.33	0.29	2.53	78.40	0.54	0.07
Au	0.02	0.28	0.02	0.05	0.41	<0.005	0.00
Cu	231.00	226.00	109.50	55.50	448.00	6.10	60.00
W	37.80	2.20	5.50	1.80	0.80	1.10	1.25
Mn	1800.00	425.00	2070.00	2930.00	4850.00	850.00	950.00
Mo	1.56	1.62	1.34	11.60	1.60	2.84	1.20
Sb	1.43	4.21	0.83	1.19	2.59	0.35	0.20

注:样品由澳实分析检测(广州)有限公司测定,Au 分析方法为火试金法,其他为质谱/光谱仪

5 结 论

(1) 查明了基底复式褶皱的几何学特征: 枢纽走向由北至南为 NE→NNE→SN→NNW 向, 翼间角为 33°~52°, 褶皱类型为紧闭陡立尖棱状褶皱。

(2) 恢复了基底复式褶皱的应力场分布与演化特征, 并探讨对成矿的控制作用: 基底褶皱应力场方位的空间分布由北至南分布为 NNW→NWW→EW→NEE 向, 自加里东期至燕山期主应力方向依次转变为 EW→NWW→NNW→NEE 向; 早期基底地层受 EW 向挤压而形成 SN 向构造带与大量的 SN 向褶皱理带, 应力场转换期间基底褶皱受到的应力由挤压向拉张转换, 促进褶皱理带内形成 SN 向纵张裂隙, 为后期 SN 向矿化提供空间。

(3) 首次发现了近 SN 向的含金银铅锌构造矿化带, 并查明其矿化特征, 认为其受褶皱晚期纵张断裂构造控制。在桥子坑矿区地表和牛形坝矿区井下新发现 12 条该 SN 向矿脉, 分析其含矿性为: Pb、Zn 平均含量分别为 0.133% 和 0.190%, Au、Ag 的平均含量分别为 0.127 g/t 和 15.33 g/t, 具有较高的矿化特征, 认为 SN 向为新的成矿方向并具有巨大的成矿潜力, 对矿田内基底地层和深部找矿研究具有促进作用。

致谢: 在此祝贺尊敬的吕古贤研究员 70 华诞, 感谢老师多年的教诲, 衷心祝愿老师身体健康, 向您为地质事业做出的卓越贡献致敬; 感谢同门王殿良、韩璐、罗毅甜和袁月蕾在银坑期间的指导与帮助; 感谢审稿专家提出的建设性意见和建议。

参考文献

- [1] 张家菁. 赣南东部银坑矿田控矿因素及找矿方向浅析[J]. 江西地质, 1997, (4): 23-29.
- [2] 梅勇文. 江西南部推(滑)覆构造系统研究[J]. 江西地质, 1997, (3): 52-60.
- [3] 高贵荣, 林长仔. 于都县银坑矿田 F₁ 断裂特征及其控矿作用[J]. 江西地质, 2000, (1): 49-53.
- [4] 陈毓川, 裴荣富, 王登红. 三论矿床的成矿系列问题[J]. 地质学报, 2006, (10): 1501-1508.
- [5] 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 等. 对中国成矿体系的初步探讨[J]. 矿床地质, 2006, (2): 155-163.
- [6] 吕古贤, 曹钟清, 郭涛, 等. 长江中下游中生代构造岩相体系分布与成矿规律——新华夏构造体系的“长江式”构造研究[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35, (4): 495-501.
- [7] 吕古贤. 构造物理化学基本问题与金矿成矿预测[J]. 地球学报, 1998, (2): 3-5.
- [8] 吕古贤. 关于矿田地质学的初步探讨[J]. 地质通报, 2011, 30(04): 478-486.
- [9] 施明兴, 高贵荣. 江西于都银坑矿田金银铅锌矿床地质特征[J]. 资源调查与环境, 2006, (2): 164-172.
- [10] Carter, Andrew, Roques, et al. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism[J]. Geology, 2001, 29: 211-214.
- [11] Mao J R, Li Z L, Zhao X L, et al. Geochemical characteristics, cooling history and mineralization significance of Zhangtiantang pluton in South Jiangxi Province, P. R. China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2010, 29: 53-64.
- [12] Wang Y J, Fan W M, Guo F, et al. U-Pb dating of Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province and its petrogenetic implication[J]. Science in China, 2001, 45: 271-280.
- [13] Zeng Q T, Mao J R, Chen R, et al. Chronology and cooling history of the Tianmenshan pluton in South Jiangxi Province and their geological significance[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2008, 27: 276-284.
- [14] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 等. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 636-658.
- [15] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 等. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 2007, (10): 2329-2338.
- [16] 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 南岭构造带的基本地质特征[J]. 地质论评, 2006, (2): 251-265.
- [17] 赵正, 陈毓川, 陈郑辉, 等. 赣南银坑矿田高山角花岗闪长岩 SHRIMP U-Pb 定年及其与成矿的关系[J]. 岩矿测试, 2012, 31(3): 536-542.
- [18] 翟裕生. 成矿构造研究的回顾和展望[J]. 地质论评, 2002, (2): 140-146.
- [19] 刘如琦, 张宝华, 蔡一廷. 圆锥状褶皱的几何分析[J]. 地质科学, 1985, (2): 113-124.
- [20] 苗培森. 五台山西部变质岩系中圆锥状褶皱的分析[J]. 中国区域地质, 1991, (1): 17-24.
- [21] 钱光漠. 褶皱构造几何学研究[J]. 中国矿业学院学报, 1988, (2): 72-79.
- [22] 翟裕生, 林新多. 矿田构造学[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 2-54.
- [23] 万天丰. 构造应力场研究及其在区域地质调查工作中的意义[J]. 中国区域地质, 1984, (2): 83-88.
- [24] 陈正乐, 杨农, 王平安, 等. 江西临川地区相山铀矿田构造应力场分析[J]. 地质通报, 2011, 30(4): 514-531.
- [25] 张长厚, 吴淦国, 徐德斌, 等. 燕山板内造山带中段中生代构造格局与构造演化[J]. 地质通报, 2004, 23(2/3): 864-875.
- [26] 吴淦国, 吕承训. 矿田构造的研究历史、现状与发展[J]. 地质通报, 2011, 30(4): 461-468.
- [27] 吴淦国. 矿田构造与成矿预测[J]. 地质力学学报, 1998, (2): 3-5.
- [28] 杨开庆. 动力成岩成矿理论的研究内容和方向[J]. 中国地质科学院地质力学研究所文集, 1986, (1): 1-15.
- [29] 杨兴科, 晁会霞, 吕古贤, 等. 金属矿田构造类型划分与找矿预测思路分析[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 897-898.
- [30] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 1964, 28(8): 1273-1285.