

文章编号:0258-7106 (2007) 04-0380-17

贵州锦丰(烂泥沟)超大型金矿床构造解析 及构造成矿作用*

陈懋弘^{1, 2}, 毛景文¹, Phillip J. Uttley², Tony Norman², 吴六灵^{2, 3},
郑建民⁴, 秦运忠³(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 Sino Gold Mining Limited, Sydney, NSW 2000, Australia;
3 广西地勘局 271 地质队, 广西 临桂 541100; 4 中国地质大学, 北京 100083)

摘要 在矿区大比例尺填图的基础上,运用构造解析的理论和方法,对贵州锦丰(烂泥沟)金矿的构造特征、构造演化和构造控矿作用进行了系统的阐述。矿区构造线主要分为近 NS 向、NW 向和 NE 向 3 组,其中 NW 向构造线控制了矿区的构造格架。构造变形主要经历了同生期裂陷、造山期挤压、后碰撞造山侧向挤压和岩石圈伸展等 4 个阶段。盆地裂陷期间(D₂-T₂)形成的同生断层为后续的构造活动提供了最初的构造薄弱面,并成为主要的热液通道;造山期挤压期间(T₃)形成了矿区最为明显的近 NS 向和 NW 向大型倒转褶皱和逆冲断层以及配套的 NE 向右旋走滑断层;后碰撞造山侧向挤压期间(J₁)形成走向 NE 的叠加褶皱,并在 F₂-F₃“X”型断裂系上形成近 EW 向的拉张区,矿质沿着拉张的空间沉淀就位;燕山期(J₂-K)岩石圈伸展,形成小规模的近水平逆断层。上述 4 个主要构造变形阶段与右江盆地的裂陷-闭合-坍塌的发展演化历史相吻合,成矿发生在由挤压向拉张过渡的构造体制转换阶段。造山期逆冲作用形成的构造闭圈和后碰撞造山期间挤压向伸展转变的过程中形成的局部张性构造环境是矿质得以大量聚集、沉淀的主要构造控制因素。构造成矿作用是锦丰(烂泥沟)金矿单一矿体垂向延深 1 000 m 以上的主要制约因素。构造成矿的观点将为在滇黔桂“金三角”卡林型金矿带的深部找矿提供重要的理论依据。

关键词 地质学;后碰撞造山;构造成矿;卡林型金矿;锦丰(烂泥沟)金矿;贵州**中图分类号**: P618.51**文献标识码**: A

Structure analysis and structural metallogenesis of Jinfeng (Lannigou) gold deposit in Guizhou Province

CHEN MaoHong^{1, 2}, MAO JingWen¹, Phillip J. Uttley², Tony Norman², WU LiuLing^{2, 3},
ZHENG JianMin⁴ and QIN YunZhong³

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Sino Gold Mining Limited, Sydney, NSW 2000, Australia; 3 No. 271 Geological Party of Guangxi, Lingui 541100, Guangxi, China; 4. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

Jinfeng, previously known as Lannigou, is the largest known Carlin-type gold deposit in Yunnan-Guizhou-Guangxi triangle area of southwestern China. The structural characteristics, evolution and metallogenesis of the Jinfeng gold deposit were detailed in this paper based on the large scale mine mapping and the theory and method

* 本文得到中国地质调查局项目“我国主要金属矿床模型研究”(1212010634001)和 Sino Gold Mining Limited(Australia)科研基金的联合资助
第一作者简介 陈懋弘,男,1971 年生,博士研究生,矿床学及构造地质学专业。E-mail: mhchen666@163.com
收稿日期 2007-02-09; 改回日期 2007-06-20; 李 岩、许德焕编辑。

of structural analysis. The structural lines of this deposit were classified into three groups, trending north-south, northwest and northeast respectively, in which, the NW trending structural line control the structural framework of the deposit. This deposit underwent four structural deformation stages, i. e., splitting in the contemporaneous stage, compressing in the collisional stage, lateral comperessing in the post-collisional stage and extending of lithosphere. A series of contemporaneous normal faults, such as F_1 , F_7 which were northwest-southeast trend and dipped east in the deposit, were formed around the carbonate rock platform during the splitting stage of Youjiang basin. These faults provided a primary structural weakness plan for the late structure action. Because there existed Laizishan dome which was near north-south strike, compression direction in collisional stage changed gradually from east→west to northeast→southwest, and most obvious north-south and northwest strike structural lines were formed in the deposit. That is, a fold-fault structural association existed which was composed of strongly overturned folds and reverse faults. Accompanied northeast trend dextral shear belts, such as F_2 , were formed in this stage. The early contemporaneous faults, like F_1 , F_7 , correspondingly experienced dextral shear. The compression direction in the post-collision stage was northwest-southeast trend, and refolded the folds generated in the collisional stage into northeast strike superimposed folds whose hinge varied with the bedding of early stage folds. On the other hand, the compression area in north-south trend and the extension area in east-west trend were formed respectively due to the stress' distribution on the "X" type fault system formed in the orogenic stage. Because it was the firm rock of Laizi-shan dome in the west, the extension tended to happen in the east area and resulted in F_2 's sinistral-normal slipping and F_3 's dextral-normal slipping, with the ore-bearing fluid entering the extension area leading to gold precipitation. After this, lithosphere extended in the Yanshanian stage in which the small reverse fault slightly cut the former structure. The above four main structural deformation stages matched the evolution of Youjiang basin from splitting to closing and collapsing. Large scale gold metallogenesis occurred at the structural transition from collisional compression to extension tectonics. The structural trap formed by thrusting in the collisional orogeny stage and the splay setting in the transition process from compression to extension seem to have been the main controlling factors for large scale congregation and deposition of gold. Structural metallogenesis is the most restricted factor for the vertical extension of a single ore body for 1 000 m. The view of structural metallogeny would provide a significant theoretical basis for the deep exploration of Carlin-type gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi triangle area.

Key words: geology, post-collision, structural metallogenesis, Carlin-type gold deposit, Jinfeng (Lan-nigou) gold deposit, Guizhou

贵州锦丰(烂泥沟)(下文简称烂泥沟)金矿位于贵州省黔西南州贞丰县沙坪乡烂泥沟,最早发现于1986年。历经20年的勘查,目前查明资源/储量大于126.25 t^①,达到超大型规模,且矿体仍未圈闭,是滇黔桂“金三角”目前已探明的最大的卡林型金矿床。虽然烂泥沟金矿是典型的构造控矿矿床,但除

了罗孝恒(1993)、Hodkiewicz等(2004)^②和Norman(2005)^③等在生产中做了部分露头构造研究,陈武等(1995)对辉锑矿的显微构造研究之外,尚无系统的构造研究,特别是对构造与成矿的关系尚缺乏系统的阐述。

目前,滇黔桂“金三角”迎来了以寻找原生矿、深

① Sino Gold Mining Limited. 15/Feb./2006. Announcements: Sino gold announces Jinfeng resource exceeds 4 million ounces gold[EB/OL]. <http://sinogold.com.au>.

② Hodkiewicz P and Ham A. 2004. Structural Geology Review of the Jinfeng Gold Deposit, P. R. China. Report Prepared for Sino Gold Limited. SRK Project Number SIN101, SRK Consulting (Australia).

③ Norman T. 2005. Structural geology of Anbao, Gaolu and Jinfeng mapping and logging procedures. Memos Prepared for Sino Gold Limited Geocentric Company (Australia).

部矿和超大型矿为目的的第二轮找矿高潮。在此背景下,本文试图经过详细的矿床及其外围填图,运用现代构造解析的理论和方法,研究烂泥沟金矿的构造变形特征和构造演化史,探讨构造对成矿的控制作用,并希望能举一反三,对滇黔桂“金三角”同类矿床的深部勘探和研究提供一定的借鉴。

1 右江盆地的大地构造属性问题

滇黔桂“金三角”所有的卡林型金矿床均位于右江盆地的构造范畴内,因此,盆地构造演化对成矿的控制作用勿庸置疑。构造对成矿的控制,首先体现在盆地的构造演化对成矿过程的控制。

右江盆地广为引用的大地构造名词是“右江再生地槽”(广西壮族自治区地质矿产局,1985;黄汲清,1980)。板块构造理论被引入后,许多学者试图对右江盆地的大地构造属性重新进行诠释,主要有“右江裂谷”(柳淮之等,1986),“右江弧后盆地”(曾允孚等,1995;张锦泉等,1994),“南盘江海”(或八布 Phu Ngu 洋盆)之说(吴根耀等,2001;吴浩若,2003)。尽管上述观点不尽相同,但都注意到了右江盆地发展演化历史中一些比较特殊的地方:一是海西期浅水台地和深水盆地(或台沟)纵横交叉分割的特点;二是三叠纪巨厚的陆源碎屑浊积岩;三是长期的岩浆活动史(D-T)。

综合前人资料,可以发现:

(1) 整个右江盆地呈明显的三角形(图1)。构造线在云南部分呈NE向,在广西部分呈NW向。而贵州部分,重力和航磁资料均显示存在一个明显的NS向构造(王砚耕等,1994),并且在南部转为EW向(柳淮之等,1986)。同时李朝阳(1995)还认为扬子板块西部存在一些NS向的深大断裂,并导致峨眉山玄武岩呈NS向展布。上述资料暗示右江盆地为在陆壳基底上发育起来的“三叉形”裂谷盆地。其中NW向和NE向2支发育良好,但NS向裂谷却“夭折”了,故NS向构造不发育,但深部物探有显示。

(2) 盆地内大量分布的孤立碳酸盐岩台地边界大多能互相拼合成一个整体,支持存在一个以台为主,以沟为辅的古地理格局,不存在一个广阔的大洋。

(3) “再生地槽”期间,浊流流向总体为由南向北(吴江等,1992;1993),且盆地关闭的推移方向亦由南向北,与“三叉形”裂谷的发展演化类似,即沉积物由造山带流向大陆内部。

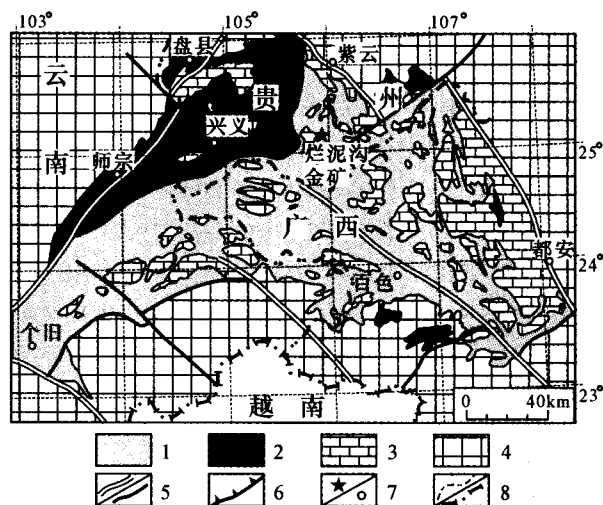


图1 烂泥沟金矿区区域构造位置图

1—三叠系盆地相浊积岩;2—三叠系台地相碳酸盐岩夹砂泥岩;3—晚古生代孤立碳酸盐岩台地;4—前三叠系;5—区域大断层/一般大断层;6—逆冲推覆构造;7—烂泥沟金矿/县市;8—省界/国界
Fig. 1 Regional geological map showing the location of the Jinfeng (Lannigou) gold deposit in Guizhou Province

1—Turbidite of Triassic basin phase; 2—Carbonate rock and sandy mudstone of Triassic platform phase; 3—Late Paleozoic carbonate rock platform; 4—Pre-Triassic strata; 5—Regional fault/fault; 6—Nappe structure; 7—Jinfeng (Lannigou) gold deposit /county or city; 8—Provincial boundary /national boundary

因此,笔者认为右江地区泥盆纪—三叠纪可能不存在一个宽广的大洋,而是一个在陆壳基底上裂解而成的裂谷盆地,局部地区可出现具洋壳性质的盆地。晚二叠世,随着印支板块的俯冲,裂谷盆地转换为弧后盆地,但此时的弧后盆地仍然是扩张的环境。中三叠世,随着印支板块和古太平洋板块对扬子板块(或华南板块)的联合挤压,盆地应力状态由扩张转为挤压,弧后盆地相应地转换为弧后前陆盆地,沉积巨厚的陆源碎屑浊积岩。挤压造山末期,仅盆地西北部出现磨拉石堆积。侏罗纪和白垩纪造山后的伸展,出现断陷盆地。

烂泥沟金矿的形成与上述右江盆地的形成和演化息息相关。右江盆地特殊的大地构造环境为区内“卡林型”金矿的形成提供了一个独一无二的构造地质条件。

2 矿床基本地质特征

烂泥沟金矿位于右江盆地西北部,毗邻扬子陆块西南边缘(图1),是一个位于孤立碳酸盐岩台地与陆源碎屑岩沉积盆地接触界面附近,但赋存于陆源碎屑岩盆地一侧的超大型金矿床。

矿区内出露地层主要为中三叠统许满组、尼罗组和边阳组,主体岩性为深水盆地相陆源碎屑浊积岩。西部赖子山背斜为石炭系、二叠系及下三叠统的台地相浅水碳酸盐岩及台缘相礁灰岩及盆缘斜坡相碳酸盐岩。

矿区范围无岩浆岩活动,仅在矿区北北西直距27 km 远的贞丰县白层有燕山期偏碱性超基性岩小岩体出露。

以 F_2 为界,可将矿床划分为冗半矿段和磺厂沟矿段。矿体主要赋存于磺厂沟矿段NW向断层 F_3 (占储量的81%)及其与NE向断层 F_2 的交叉部位,矿体形态受断层的控制。赋矿岩石为许满组至边阳组的含钙质细砂岩和泥岩。赋存于NW向断层 F_3 中的矿体,地表出露长仅550 m,但垂向延伸1 000 m以上,目前矿体深部边界仍未圈闭。

蚀变类型主要为硅化、黄铁矿化、毒砂化、辉锑矿化、汞矿化、碳酸盐化、粘土化等,其中普遍见到的是硅化、黄铁矿化和粘土化。

矿石构造主要为浸染状构造,表现为矿石中含砷黄铁矿、毒砂呈星点状、浸染状分布。另外尚有少量脉状、网脉状、条带状构造。

金主要呈显微-次显微状赋存于黄铁矿富砷环带中(吴秀群,1992)。

成矿物理化学条件研究表明,流体富 CO_2 ($x_{\text{CO}_2} > 0.05$),低盐度[$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 3.9%~6.4%],较高的温度(200~300℃)和压力($600 \times 10^5 \text{ Pa} \sim 1\,400 \times 10^5 \text{ Pa}$)。硫、碳、氧同位素表明硫来自围岩,碳来自围岩的碳酸盐(Zhang,1997)。

至于成矿时代,前人运用石英、方解石流体包裹体的Rb-Sr法,石英裂变径迹法测年,给出了(259±27) Ma(胡瑞忠等,1995),105.6 Ma(苏文超等,1998),82~83 Ma(张峰等,1992)3组数据。最近笔者运用Re-Os同位素法对该矿床的9个含砷黄铁矿样品进行了测试,获得等时线年龄为(193±13) Ma(陈懋弘等,2007),并认为成矿发生在从印支期挤压造山向燕山期伸展转变的构造转换期。

3 矿区构造

本文所指的矿区为矿床及其周边约50 km²的范围。

烂泥沟金矿区大体可分为台地和盆地2个不同的构造单元(图2)。西部为台地,由产状平缓而稳定

的石炭系一二叠系灰岩组成;东部为盆地,由一系列强烈褶皱和冲断的三叠系陆源碎屑岩组成。靠近台地边缘,特别是同生断层附近,褶皱十分强烈,常形成倒转的大型复式背、向斜,逆冲断层发育;远离台地边缘,褶皱强烈程度降低,常形成宽缓状的褶皱,断层发育程度减弱。整个碎屑岩盆地区显示出十分完整的褶皱和冲断的构造组合样式(见图2下方的剖面图)。

3.1 褶皱

矿区西部为赖子山碳酸盐岩穹隆。王砚耕(1994)等、索书田等(1993)曾认为赖子山背斜南东部(洛帆一带)存在一个倾向NW的大型逆冲断层,故把赖子山背斜划为黔西南大型多层次席状逆冲-推覆构造前锋的一部分。但笔者最近的实测地质剖面、物探剖面、钻孔等资料均表明,赖子山背斜南东部不存在一个倾向NW的大型逆冲断层,相反,台地周缘的主要断层均倾向盆地。因此,赖子山穹隆不是外来地体,而是一个原地的孤立碳酸盐岩台地,与整个右江盆地内其他的孤立碳酸盐岩台地类似。黔西南大型多层次席状逆冲推覆构造的前锋应该在赖子山背斜的西北部。

矿区东部为碎屑岩盆地区,以NW向造山型线状褶皱为主,次为NS向、NE向。

NW向褶皱广泛分布,控制了矿区的主要构造格局。近台地边缘为大型的紧闭倒转复式背、向斜,南部以磺厂沟向斜、林坛背斜为代表,北部以尼罗向斜和高炉背斜为代表(图2)。这些大型复式背、向斜褶皱作用十分强烈,造成大面积的地层倒转,且翼部的次级褶皱发育,常形成复杂的多级次褶皱构造样式。远离台地,为宽缓状大型褶皱,两翼地层基本正常。这些褶皱规模大,需在一定范围进行填图方能识别。

NS向褶皱主要分布在安堡一带,以安堡向斜、孔方背斜为代表。为紧闭或倒转褶皱,核部岩层陡立甚至倒转。该组褶皱被NW向和NE向褶皱所改造,故判别其形成时代较早。

NE向褶皱规模小,多为露头尺度的背、向斜,且多为宽缓状。NE向的次级小褶曲叠加于上述NS向、NW向主体褶皱构造之上。值得注意的是,矿区距离黔西南大型多层次席状逆冲推覆构造前锋仅18~22 km(图1),且NE向褶皱走向垂直该逆冲推覆构造的逆冲方向,两者的主应力方向是吻合的。同时,两者都叠加在造山期主构造之上,是印支造山运动之后最强烈的一次构造变形,反映两者是同一次构造事件的产物。

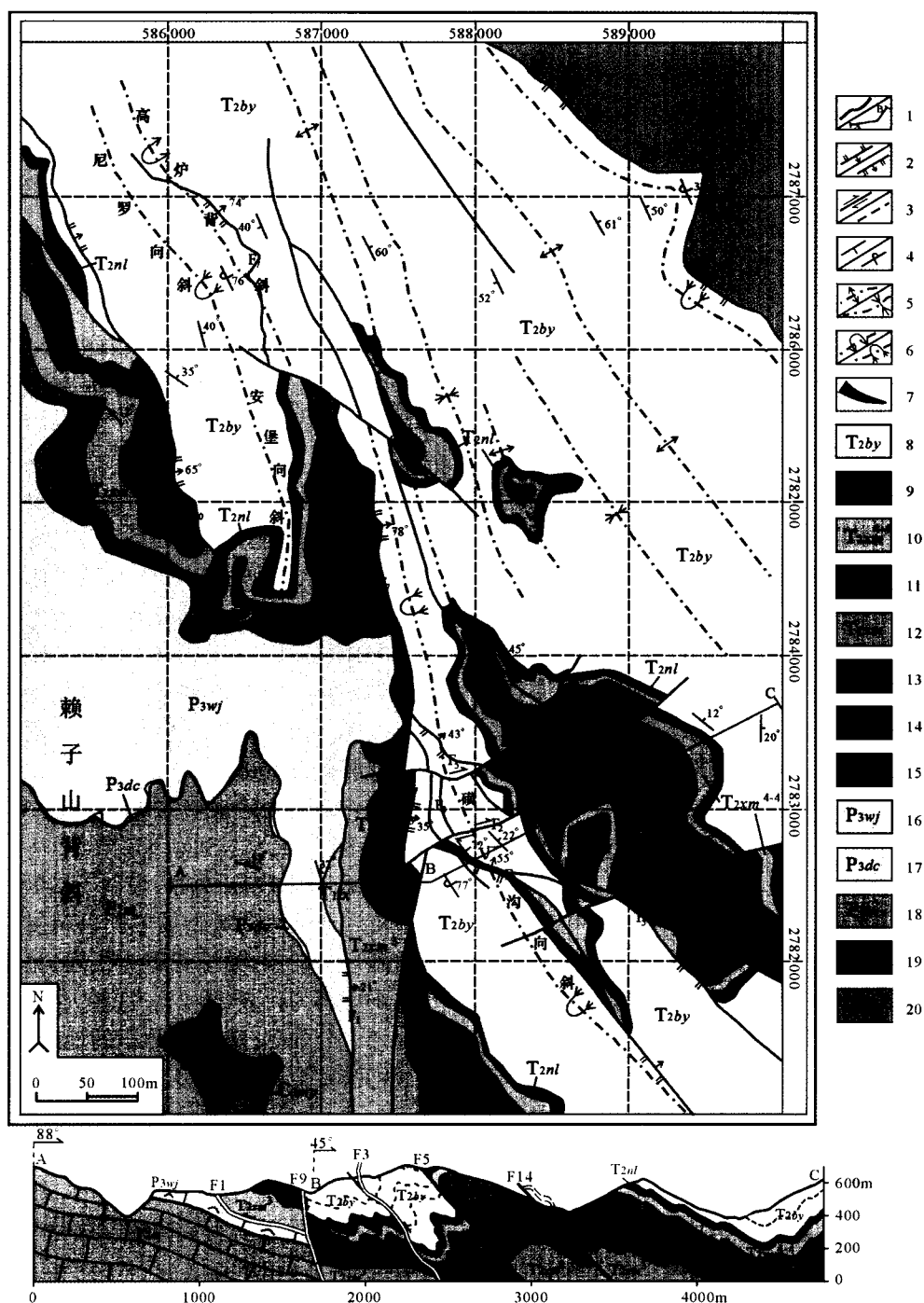


图 2 烂泥沟金矿区地质图 (据 Sino Gold Mining Ltd., 2006 综合)

1—地质界线/地质剖面线; 2—逆断层/正断层; 3—走滑断层/推测断层; 4—正常/倒转岩层产状; 5—背斜/向斜; 6—倒转背斜/向斜; 7—金矿体; 8—中三叠统边阳组砂岩夹泥岩; 9—中三叠统尼罗组泥岩夹瘤状灰岩; 10—中三叠统许满组第四段第四层块状砂岩; 11—中三叠统许满组第四段第三层泥岩; 12—中三叠统许满组第三段泥灰岩夹泥岩; 13—中三叠统新苑组砂泥岩夹灰岩; 14—下三叠统罗楼组薄层灰岩; 15—下三叠统灰岩角砾岩楔; 16—上二叠统吴家坪组厚层灰岩; 17—上二叠统大厂组泥岩夹凝灰岩; 18—中二叠统茅口组厚层灰岩; 19—下二叠统栖霞组灰岩; 20—上石炭统马平组灰岩

Fig. 2 Geological map of the Lannigou gold deposit (after Sino Gold Mining Ltd., 2006)

1—Geological boundary/cross section; 2—Thrust/normal fault; 3—Slip/inferred fault; 4—Normal/overtaken bedding; 5—Anticline/syncline; 6—Overtaken anticline/syncline; 7—Gold ore body; 8—Middle Triassic Bianyang Formation; 9—Middle Triassic Niluo Formation; 10—4th bed of 4th member of Middle Triassic Xuman Formation; 11—3rd bed of 4th member of Middle Triassic Xuman Formation; 12—3rd Member of Middle Triassic Xuman Formation; 13—Middle Triassic Xinyuan Formation; 14—Lower Triassic Luolou Formation; 15—Lower Triassic limestone breccia wedge; 16—Upper Permian Wujiaping Formation; 17—Upper Permian Dachang Formation; 18—Middle Permian Maokou Formation; 19—Lower Permian Qixia Formation; 20—Upper Carboniferous Maping Formation

3.2 断层

矿区主要发育3组断层,即NS向、NW向和NE向。与褶皱特点类似,即NW向断层规模大,延伸远;NE向断层规模小,延伸短,且常切割NW向断层。

NS向断层主要分布在矿区西部,其中 F_1 沿T/P的不整合面发育; F_7 则是陡立的同生断层。这些断层都是经历了多期活动的断层,包括盆地裂陷期间的同生正断,造山期间的挤压逆冲等。

NW向断层是矿区最为发育的断层,与NW向褶皱相伴,包括矿床附近的断层 F_3 、 F_5 、 F_{14} 、 F_{70} 以及矿区东北部的板昌区域大断裂。这些断层造山期以逆冲为主,晚期则以正滑-右旋为主。其中矿区东北部的板昌区域大断层由一条主断层及其上盘一系列次级小断层组成,构成叠瓦状逆冲断层系,将中三叠统下部的新苑组灰岩夹泥岩逆冲到中三叠统上部的边阳组砂泥岩之上,断距至少500 m。断层上盘的褶皱大多数表现为轴面倾向NE的不对称褶皱,下盘不对称倒转褶皱也十分发育,指示NE向SW的挤压逆冲。但是,断层上盘局部地段见“Z”型褶皱,指示板昌断层上盘后期曾经发生过(右旋)下滑,与矿床本身的构造变形特征(见后叙)一致,反映出区域上的造山期挤压和后碰撞造山侧向挤压2个主要变形阶段。

NE向断层与NW向断层相伴而生,规模较小,但频繁出现,以 F_2 、 F_{12} 为代表。这组断层以陡倾角,走滑运动为特征,常切割前两组断层。

在这3组断层中,NS向组形成时间最早,NW向和NE向组基本同时生成,均经历了多期变形。

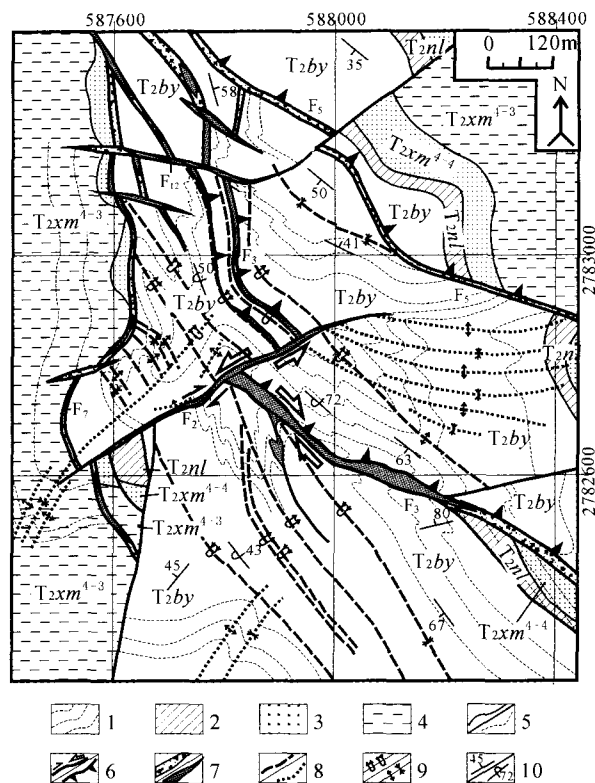


图3 烂泥沟金矿床简要地质图

1—中三叠统边阳组砂岩夹泥岩;2—中三叠统尼罗组泥岩夹瘤状灰岩;3—中三叠统许满组第四段第四层砂岩;4—中三叠统许满组第四段第三层泥岩;5—地质界线/岩层迹线;6—不同期次走滑断层/逆冲断层;7—破碎带/矿体;8—第二期变形轴迹/第三期变形轴迹;9—倒转背、向斜/背、向斜;10—正常/倒转产状

Fig. 3 Schematic geological map of the Lannigou gold deposit in Guizhou

1—Sandstone and mudstone of Bianyang Formation; 2—Mudstone intercalated with nodular limestone of Niluo Formation; 3—Sandstone of Xuman Formation; 4—Mudstone with minor sandstone of Xuman Formation; 5—Geological boundary/bedding traces; 6—Slip/thrust fault; 7—Fracture zone /ore body; 8—Axial trace of 2nd /3rd phase deformation; 9—Overturned/normal anticline and syncline; 10—Normal/overtaken bedding

4 矿床构造解析

矿床位于磺厂沟复式向斜核部(矿床一级褶皱)(图3)。矿体赋存于次级背斜与向斜的过渡地段因强烈挤压拉断而形成的逆冲断层中。

4.1 褶皱构造的解析

大比例尺(1:500~1:1 000)矿床地质填图表明,矿床(二级)褶皱十分发育,形态多样。褶皱要素的系统测量、投影统计表明(图4A),NW向褶皱控制了矿区的总体构造格局,枢纽倾角较缓,轴面以倾向NE30~40°为主;NE向褶皱则干扰此构造格局,枢纽倾角变化较大,5~80°不等,系叠加成因所致,轴面倾角也较陡。

4.1.1 NW向褶皱

矿床NW向褶皱有2种主要的类型,一为大型倒转

复式褶皱,主要发育于磺厂沟向斜的核部附近。二是规模相对较小的斜歪褶皱,主要发育于磺厂沟向斜的两翼。两者形态虽有差异,但没有截然的界线,呈过渡关系,并反映了同一褶皱作用机制下不同构造部位的褶皱形态差异。

(1) 磺厂沟复式向斜—核部强烈倒转大型复式褶皱

磺厂沟向斜(矿床一级褶皱)是一个典型的复式向斜,其内部由几个次一级背、向斜(二级褶皱)组成。统计表明,这些褶皱走向NW,轴面产状30~60°/45~65°,枢纽倾角较缓(图4B)。复式向斜的核部主要为强烈的次级倒转褶皱。

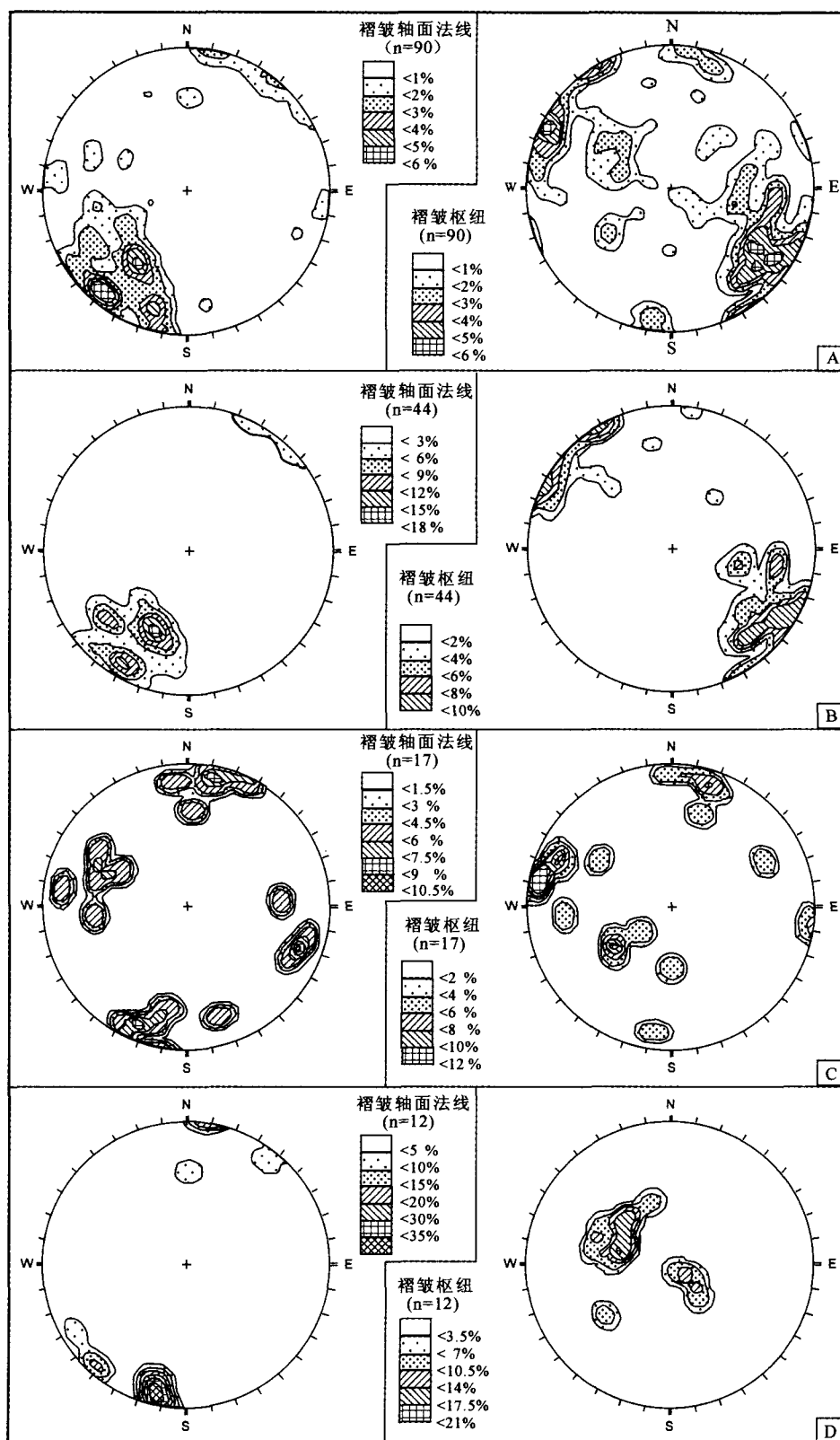


图4 褶皱轴面法线(左)和枢纽(右)优势方位极点等值线图

A—矿区褶皱;B—NW向褶皱;C—NE向褶皱;D—F₃断层两侧牵引褶皱

Fig. 4 Preferred orientation diagram of normal line of axis (left) and hinge (right) of folds

A—Fold in deposit; B—Northwest trending fold; C—Northeast trending fold; D—Drag fold beside F₃

以磺厂沟矿段为例(图5),紧靠 F_3 断层上盘是一个规模较大的(二级)倒转背斜。在730~740 m标高处露天采场,褶皱两翼正常,反映为褶皱核部。但往深部,褶皱核部紧闭,两翼近于平行(图5A)。其倒转翼发育良好,“Z”形小褶皱(三级)十分发育(图5B)。近断层由于受断层错动影响,形成特殊的牵引褶皱(详见后述断层运动学部分)。顺断层走向往南东方向,钻探揭示深部断层上盘还发育一个倒转向斜(图6)。因此, F_3 断层上盘表现为一系列强烈倒转的褶皱构造,两翼十分紧闭。

F_3 断层下盘,地表可见由2个(二级)倒转向斜(图5C)和一个倒转背斜组成,多级次露头尺度的小褶皱发育。以背斜为例,其北东正常翼, F_{20} 即为其从属三级小褶皱发展起来的断层,陡翼近直立(图5D);核部,三级“M”型小褶皱十分发育,使核部往外呈箱状;南西倒转翼,三级“Z”型褶皱发育(图5E),且在“Z”型褶皱的核部,更次级(四级)的“M”型小褶皱也发育良好。因此,在磺厂沟复式向斜至少可以识别出4个级别的褶皱,反映出造山过程中强烈的褶皱作用。

此外,冗半矿段褶皱由翼部到核部,岩层经过递进变形而逐渐透镜体化的特征十分清楚,反映了在强烈的挤压作用下,岩层由褶皱逐渐向断层演变的过程。系统的采样工作表明,挤压褶皱递进变形而形成的构造透镜体矿化程度差,很少达到边界品位,证明挤压阶段并不是成矿阶段。

(2) 冗半西部的水平斜歪褶皱

磺厂沟复式向斜强烈倒转的次级褶皱往西,至赖子山背斜之间,逐渐过渡到一系列平行排列的水平斜歪褶皱。这些褶皱规模小,露头尺度均可清楚地观察到。褶皱形态基本类似,轴面产状 $15\sim 39^\circ\angle 70\sim 79^\circ$,枢纽倾角 $11\sim 32^\circ$ (略受后期叠加褶皱干扰)。两翼不对称,NE翼陡,SW翼缓,反映造山过程中由NE向SW的挤压。

综上所述,NW向褶皱虽然其规模大小不一,形态各异,但其基本特征是相同的,即走向NW,枢纽近水平,轴面倾向NE,共同反映了造山过程中由盆地向台地(即由NE向SW)的挤压。

4.1.2 NE向褶皱

NE向褶皱广泛分布,矿床尺度上的详细测量表明其具有以下特征:

(1) 规模小。相比而言NW向褶皱规模大,往需要填图方能识别,露头尺度的小褶皱往往是寄

生的从属褶皱。而NE向褶皱规模小得多,露头尺度上即可识别。

(2) 野外测量数据统计和投影结果(图4C)表明,这些褶皱走向NE,轴面倾向NW或SE,倾角较大,以近直立为特征。枢纽倾向SW或NE,倾角变化较大,从 $6\sim 67^\circ$ 不等,随NW向主褶皱两翼产状的变化而变化。

(3) 多为简单宽缓状褶皱,不出现复式紧闭或倒转褶皱。与NW向褶皱的多级次和强烈倒转特征有明显区别。

(4) 以叠加褶皱的形式出现,对NW向褶皱进行干扰和改造。但这种改造是局部的,未能改变NW向构造线的总体格局。

上述褶皱构造的解析,清楚地反映了矿区构造的多期活动历史。即早期强烈的挤压,形成复式多级次倒转褶皱。由于持续的挤压,翼部变薄,甚至断裂,形成断层,形成由倒转褶皱→透镜体及揉皱带→断层的递进变形序列。晚期,叠加了一次近于正交的挤压,形成宽缓的简单小褶皱。

4.2 断裂构造的解析

大比例尺的填图表明,矿床断层的分组十分明显,总体上可划分为3组。其中近NS向的断层为同生断层。NW向断层与NW向褶皱相伴而生,规模大,延伸稳定,主要表现为逆冲挤压性质。NE向断层则表现为切割前2组断层,规模小,延伸短,且常在走向上尖灭于褶皱,主要表现为走滑性质。

4.2.1 近NS向长期活动的同生断裂

NS向断层(F_1, F_7)位于碳酸盐岩台地附近,地球物理特征明显。现以 F_7 为例进行构造解析。

(1) 几何学特征

F_7 走向近南北,总体向东倾,但倾角变化较大。在北部老屋脊—高炉一带较陡,物探和钻探资料均反映其直立的断面形态,两侧碳酸盐岩基底位移距离较大,表明 F_7 是在同生断层基础上发育起来的一条断层。但南部冗半—磺厂沟一带倾角却较缓(平均 43°),上盘地层显示出良好的倒转背斜特征。

断层分带清楚。由边部的挠曲→近断层的倒转和平卧褶皱→无根褶皱→断层中心的构造透镜体,构造变形强度增加。断层中心部位砂岩构造透镜体和泥岩劈理化发育,说明 F_7 的挤压性质。上述证据表明盆地挤压造山期间, F_7 由正断反转为逆冲性质。

(2) 运动学特征

图2、图3显示 F_7 断层上盘为新地层边阳组,下



图5 磺厂沟矿段运矿公路露头剖面上反映的褶皱和断层几何样式

1—岩层迹线/地层向新方向; 2—褶皱轴面/断层; 3—局部放大范围; 4—产状; 5—第二期/第三期断层运动方向

图中: A—F₃断层面上盘紧闭倒转背斜(二级); B—F₃断层面上盘大型复式背斜中的次级褶皱(三级); C—F₃断层面上盘紧闭倒转向斜, 注意其左侧岩层的弯曲方向, 指示F₃晚期的下滑运动; D—F₂₀断层及其上盘倒转背斜, 注意其倒转翼岩层近直立并矿化; E—第一级倒转褶皱翼部的次级褶皱(三级), 注意其核部发育更次一级(四级)的褶皱

Fig. 5 Outcrop cross section in the haul road of Huangchanggou ore block, showing styles of folds and faults

1—Bedding trace/younging direction; 2—Axial of fold/fault; 3—Zoom out area; 4—Attitude; 5—Moving directions of 2nd/3rd phase faults

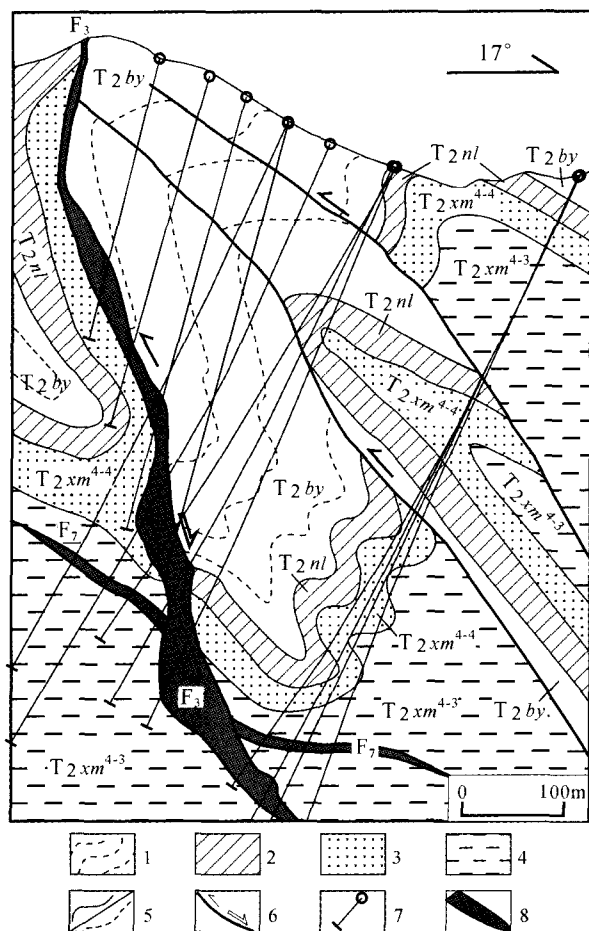


图6 磺厂沟矿段 1880E 勘探线剖面图(据 Norman, 2005^①修改)

1—中三叠统边阳组砂岩夹泥岩;2—中三叠统尼罗组泥岩夹瘤状灰岩;3—中三叠统许满组第四段第四层砂岩;4—中三叠统许满组第四段第三层泥岩;5—地质界线/岩层迹线;6—断层;7—钻孔;
8—矿体

Fig. 6 Cross section of 1880E line in Huangchanggou ore block (modified after Tony Norman, 2005)

1—Bianyang Formation (T_{2by}); 2—Niluo Formation (T_{2nl}); 3—4th bed of 4th Member of Xuman Formation (T_{2xm}^{4-4}); 4—3rd bed of 4th Member of Xuman Formation (T_{2xm}^{4-3}); 5—Geological boundary; 6—Fault; 7—Drill hole; 8—Ore body

盘为老地层许满组,指示断层发生过明显的正断作用。但是,冗半矿段勘探线剖面图却显示断层上盘是一个紧闭倒转的背斜,结合断层中心部位砂岩构造透镜体和泥岩劈理化特征,说明断层发生过逆冲作用。造成这种现象的原因,推测是 F_7 在盆地的裂

陷期断距较大,致使造山期的逆冲作用亦未能补偿其下降的断距。

沿断层走向,还可以发现大量的露头规模的斜卧褶皱。这些斜卧褶皱轴面与枢纽产状均为 $68 \sim 80^\circ \angle 42 \sim 52^\circ$,接近断层产状,指示这些褶皱为地层逆冲之后再发生顺层的剪切而成。

上述分析表明,随着盆地的裂解→闭合→改造, F_7 性质也随之改变,相应地由正断→逆冲→走滑转变。因此, F_7 是一条长期活动的断层,从一个侧面记录了盆地形成→发展→闭合的过程。

(3) 矿化特征

冗半一带的钻探结果反映, F_7 断层在浅部的含矿性不好,往深部 200~300 m 标高有变好的趋势。但与主含矿断裂 F_3 比较,品位低,厚度小。结合断层性质和活动历史分析,可以推断 F_7 主要是一条导矿断层。

4.2.2 NW 向含矿断层

NW 向断层是矿床最发育的断层,也是最主要的赋矿断层。其特点是规模大,走向延伸稳定,与 NW 向褶皱一起控制了矿床的总体构造格架。NW 向断层总体表现为逆冲性质,但许多证据表明逆冲之后有一次显著的右旋-正断运动。现以主含矿断层 F_3 为例进行详细的构造解析。

(1) 几何学特征

F_3 断层为矿床主要控矿断裂,其控制的储量占整个矿床储量的 81%。该断层被 NE 向断层 F_2 切割,分为磺厂沟和冗半 2 部分。带宽一般 5~15 m,最宽处可达 30 m。走向 295° ,总体倾向 NE,倾角 $65 \sim 85^\circ$,靠近 F_2 附近局部反倾(图 5、图 6)。

F_3 断层无论是在地表还是在深部,破碎带特征均十分明显。断层以脆性破裂为主,发育碎裂岩系列断层岩。碎斑(或角砾)成分多为围岩或早期碎裂岩,以强烈硅化和方解石-石英脉充填为特色。基质以泥质为主,结构疏松,并常伴有沥青质。虽然构造透镜体也呈定向平行排列,显示一定的定向组构特点,但这种定向排列是脆性变形机制下的产物。断层中部分夹石保存完好的褶皱形态,结合前述褶皱过程中的透镜体化现象,可以推断断层形成机制为先褶皱后拉断。

① Norman T. 2005. Structural geology of Anbao, Gaolu and Jinfeng mapping and logging procedures. Memos Prepared for Siao Gold Limited. Geocentric Company(Australia)

断层局部地段有分带现象,中心为构造角砾岩带,两侧为透镜体化带和夹石,上、下盘围岩强烈褶皱。

(2) 断层岩显微构造特征

与露头宏观特征相吻合,镜下以大量的无定向组构为主,与整个岩石保持原岩结构构造的特征相吻合,反映矿化阶段为张性环境。仅局部角砾中劈理化发育,微劈石域石英拉长定向排列,局部亚晶化,压溶和弯曲现象明显,说明挤压阶段局部发生了半韧性变形。

(3) 运动学特征

F_3 断层是一条复杂的断层,构造的叠加关系指示断层至少经历过 2 次性质截然不同的运动。

首先, F_3 表现为典型的逆冲性质,其形成与褶皱逆冲有关。 F_3 上下盘均为多级次复式倒转褶皱,指示强烈的挤压和逆冲运动(图 5、图 6)。断层中的巨大夹块常保持早期强烈褶皱的原型,反映强烈的褶皱作用导致断层的逆冲。断层带常见发育良好的构造透镜体,且这些构造透镜体定向排列,ab 面平行断面,a 轴指示上下运动。可见, F_3 主要是褶断成因,逆冲性质。

其次, F_3 形成之后发生过明显的正滑-右旋运动。证据如下:

A. 右旋运动特征

断层的右旋运动主要由矿山地表填图和水平中段坑道编录中揭示的牵引褶皱所体现。

磺厂沟矿段地表露头填图显示, F_3 断层两侧发育大量的直立倾伏或倾竖褶皱。褶皱轴迹线平行断层,投影统计表明轴面近于直立,枢纽倾角较大($50^\circ \sim 70^\circ$)(图 4D),与早期 NE-SW 向挤压形成的褶皱区别极大。早期 NW 向褶皱轴面倾向 NE,但枢纽近水平,与断层的挤压性质相吻合;晚期拖曳褶皱轴面和枢纽均近于直立,与断层的右旋特征相吻合。值得注意的是,这种牵引褶皱仅发育于 F_3 断层两侧 30 m 范围内,远离则无,反映其与断层形成的密切关系。另外,测量结果还显示上述两种褶皱的改造和被改造关系。即愈靠近断层,拖曳褶皱轴面倾角和枢纽倾角愈陡,反映早期的 NW 向褶皱被改造程度愈深。这种变化特征在 640 中段平面图反映也十分清楚(图 7)。

定向薄片镜下还观察到成矿阶段石英-方解石脉中方解石晶体斜列生长,指示晶体生长过程中有右旋剪切运动。

无论是在地表还是水平中段,断层下盘的牵引

褶皱远不如上盘发育,暗示上盘的位移量要大于下盘。此现象与断层的运动学分析相吻合,即上盘相对于 F_2 而言是引张,下盘则相反,为挤压。

B. 正滑运动特征

在勘探线剖面图上,还可以从地层的错移直观地判读出断层的下滑分量(图 6)。但是这种正滑运动与整个剖面反映出的构造样式是矛盾的,也与断层带中大量的挤压构造透镜体不吻合。由于没有证据表明 F_3 是一条同生正断层,因此断层的正滑性质极可能是挤压运动之后叠加变形的结果。

这可以从一些细微的构造变形特征中得到印证。如 F_3 断层下盘的挤压褶皱中,局部转折端呈棱角状,轴面向西反倾,与主褶皱极不协调的,反映在主要的褶皱作用之后,又叠加了一次下滑的运动,从而改变了早期从属小褶皱的特征。不过这种后期叠加运动未能改变早期挤压的主构造,因此主褶皱仍保留早期挤压的主要特征。另外,图 5C 中倒转向斜紧贴 F_3 断层的倒转翼部呈明显的张开状,亦表明挤压同斜褶皱形成之后一次明显的下滑运动,导致其倒转翼呈现张开的性质。这种反映后期下滑特征的小构造经常可见。

综上所述, F_3 在后期的叠加变形中,即有走滑的分量,也有下滑的分量,实质上是断层的右旋-正断作用在平面和剖面的不同反映。

4.2.3 NE 向含矿断层

相比 NW 向断层而言,NE 向断层规模小,走向延伸短,断面陡立。总体上以挤压和走滑性质为主,现以矿区主要的含矿断层 F_2 为例说明。

(1) 几何学特征

F_2 总体倾向南东,倾角 $65^\circ \sim 85^\circ$,地表局部反倾北西($330^\circ \sim 342^\circ$)。破碎带宽度沿走向变化较大,与 F_3 交汇部位膨大,宽达十几米,构造透镜体、碎裂岩、局部糜棱岩发育,矿化蚀变十分强烈。往两端破碎带变窄,仅 1~2 m,甚至闭合呈线状,蚀变矿化明显减弱。部分地段呈尖灭再现状,中间地段由褶皱变形来抵消断层滑移的距离。

(2) 显微构造特征

同 F_3 类似,断层岩主要以碎裂岩系列为主,出现大量断层角砾岩和碎裂岩。但也有少量的表现为韧性变形特征。如在含沥青质泥质较多的地段,常有糜棱岩出现,发育流状构造和定向组构。残斑以强烈硅化的砂岩为主,基质以沥青质、碳质和泥质为主,流状构造极为发育。不过,值得注意的是,组成

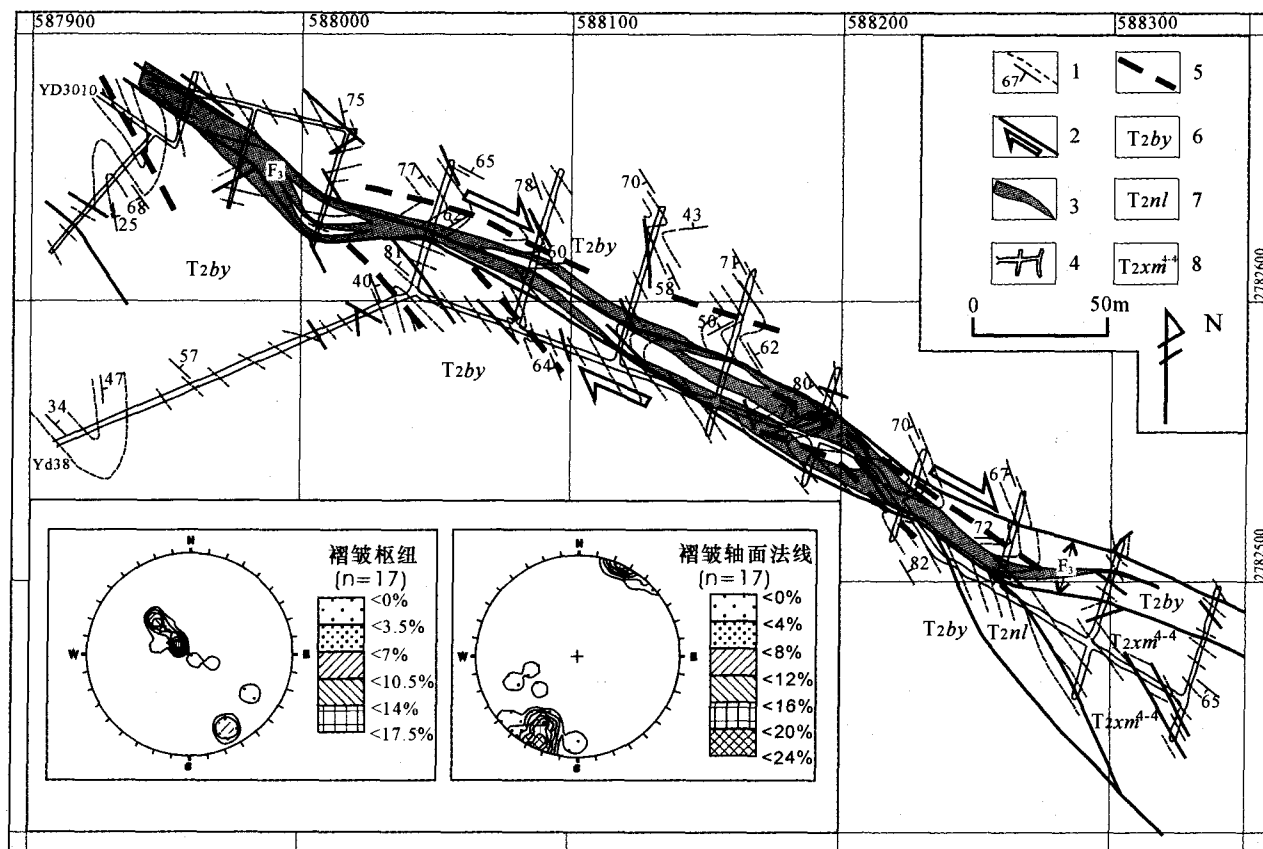


图7 磺厂沟矿段640m中段平面图中F₃两侧的牵引褶皱指示断层的右旋走滑分量(据贵州地质矿产局117地质队资料修改)

左下图为F₃断层两侧牵引褶皱枢纽(左)和轴面法线(右)优势方位极点等值线图

1—岩层迹线及产状;2—断层;3—矿体;4—坑道;5—褶皱迹线;6—中三叠统边阳组;7—中三叠统尼罗组;8—中三叠统许满组第四段第四层

Fig. 7 Adit plan map at 640 m level, showing the dextral slipping of F₃(after No. 117 Geology Party of Guizhou BGM)

1—Bedding trace and attitude;2—Fault;3—Ore body;4—Adit;5—Axial trace;6—Middle Triassic Bianyang Formation;7—Middle Triassic Niluo Formation;8—4th layer of 4th Member of Middle Triassic Xuman Formation

残斑的岩石为强烈硅化的岩石,反映该次剪切作用之前已有强烈的热液蚀变作用。根据矿床成矿热液蚀变作用的分析,强烈硅化发生在主成矿期;另外,F₂主成矿期是左旋滑动,与显微构造的右旋剪切相矛盾,因此,韧性剪切应该发生在成矿作用之后。发生韧性剪切的原因与岩石中含大量沥青质和泥质有关。

(3) 运动学特征

在图3中根据F₃以及地层的错动关系,可以很明显地判别F₂右旋走滑。同时,断层带内存在的拖曳无根倾竖褶皱,根据其关系也可判别断层右旋走滑。F₂的右旋走滑可解释为当F₃由NE向SW逆冲时,由于西部的赖子山背斜为强刚性体,不易变形,应力分解的结果导致NE向右旋剪切带

的发育。F₃的逆冲与F₂的右旋剪切是造山期间同一构造应力场下的产物。

前述F₃逆冲运动之后发生过右旋-正滑运动,F₂也应该在右旋之后再左旋运动。这从F₂的轻微“S”弯曲形态、F₂与F₃交汇部位断层带及矿体的膨大可以大致判断。因此,F₂与F₃成矿期右旋下滑相配套的左旋运动是存在的,并对成矿起主要的控制作用。

4.2.4 近水平断层

除了前述3组断层之外,矿区范围内还存在少量的断面近水平的小断层。这些断层总的几何特点是断面近水平并波状起伏。断层带狭窄,大部分呈线状,断层岩不发育。断层延伸不远,常尖灭于陡立的岩层面上,类似于断坪-断坡的几何样式。断层切割前述断层和褶皱,但断距不大,一般10~20 m。

根据标志层的错动方向、断层上盘岩层的弯曲方向、倒向一致的不对称小褶皱和断层带的张裂形态等特征,可判别断层的运动学特征主要表现为由NE向SW的逆冲。

虽然近水平断层与造山期形成的NW向断层运动学性质一致,均表现为由NE向SW的逆冲。但该期断层以规模很小,倾角近水平明显区别F₃型的陡倾角断层,并同时切割早期断层。因此,近水平小断层代表了最晚期的一次构造运动。

5 构造变形和构造演化分析

5.1 构造变形特点

上述构造解析表明,作为右江造山带的一部分,烂泥沟金矿床构造变形特征具有造山带的普遍特点,具体表现在以下几方面:

(1) 构造样式总体表现为褶皱-断层组合,具褶皱断带的一般特点。断褶的强度,由盆地向台盆的边缘逐渐增强;

(2) 褶皱作用,以区域尺度的、倾向盆地的强烈水平斜歪-倒转-翻卷大型复式褶皱为主,叠加露头尺度的小型简单直立褶皱。其中区域尺度的大型复式褶皱代表了右江盆地造山期褶皱的一般特点,即紧闭的大型线状褶皱;

(3) 断裂作用,以平行复式褶皱轴迹的大型逆冲断层为主,辅以与之直交的配套走滑断层。大型含矿断层经历了复杂的构造运动,早期为与大型复式褶皱相伴形成的逆冲断层,晚期为与叠加褶皱相伴的右旋-正断层。成矿与右旋-正断裂作用有关。

上述变形特点表明,右江盆地印支期末挤压造山,形成本区NW向的强烈褶断带。随着印支运动的结束以及燕山旋回的开始,矿区构造变形场发生了改变,NW向的构造格局被NE向的构造所改造。两者在几何上有明显的斜跨叠加关系,在区域构造背景方面则反映出分别属于不同的构造变形期,前者与印支挤压造山运动有关,后者则与印支-燕山构造转换期的后碰撞造山侧向挤压有关。

5.2 成矿构造演化分析

通过前述对矿区、矿床构造的详细解析,结合右江盆地的大地构造属性和演化史,可以得出烂泥沟金矿区构造变形主要经历了同生期裂陷、造山期挤压、后碰撞造山侧向挤压和岩石圈伸展等4个阶段,并与右江盆地的裂陷-闭合-坍塌的发展演化历史相吻合。其构造演化史为(表1、图8):右江盆地裂陷期间(D₂-T₂)形成台地四周一系列倾向盆地的同生正断层,在本矿区具体表现为一系列走向近NS,倾向东的同生断层,如F₁、F₇等,为后续的构造活动提供了最初的构造薄弱面。造山期挤压期间(T₃)由于受近NS向长椭圆形赖子山台地(砥柱)的影响,挤压方向由E→W逐渐转为NE→SW,形成了矿区最为明显的近NS向和NW向构造线,即强烈的倒转褶皱和逆冲断层(如F₃)组成的褶-断构造组合,以及配套的NE向右旋剪切断层(如F₂)。此过程是一个递进的构造变形过程,因此NW向倒转褶皱常发生轻微的翻转。后碰撞造山侧向挤压期间(J₁)由于近NS(或偏NW)向的挤压,一方面使造山期形成的褶皱发生重褶,形成走向NE的叠加褶皱,枢纽倾向随早期褶皱的层理变化而变化;另一方面随着构造应力

表1 烂泥沟金矿床构造演化一览表

Table 1 Structural evolution of the Jinfeng (Lannigou) gold deposit

构造期次	地质年代	褶皱作用	断裂作用	矿区主应力方向	成矿作用	构造演化阶段
D4	J ₂ -K	不发育,以扭折为主	倾向盆地的近水平小规模逆断层。偏碱性岩浆活动	NE-SW向挤压	无	岩石圈伸展
D3	J ₁	走向垂直台-盆边界的直立褶皱,以露头尺度的小型简单褶皱为主,叠加在D2期褶皱之上	D2期断层的复合,右旋-正断层或左旋走滑。区域上形成大型逆冲推覆构造	NW-SE向挤压	大规模成矿	后碰撞造山侧向挤压
D2	T ₃	倾向盆地的强烈水平斜歪-倒转-翻卷褶皱,以区域尺度的大型复式褶皱为主	倾向盆地的大型低-中等角度的逆冲断层,以及与之配套的高角度右旋走滑-正断层(转换断层)	NE-SW向挤压	弱成矿(?)或无矿化	造山挤压
D1	D ₂ -T ₂	不发育	倾向盆地的高角度同生正断层(台地边缘断层)	EW向拉张	无	盆地裂陷

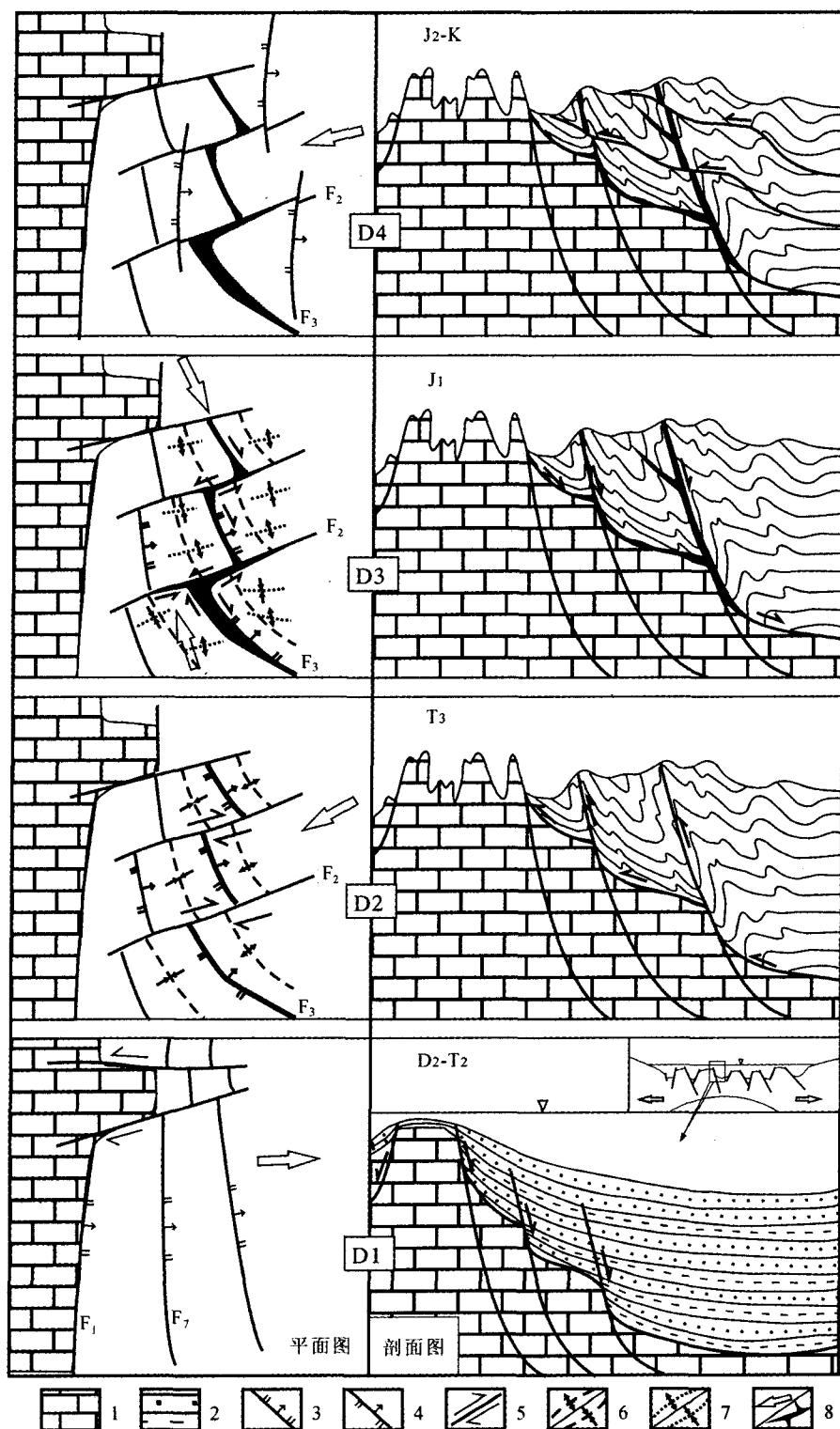


图 8 烂泥沟金矿构造演化阶段和发展史

1—灰岩；2—砂泥岩；3—正断层；4—逆断层；5—走滑断层；6—D2 期背斜/向斜；7—D3 期背斜/向斜；8—应力方向/矿体

Fig. 8 Structure evolutionary stages and history of the Jinfeng gold deposit

1—Limestone; 2—Sandstone and mudstone; 3—Normal fault; 4—Reverse fault; 5—Slip fault; 6—D2 phase anticline/syncline; 7—D3 phase anticline/syncline; 8—Stress direction/ore body

在造山期形成的 F_2 - F_3 近“X”型断裂系上的分配,形成近 NS 向的挤压区和近 EW 向的拉张区。由于西部为赖子山砥柱,故主要向东拉张,导致 F_3 的右旋-正滑运动和 F_2 的左旋走滑,矿液沿着拉张的空间沉淀就位。此后,燕山期(J_2 -K)岩石圈伸展,形成小规模近水平逆断层,轻微地错断了前期的构造。构造解析表明,成矿发生在后碰撞造山侧向挤压期间(J_1),与笔者最近获得的主要载金矿物含砷黄铁矿 Re-Os 测年结果相吻合(陈懋弘等,2007)。这还可以从区域构造解析中得到证明。本矿床位于黔西南大型多层次席状逆冲推覆构造前锋带南东约 18 km 处。该逆冲推覆构造的逆冲方向为 SE 方向,而成矿期 NE 走向褶皱的主压应力方向也是 SE 方向,两者的主应力方向是吻合的。同时,两者都叠加在造山期主构造之上,是印支造山运动之后最强烈的一次构造变形,反映两者是同一构造事件的产物。由于贞丰白层一带的偏碱性超基性岩侵入到逆冲推覆构造的上、下盘中(索书田等,1993),可以反证成矿作用发生在燕山晚期(约 80~60 Ma)超基性岩浆活动之前。而燕山晚期超基性岩浆活动与岩石圈伸展有关。因此,成矿应该发生在岩石圈伸展之前,是后碰撞造山期间(J_1)的产物。

6 构造的控矿作用

构造作用在烂泥沟金矿成矿过程中起着十分明显的控制作用。大体而言,该矿床与滇黔桂“金三角”其他卡林型金矿类似,台地边缘的同生断层是主要的导矿构造,其旁侧的次级断层是有利的容矿构造,成矿对地层层位没有选择性,仅对断层切割的不同层位的砂岩夹泥岩等有利岩性组合进行选择交代成矿。

就烂泥沟金矿而言,在具备成矿物质来源和有利岩性组合的基础上,下述构造作用是超大型矿床形成的关键。

(1) 造山期逆冲作用形成的构造闭圈是成矿元素得以大量聚集的重要因素之一

这里所说的构造闭圈,是泛指能起阻挡作用的有利构造组合。

从图 2、图 6 等可以看出,冗半—磺厂沟总体上为一向斜,其东北为 F_5 逆冲断层和林坛背斜组成的褶断构造。 F_5 是一条缓—中等角度的逆断层,宽达 3~5 m,由压性构造角砾岩组成。角砾粒度较小(几毫米至几厘米),砾间为大量的泥质充填物,含量多,高达

30%~50%。后期的伸展阶段对其影响不大。这种断层岩不利于流体的流动。由于 F_5 的逆冲作用,其上盘 T_2xm^{4-3} 泥岩上冲,呈盖帽状覆于下盘的边阳组之上。 T_2xm^{4-3} 泥岩是一套层理不清的块状岩层,在构造变形过程中以塑性变形为主,不易发生脆性破裂,也起重要的阻挡层作用。因此, F_5 及其上盘 T_2xm^{4-3} 泥岩组成的褶-断构造共同形成一个良好的构造闭圈,致使矿液主要沉淀在 F_5 下盘所限的有利构造中。

露头尺度的钻孔岩芯上,也可以看到这种构造闭圈的作用,如当砂岩与泥岩互层时,构造变形时泥岩能干性弱,不易碎裂,形成构造闭圈,热液优先选择在两者的边界及砂岩顶部活动,并发生蚀变和金属矿物的沉淀及石英脉的充填。

(2) 后碰撞造山期间由挤压向伸展转变的过程中形成的张性构造环境是矿质沉淀的主要控制因素

F_3 在造山期主要表现为逆冲挤压性质。后碰撞造山侧向挤压期间, F_3 发生右旋-正滑运动,导致 F_3 断裂本身及其与 F_2 的接合部位拉张,形成良好的减压扩容空间,往南东则很快尖灭闭合(图 8)。正是这一机制,才导致单一 F_3 矿体走向上长仅 550 m,但深部延伸已达 1 000 m 尚未封闭。另一实例是 F_{20} 及其上盘背斜陡立翼也含矿。正常挤压情况下,纵弯褶皱作用下形成的倒转背斜两翼为挤压面,不存在容矿的空间。但若叠加一个晚期的正滑运动,直立翼则被拉张,形成赋矿构造(图 5D)。

由于成矿期的张性环境,在含矿断裂带中,既可以看见早期的压性砂岩透镜体成矿,也可以发现许多巨大团块和揉皱体含矿,这些特征与那些不含矿的压性断层有明显差异。矿区系统的采样工作表明,挤压褶皱递进变形而形成的断层岩及其构造透镜体矿化程度差,很少达到边界品位。这证明,挤压阶段并不是成矿阶段。当然,早期断层的形成,为后期的构造活动提供了一个构造薄弱面,这也是非常重要的,但另当别论。

露头尺度的钻孔岩芯上,也常常有大量的张性成矿的特征。如 HDDS137A 钻孔中,富矿体(品位达 20×10^{-6} ~ 60×10^{-6})中可见含砷黄铁矿沿“X”型张性裂隙富集,形成明显网格条带状构造。另外 HDDS0150 钻孔也显示挤压破碎带狭窄,仅 10~30 cm,矿化较差。而断层上下盘中张裂隙发育,岩石完整,有大量细粒浸染状含砷黄铁矿分布,矿化好。

(3) 配套断裂构造对主构造的切割是矿体定位的主要场所

烂泥沟金矿矿体形态很大的一个特点是,两组不同方向断裂的交接部位矿体厚大,品位富。如平面上NE向断层切割NW向的构造部位,典型的如 F_3 - F_2 交切,形成长仅100 m,但延伸大于200 m,厚达40~60 m的富矿体,呈楔状沿 F_2 与 F_3 交切线斜向延伸侧伏。剖面上不同倾角的断层交切部位,典型的如 F_3 - F_{20} (深部为 F_7)交切,两者的交切部位厚度大,品位高,是深部矿体中的主要富矿地段。

因此,尽管一些配套的断层规模不大,地表含矿性不太好,但由于其切割了主构造,有利于矿液的流通,其与主构造的交接部位常成为主要的赋矿部位,是矿区外围成矿预测和寻找深部盲矿的有利靶区。

有利的构造闭圈,张性的构造充填环境,不同方向构造的交切,是烂泥沟金矿最终得以形成超大型矿床的主要构造控制因素。

7 结 论

(1) 烂泥沟金矿区构造线主要为分近NS向、NW向和NE向3组,其中造山期间形成的NW向褶皱和逆冲断层控制了矿区的构造格架。NW的含矿主断层 F_3 在造山期间表现为逆冲性质,在后碰撞造山侧向挤压期间为右旋-正滑性质。

(2) 烂泥沟金矿构造变形主要经历了同生期裂陷、造山期挤压、后碰撞造山侧向挤压和岩石圈伸展等4个阶段,并与右江盆地的裂陷-闭合-坍塌的发展演化历史相吻合。盆地裂陷期间(D_2 - T_2)形成的同生断层为后继的构造活动提供了最初的构造薄弱面,并成为主要的热液通道。造山挤压期间(T_3)形成的NW向构造线(褶-断构造组合)奠定了矿区构造格局。后碰撞造山期间(J_1)的侧向挤压使造山期形成的褶皱发生重褶,形成叠加褶皱,并使断层重新活动,导致 F_3 的右旋-正滑运动,矿液沿着拉张的空间沉淀就位。

(3) 构造解析结合测年资料证明成矿发生在由挤压向拉张过渡的构造体制转换阶段。造山期逆冲作用形成的构造闭圈和后碰撞造山侧向挤压期间形成的张性构造环境是矿质得以大量聚集、沉淀的主要控制因素。

(4) 烂泥沟金矿目前的找矿实践已证明其成矿深度已达1 000 m,且尚未封闭,与美国卡林型金矿近年的找矿新进展(矿体垂向延深最大超过750 m)有相似之处。构造成矿作用是其单一矿体垂向延深

大于1 000 m的主要因素。构造成矿的观点将为中国滇黔桂“金三角”卡林型金矿的深部找矿提供重要的理论依据。

致 谢 感谢 Sino Gold Mining Ltd 准许利用资料并提供工作经费。野外工作期间,得到了贵州锦丰矿业有限公司苏平、方策、陈文斌、宋正刚、谢斌先生及其他员工的大力支持,谨致谢忱!

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 1985. Regional geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region[M]. Beijing: Geol. Pub. House(in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Mao J W, Qu W J, Wu L L, Phillip J U, Tony N, Zheng J M and Qin Y Z. 2007. Re-Os dating of pyrites in Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China and its geological significance[J]. Geol. Rev., 53(3): 371~382(in Chinese with English abstract).
- Chen W, Zhang F S, Qian H D and Hu Y. 1995. Tectonogenetic mineralogy of stibnite from Lannigou gold deposit, Guizhou Province[J]. Geol. J. Univ., 1(1): 93~96(in Chinese with English abstract).
- Han Z J, Wang Y G, Feng J Z, Chen T J and Liu Y H. 1999. Geology and exploration of sedimentary-rock-hosted disseminated gold deposits in southern Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Sci. & Techn. Pub. House(in Chinese with English summary).
- Hu R Z, Su W C, Bi X W and Li Z Q. 1995. A possible evolution way of ore-forming hydrothermal fluid for the Carlin-type gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guanxi triangle area[J]. Acta Mineralogica Sinica, 15(2): 144~149(in Chinese with English abstract).
- Huang J Q. 1980. The geotectonic evolution of China[M]. Beijing: Science Press. 25~160(in Chinese with English abstract).
- Li C Y. 1995. Some aspects of understanding of the Carlin-type gold deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica, 15(2): 132~137(in Chinese with English abstract).
- Liu H Z, Zhong Z Y and Yao M. 1986. Preliminary study of Youjiang rift zone[J]. J. Guilin College of Geol., 6(1): 9~19(in Chinese with English abstract).
- Luo X H. 1993. The features of F_3 fault controlling gold deposit and the study of mechanism of tectonic mineralization in Lannigou gold ore-field[J]. Geology of Guizhou, 10(1): 26~34(in Chinese with English abstract).
- Su W C, Yang K Y, Hu R Z and Chen F. 1998. Fluid inclusion chronological study of the Carlin-type gold deposits in southwestern China: As exemplified by the Lannigou gold deposit, Guizhou Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 18(3): 359~362(in Chinese with English abstract).
- Suo S T, Hou G J, Zhang M F and Wang K. 1993. The large Panjiang

- river multi-level sheeted thrust-nappe structure in southwestern Guizhou[J]. Regional Geology of China, 3: 239~247(in Chinese with English abstract).
- Wang Y G, Suo S T and Zhang M F. 1994. Stucture and Carlin type gold deposit in southwestern Guizhou[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1~86(in Chinese with English abstract).
- Wu G Y, Ma L, Zhong D L, Wu H R, Ji J Q, Kuang G D and Xu K D. 2001. Indosinian Turkic-type orogen bordering Yunnan and Guangxi: With reference to coupled basin evolution[J]. Petroleum Geology & Experiment, 23(1): 8~18(in Chinese with English abstract).
- Wu H R. 2003. Discussion on tectonic palaeogeography of Nanpanjiang sea in the late Palaeozoic and Triassic[J]. J. Paleogeography, 5(1): 63~76(in Chinese with English abstract).
- Wu J and Li S T. 1992. Paleoflow directions and paleoslope inclinations of middle Triassic turbidite in Guangxi, China[J]. Geol. Guangxi, 5(4): 15~24(in Chinese with English abstract).
- Wu J, Li S T and Wang S. 1993. Sedimentology of the middle Triassic gold-bearing turbidite series in the northwestern Guangxi Zhuang Autonomous Region, China [J]. Geoscience-Journal of Graduate School, China University of Geosciences, 7(2): 127~137(in Chinese with English abstract).
- Wu X Q. 1992. Study on the occurrence of gold and its specific technological property in Lannigou gold mine[J]. Gold Journal, 13(6): 11~16(in Chinese with English abstract).
- Zeng Y F, Liu W J, Chen H D, Zheng R C, Zhang J Q, Li X Q and Jiang T C. 1995. Evolution of sedimentation and tectonics of the Youjiang composite basin, south China[J]. Acta Geologica Sinica, 69(2): 113~124(in Chinese with English abstract).
- Zhang X C. 1997. The Geology and hydrothermal evolution of sediment-hosted gold deposits in southwestern Guizhou Province, PRC[D]. Supervisor: Christopher H. London: Department of Geology, Royal School of Mines Imperial College. 80~210.
- Zhang F and Yang K Y. 1992. Metallogenic geochronology for the micro-grain disseminated gold deposits in southwestern Guizhou Province [J]. Chinese Science Bulletin. 27(17): 1593~1595(in Chinese).
- Zhang J Q and Jiang T C. 1994. Sedimentary characteristics of Triassic back-arc basin of Youjiang and its evolution[J]. Geol. Guangxi, 7(2): 1~14(in Chinese with English abstract).
- 同位素测年及地质意义[J]. 地质论评, 53(3): 371~382.
- 陈武, 张富生, 钱汉东, 胡勇. 1995. 贵州烂泥沟金矿床中辉锑矿的构造成因矿物学初析[J]. 高校地质学报, 1(1): 93~96.
- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 韩至钧, 王砚耕, 冯济舟, 陈潭钧, 刘远辉. 1999. 黔西南金矿地质与勘探[M]. 贵阳: 贵州科技出版社.
- 胡瑞忠, 苏文超, 毕献武, 李泽琴. 1995. 滇黔桂三角区微细浸染型金矿床成矿热液一种可能的演化途径: 年代学证据[J]. 矿物学报, 15(2): 144~149.
- 黄汲清. 1980. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社. 25~160.
- 李朝阳. 1995. 有关卡林型金矿的几点认识[J]. 矿物学报, 15(2): 132~137.
- 柳淮之, 钟自云, 姚明. 1986. 右江裂谷初探[J]. 桂林冶金地质学院学报, 6(1): 9~19.
- 罗孝恒. 1993. 烂泥沟金矿区 F_3 控矿断裂特征及构造成矿作用机理探讨[J]. 贵州地质, 10(1): 26~34.
- 苏文超, 杨科佑, 胡瑞忠, 陈丰. 1998. 中国西南部卡林型金矿床流体包裹体年代学研究——贵州烂泥沟大型卡林型金矿床为例[J]. 矿物学报, 18(3): 359~362.
- 索书田, 侯光久, 张明发, 王琨. 1993. 黔西南盘江大型多层次席状逆冲-推覆构造[J]. 中国区域地质, 3: 239~247.
- 王砚耕, 索书田, 张明发. 1994. 黔西南构造与卡林型金矿[M]. 北京: 地质出版社. 1~86.
- 吴根耀, 马力, 钟大赉, 吴浩若, 季建清, 邱国教, 徐克定. 2001. 滇桂交界区印支期增生弧型造山带: 兼论与造山作用耦合的盆地演化[J]. 石油实验地质, 23(1): 8~18.
- 吴浩若. 2003. 晚古生代—三叠纪南盘江海的构造古地理问题[J]. 古地理论, 5(1): 63~76.
- 吴江, 李思田. 1992. 广西中三叠统浊流流向及坡向[J]. 广西地质, 5(4): 15~24.
- 吴江, 李思田, 王山. 1993. 桂西北区中三叠统含金浊积岩系沉积学[J]. 现代地质, 7(2): 127~137.
- 吴秀群. 1992. 烂泥沟金矿金赋存状态及工艺特性研究[J]. 黄金, 13(6): 11~16.
- 曾允孚, 刘文均, 陈洪德, 郑荣才, 张锦泉, 李孝全, 蒋廷操. 1995. 华南右江复合盆地的沉积构造演化[J]. 地质学报, 69(2): 113~124.
- 张峰, 杨科佑. 1992. 黔西南微细浸染金矿裂变径迹成矿时代研究[J]. 科学通报, 27(17): 1593~1595.
- 张锦泉, 蒋廷操. 1994. 右江三叠纪弧后盆地沉积特征及盆地演化[J]. 广西地质, 7(2): 1~14.

附中文参考文献

陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 吴六灵, Phillip J U, Tony N, 郑建民, 秦运忠. 2007. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re-Os