



滇西北羊拉铜矿床构造体系及其控岩控矿作用

李 波¹, 王新富¹, 岳 言¹, 黄智龙², 唐 果^{1,3}, 刘月东⁴, 邹国富³, 向佐朋¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

3. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院有限公司, 昆明 650051;

4. 云南迪庆矿业开发有限责任公司, 香格里拉 674400)

摘 要: 羊拉铜矿床是我国西南“三江”多金属成矿域内矽卡岩-斑岩型矿床的典型代表, 为滇西北金沙江缝合带中生代构造-岩浆-成矿事件的产物。该矿床构造发育, 形成了一套褶皱-断层控岩控矿体系。本文运用矿田地质力学方法对羊拉铜矿床构造形迹的几何学、运动学和力学性质进行解析, 建立羊拉铜矿床的构造体系及其控岩控矿模式。结果表明: 自海西期→印支期→燕山期→喜马拉雅期, 羊拉铜矿床主压应力经历了东西向→北西向→北南向→(北东向→近东西向)的转变, 依次形成了早南北构造带、北东构造带(早-晚)、(北西构造带和晚南北构造带)。早南北构造带为羊拉铜矿床控岩控矿构造的基础, 早北东构造带为控制矽卡岩-斑岩成矿系统的主导构造, 晚北东构造带、北西构造带和晚南北构造带为破岩破矿构造。根据构造体系及其控岩控矿作用, 认为羊拉铜矿床构造控岩控矿模式为海西期“层间断裂”+印支期“侵入接触构造”+燕山期“λ字型构造”+喜马拉雅期“阶梯状构造”。

关键词: 构造体系; 控岩控矿构造; 构造控矿模式; 羊拉铜矿床; 滇西北

文章编号: 1004-0609(2021)-09-2596-16

中图分类号: P613

文献标志码: A

引文格式: 李 波, 王新富, 岳 言, 等. 滇西北羊拉铜矿床构造体系及其控岩控矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(9): 2596-2611. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39775

LI Bo, WANG Xin-fu, YUE Yan, et al. Ore-field structural system and its mechanism of rock-and ore-controlling processes of Yangla Cu deposit in northwest Yunnan, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(9): 2596-2611. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39775

羊拉铜矿床位于西南“三江”多金属成矿域中咱-中甸板块和昌都-思茅板块之间的金沙江缝合带中部, 含铜平均品位约 1%, 远景铜资源储量达 1.5×10^6 t^[1-2]。羊拉铜矿床自 20 世纪 60 年代发现以来, 多家生产和科研单位对其开展了地质勘查和相关科研工作, 认为羊拉铜矿床为明显受构造控制, 且与花岗岩有关的矽卡岩型矿床^[3-5], 其成岩成矿作用与构造关系密切, 构造控制着岩体的侵位、空间展布特征和矿体的空间就位以及产出形态特征^[6-8]。前人虽对该矿床构造进行了初步分析^[7, 9-11], 但在

矿床构造解析、构造体系及构造控岩控矿模式研究方面仍显薄弱, 制约了该矿床的找矿勘查及相关研究工作。因此, 对羊拉铜矿床开展系统的构造解析, 厘定和建立该矿床构造体系、完善构造控岩控矿模式显得尤为重要。基于此, 本文以羊拉铜矿床褶皱和断裂构造为研究对象, 运用矿田构造调查工作指南^[12]及矿田地质力学方法^[13], 对其几何学、运动学、力学性质进行精细解析, 进而厘定和建立矿床构造体系, 探讨构造控岩控矿作用及其模式, 为该矿床的矿产勘查及找矿预测提供理论依据。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41862007, 41402072); 云南省万人计划青年拔尖人才项目(YNWR-QNBJ-2018-093); 昆明理工大学重点学科建设项目(14078384)

收稿日期: 2020-09-23; **修订日期:** 2021-01-10

通信作者: 李 波, 教授, 博士; 电话: 15987187981; E-mail: libo8105@qq.com

1 地质概况

西南“三江”多金属成矿域是指怒江、澜沧江和金沙江并流地区, 隶属全球特提斯-喜马拉雅构造域东段, 地处冈瓦纳古陆与欧亚古陆碰撞结合带^[14-15]。区内发育多条近南北向的缝合带, 包括甘孜-理塘缝合带、金沙江缝合带、澜沧江-昌宁-孟连缝合带、怒江缝合带等^[16](见图 1(a)), 记录着特提斯洋的形成、演化及闭合消亡^[15], 具优越的成矿地质条件, 产出多个大型斑岩-矽卡岩型 Cu-Au-Mo-Pb-Zn 矿床^[3, 17-18]。区域上, 金沙江缝合带位于“三江”地区中部, 为一北北西-近南北向的狭长地带, 东侧以里甫-日雨断裂为界, 西侧与江达-维西火山弧相邻^[16], 其形成和演化与金沙江

洋有关。金沙江洋作为古特提斯洋的重要分支, 经历了 4 个演化阶段: 晚泥盆世-早石炭世, 伴随昌都-思茅微板块从扬子地块西南缘裂解而形成; 晚石炭世-早二叠世的洋盆扩张; 二叠纪的俯冲消减; 三叠纪的碰撞造山作用^[19]及喜马拉雅期的伸展-走滑作用^[20]。金沙江洋的演化使得带内断裂构造-岩浆活动强烈, 发育字嘎寺-德钦断裂、甲午雪山断裂、羊拉断裂、金沙江断裂、里甫-日雨断裂以及贝吾组玄武岩、加仁花岗质岩体等, 特殊的构造环境及多期次大规模岩浆活动, 造就了十分有利的成矿地质条件^[16]。

羊拉铜矿床出露地层岩性主要为志留系变质石英砂岩、片岩夹大理岩, 泥盆系大理岩、变质石英砂岩、绢云砂质板岩, 以及石炭系贝吾组玄武岩; 有利赋矿地层主要为泥盆统江边组和里农组, 赋矿

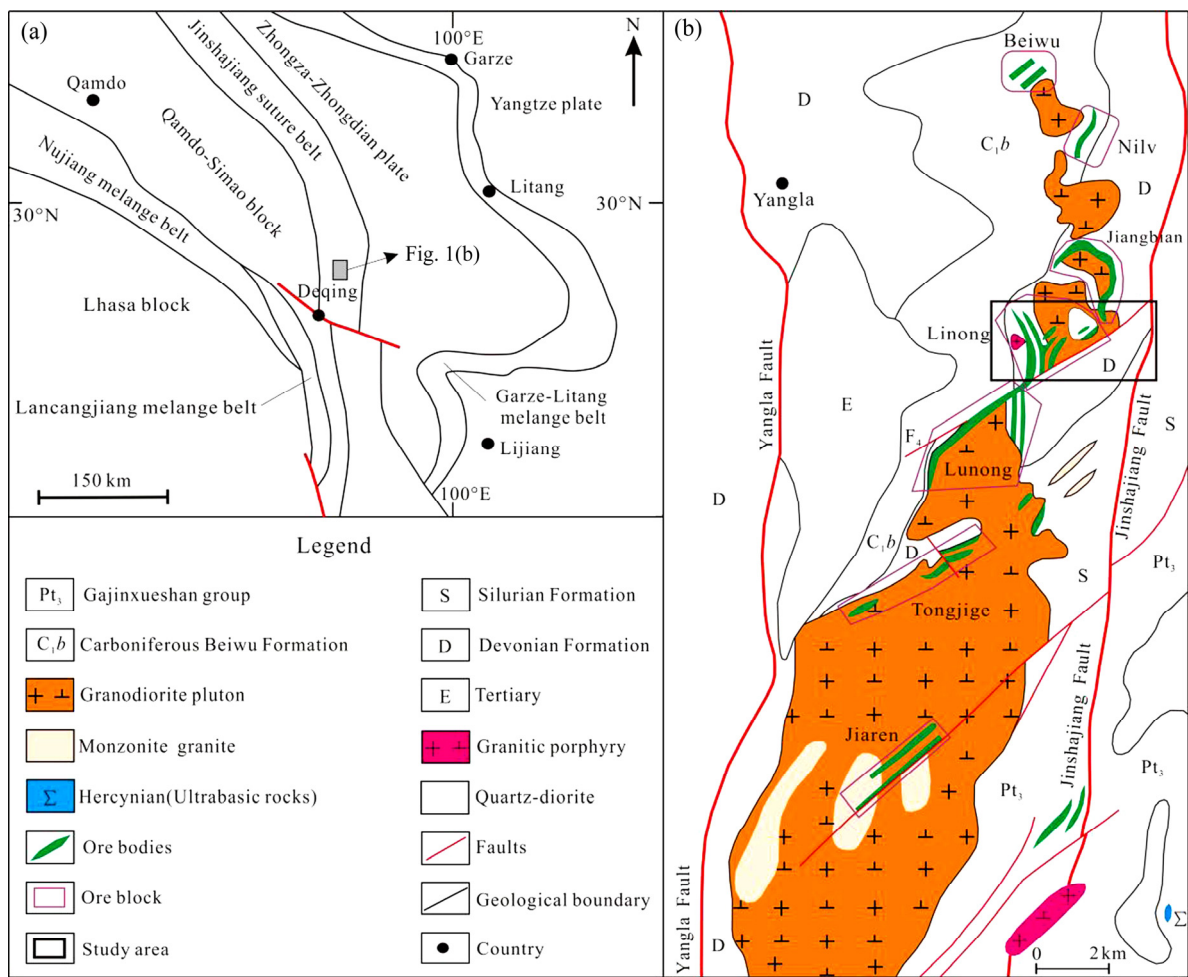


图 1 西南“三江”地区大地构造位置简图(据文献[4])和羊拉铜矿床地质简图(据文献[7])

Fig. 1 Geotectonic framework map of Sanjiang region (SW China), showing major geological terranes and suture zones (modified from Ref. [4])(a), geologic map of Yangla Cu deposit showing distribution of major ore-related intrusion, faults, ore block and ore bodies (modified from Ref. [7])(b)

岩性以透辉石砂卡岩、石榴石砂卡岩为主, 次为大理岩、变质石英砂岩、绢云砂质板岩、花岗闪长岩、石英二长斑岩及花岗斑岩(见图 1(b))。

羊拉铜矿床构造甚为发育, 除金沙江、羊拉深大断裂外, 还发育轴向近南北向的里农背斜和江边的向斜, 以及北东向的 F_4 断裂和大量层间破碎带及次级构造裂隙(见图 1(b))。

羊拉铜矿床内喷出岩、侵入岩、脉岩均有出露(见图 1(b))。喷出岩主要为玄武岩^[21], 形成于海西期, 与成矿关系不大。侵入岩主要形成于印支期, 岩性主要为花岗闪长岩、石英二长斑岩, 花岗闪长岩成岩年龄集中于 208~239 Ma 之间^[22-23]; 由北至南可分为贝吾、里农、路农、加仁等岩体, 各岩体均侵入到上覆泥盆系大理岩、变质石英砂岩、绢云砂质板岩中, 且各岩体可能具有相同的岩浆源区, 具 I 型花岗岩地球化学特征^[3, 22-23], 4 个岩体沿金沙江西侧构成一条北北东向的花岗岩带^[3-4]。位于羊

拉铜矿床中部的里农岩体是羊拉铜矿床最重要的岩体, 该岩体南北向延伸约 2 km, 东西向宽约 1.5 km, 呈椭圆状产出^[24], 该岩体与泥盆系大理岩、变质石英砂岩、绢云砂质板岩的接触带具强烈砂卡岩化, 为羊拉铜矿床重要的赋矿层位^[5]。脉岩主要为辉绿岩、细晶花岗岩脉, 呈不规则脉状、网脉状沿节理、裂隙充填^[17, 25]; 辉绿岩脉成岩年龄为 $(222.0 \pm 1.0) \text{ Ma}$ ^[22, 26], 稍晚于花岗闪长岩的成岩年龄和铜矿体的成矿年龄。

根据赋矿围岩的差异, 矿体可分为砂卡岩型、角岩型、斑岩型、热液脉型等 4 种类型^[8]。砂卡岩型矿体主要分布于里农矿段, 以 KT2、KT5 矿体最为典型(见图 2); 角岩型矿体主要分布于里农、路农等矿段, 斑岩型矿体主要分布于里农矿段; 热液脉型矿体主要分布于里农、江边、通吉格、加仁等矿段。里农矿段的铜矿体主要产于岩体与围岩的外接触带, 呈层状、似层状、脉状产出, 并明显受层

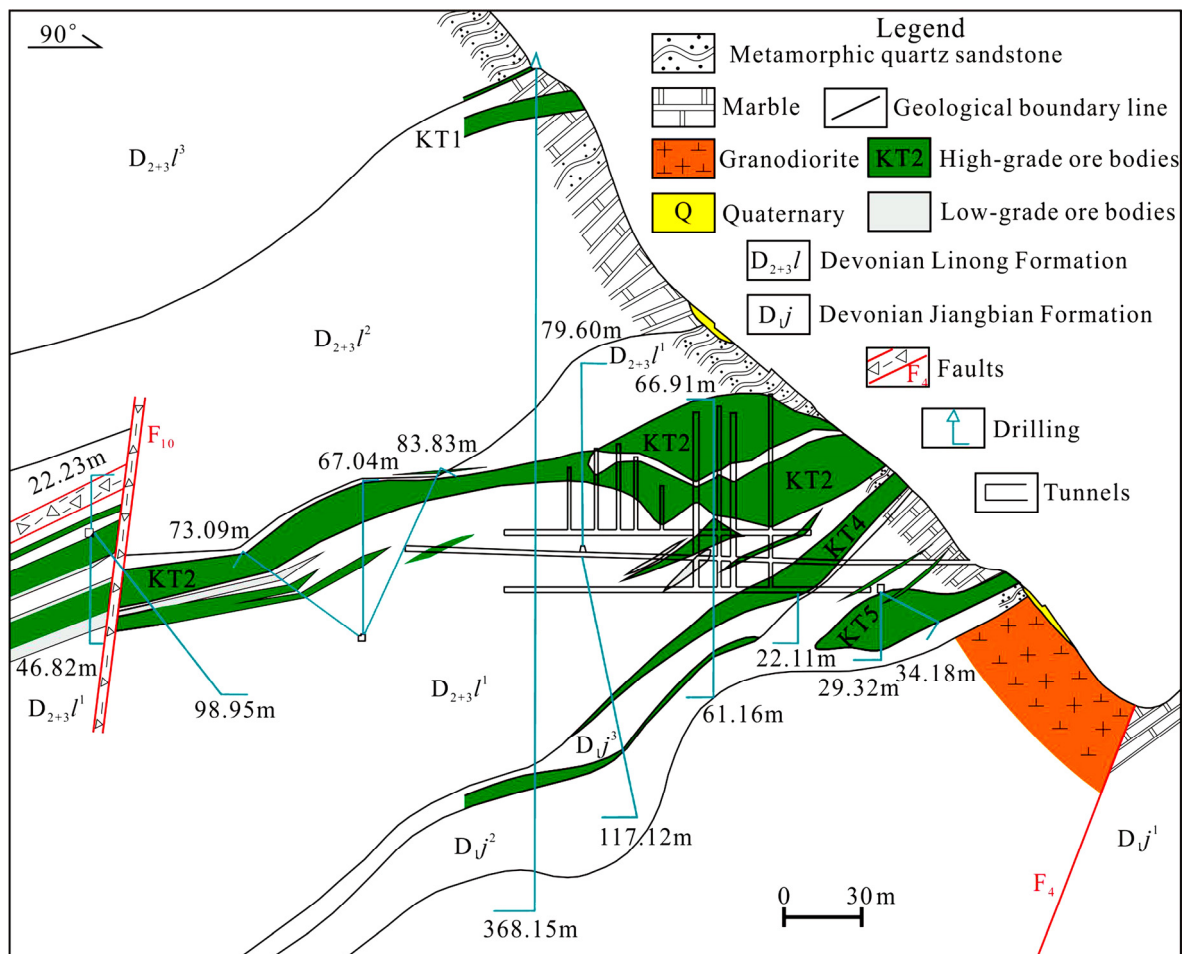


图 2 羊拉铜矿床里农矿段 25 号勘探线剖面图(据文献[27-28])

Fig. 2 No. 25 prospecting line profile map in Linong ore block, Yangla Cu deposit, Yunnan, China (modified from Refs. [27-28])

间破碎带控制; 路农、通吉格、加仁等矿段的铜矿体产于岩体和围岩的内、外接触带中, 矿体受接触带形态控制^[3-4]。矿体顶底板均为变质石英砂岩、大理岩、绢云砂质板岩; 矿体倾向西, 倾角较小, 明显受构造控制(见图 2), 其辉钼矿 Re-Os 年龄为 231 Ma^[16, 19, 23], 与花岗闪长岩的成岩年龄一致。矿石类型主要为矽卡岩型铜矿石, 金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿^[8, 17], 有益元素除 Cu 外, 还伴生 Pb、Zn、Ag、Au、Mo、Sb 等元素^[17, 23]。

2 矿床构造解析

羊拉铜矿床发育不同地史时期的褶皱和断裂构造^[6-7, 9, 11, 20, 29]。褶皱主要有里农背斜和江边向斜, 断裂按其走向可分为近南北向、近东西向、北东向、北西向 4 组; 其中, 北东向断裂最为发育, 北西向断裂次之, 近南北向、近东西向断裂发育程度相当。其几何学、运动学、力学性质及其构造岩特征见表 1。

2.1 褶皱

里农背斜总体呈构造穹隆, 轴向近南北, 南延被北东向 F₄ 断层错移, 核部有里农中酸性岩体(花岗闪长岩)侵位。核部地层为江边组, 轴面倾向北西, 倾角 30°~50°, 核部枢纽向北西倾伏, 倾向 330°、倾角 38°。东翼出露地层为江边组、里农组, 倾向东, 倾角大于 50°, 控制着江边矿段的产出; 西翼出露地层为江边组、里农组、贝吾组, 地层倾向西, 倾角为 22°~29°, 控制着里农矿段的产出^[5, 16]。力学性质分析显示, 里农背斜受到了东西-近东西向的主压应力作用(见图 3(a))。江边向斜位于里农背斜东翼, 轴向为北北西, 南延被北东向 F₄ 断层错移, 核部出露地层为里农组, 两翼出露地层为江边组; 西翼倾角 >50°, 东翼倾角为 25°~37°, 呈狭长的倾斜紧密线状褶曲^[5, 16]。力学性质分析显示, 江边向斜受到了东西-近东西向的主压应力作用(见图 3(b))。同时, 在羊拉铜矿床内与褶皱同期形成的断裂力学性质亦显示主压应力方向为东西-近东西向。结合区域金沙江洋盆在海西期由东向西裂解、扩张、俯冲、消亡闭合的大地构造背景以及该矿床

表 1 羊拉铜矿床断裂及矿化蚀变特征

Table 1 Characteristics of faults, mineralization, and alteration in Yangla Cu deposit

Structural type	Occurrence			Fracture morphology characteristics	Mechanical property	Main compressive stress direction	Tectonite characteristics	Mineralization and alteration characters
	Strike	Dip	Dip angle					
Nearly NS-trending fault	NW20° to NE20°	W	21° to 36°, 84°	Soothing wave, slow wave bending	Compressive to compressive-shear	EW to nearly EW	Cataclasite, fault gouge	Pyrite, chalcopyrite, and bornite
NE-trending fault	NE20° to NE70°	NW/SE	33° to 80°	Soothing wave, slow wave, and wave bending	Compressive to compressive-shear	NW to SE	Cataclasite, mylonite, and fault gouge	Pyrite, chalcopyrite, quartz, and calcite
NW-trending fault	NW20° to NW70°	NE/SW	22° to 67°, 87°	Wavy bending	Compressive to compressive-shear	NE to SW	Cataclasite, Mylonite, Fault gouge, and Structural lenticular body	Ferritization
Nearly EW-trending fault	NW70° to NE70°	N	60° to 84°	Wavy, jagged bending	Compressive-shear to tensional	NE to SW → EW	Cataclasite, mylonite, fault gouge, and breccia	Ferritization and malachite

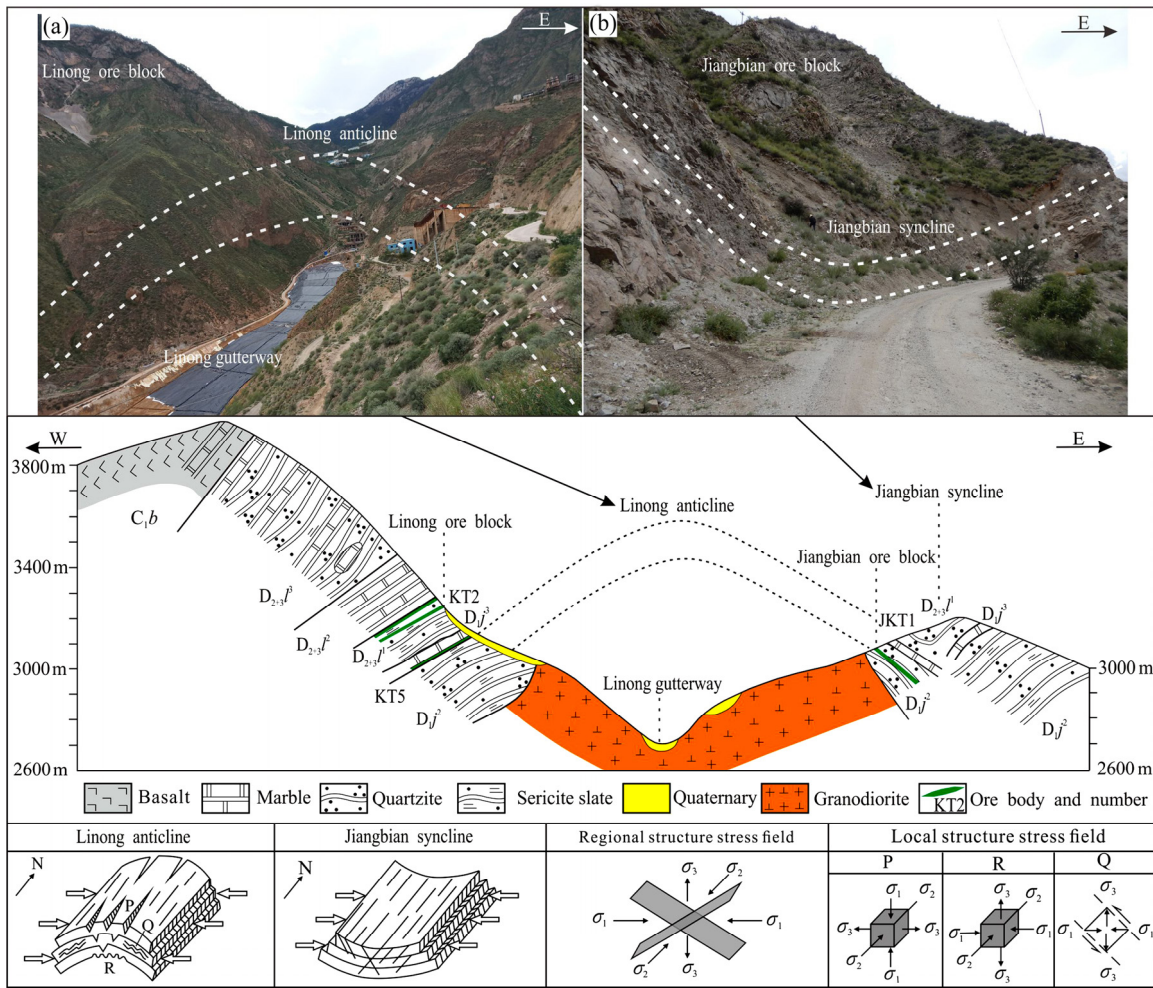


图3 羊拉铜矿床褶皱应力分析示意图(剖面图据文献[5, 16]; 力学性质分析据文献[13]修改)
Fig. 3 Fold stress analysis of Yangla Cu deposit (Geological section from Refs. [5, 16] and mechanical property from Ref. [13]): σ_1 —Maximum compressive stress; σ_2 —Moderate compressive stress; σ_3 —Minor compressive stress

内北东向 F4 断层切割、错移里农背斜和江边向斜的宏观地质现象，本文认为里农背斜和江边向斜最早可能形成于海西期东西-近东西向主压应力的作用，与金沙江断裂和羊拉断裂共同构成了羊拉铜矿床的控岩控矿构造格架，并为印支期中酸性岩浆侵位和铜多金属成矿作用提供了有利空间。

2.2 北东向断裂

羊拉铜矿床北东向断裂构造最为发育。根据部分铜矿(化)体赋存于北东向断裂带中及北东向断裂切割、错移北东向断裂和铜矿体等宏观地质现象，结合北东向断裂构造形迹特征和年代学证据[16, 20, 22, 26, 30-31]，本文认为羊拉铜矿床北东向断裂存在两个期次，即早北东向断裂和晚北东向断裂。早北东向断裂主要发育于泥盆系绢云砂质板岩、变质石英砂岩和大理岩中，断裂带宽几十厘米至数米

不等，断裂面形态呈现舒缓波状(弯曲)；断裂上、下盘均为泥盆系里农组，带内充填物多为构造碎裂岩、碎粉岩、断层泥，局部具黄铁矿化、黄铜矿化、硅化(石英脉)、碳酸盐化(方解石脉)、褐铁矿化、孔雀石化。断裂面局部擦痕发育，其运动学性质显示早北东向断裂多为正断层。根据断裂面形态、带内充填物特征判断早北东向断裂为压扭性断裂。晚北东向断裂主要发育于泥盆系里农组绢云砂质板岩、变质石英砂岩、大理岩及花岗闪长岩体中，断裂带宽几十厘米不等，断裂面形态呈现缓波状；断裂上、下盘为泥盆系里农组或花岗闪长岩侵入体，带内充填物主要为构造透镜体、碎裂岩、碎粒岩及断层泥，无明显矿化蚀变或矿化蚀变较弱。断裂面局部擦痕发育，其运动学性质显示晚北东向断裂亦为正断层为主。根据裂面形态、带内充填物特征判断晚北东向断裂亦为压扭性断裂。根据金沙

江洋盆的演化特征和羊拉铜矿床成岩-成矿年代学证据^[16, 19-20, 22-23], 结合北东向断裂的构造形迹及矿化蚀变特征, 羊拉铜矿床早北东向断裂可能形成于印支期; 晚北东向断裂可能形成于燕山期, 属成岩-成矿后(破岩-破矿)断裂。以地质点 3250-1、Ln33、Ln58、3450-1、3175-d58 为代表的北东向断裂, 力学性质分析显示该类断裂受到了北西-南东向(σ_1)

的主压应力作用, 表明印支期-燕山期羊拉铜矿床主压应力方向为北西-南东向(见图 4)。

2.3 北西向断裂

羊拉铜矿床北西向断裂发育程度仅次于北东向断裂, 根据野外地质调查发现北西向断裂多为切层、破岩-破矿断裂, 指示其形成于成岩-成矿作用

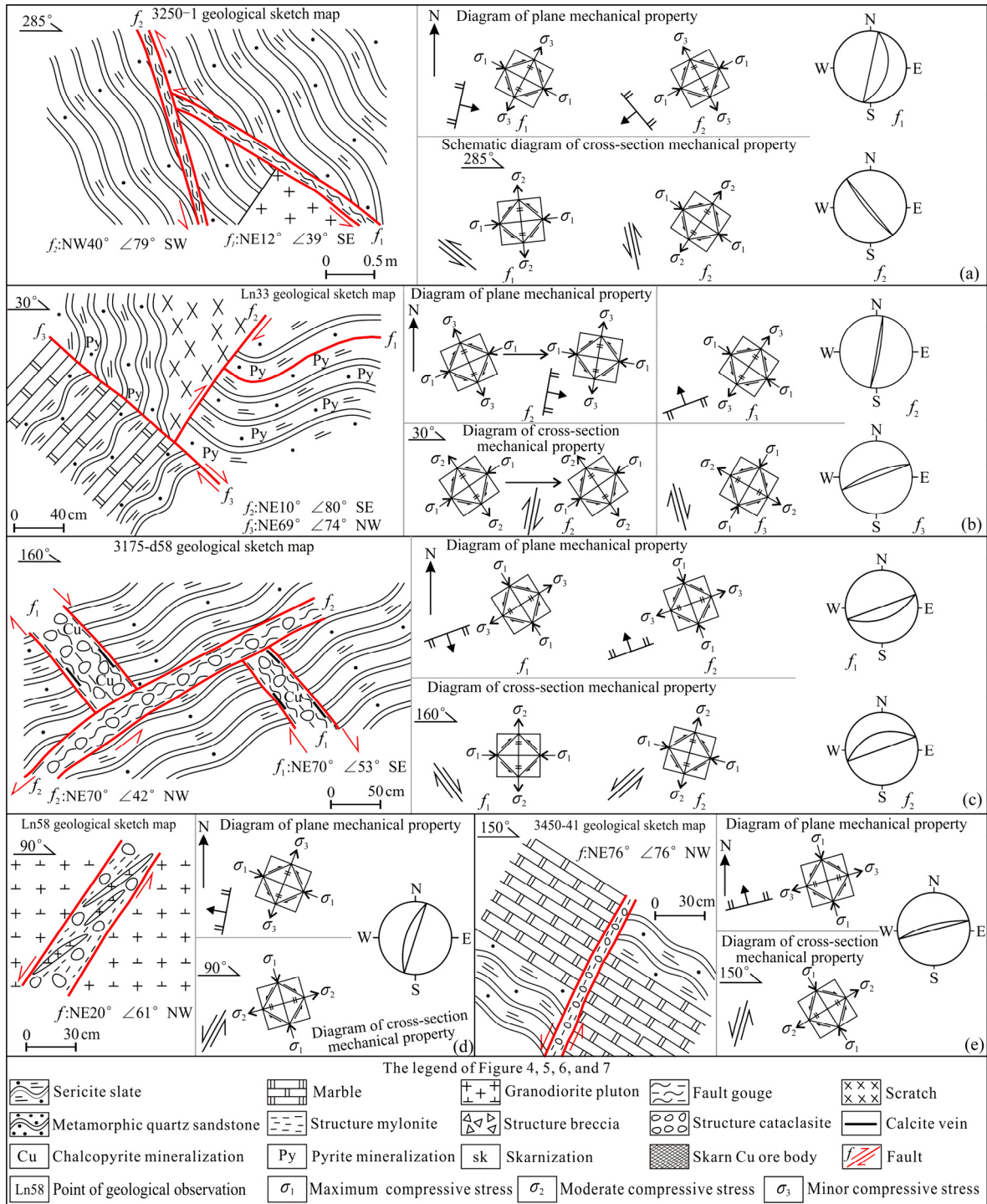


图 4 羊拉铜矿床北东-南西向断裂素描图

Fig. 4 Sketch of NE-SW structural profile map in Yangla Cu deposit

之后,可能形成于喜马拉雅期。北西向断裂主要发育于泥盆系里农组绢云砂质板岩、变质石英砂岩、大理岩及花岗质岩体中,断裂带宽几十厘米至约2 m,断裂面形态呈现舒缓波状(弯曲);断裂上、下盘均为泥盆系里农组或花岗质岩体,带内充填物以构造碎裂岩、碎粉岩、断层泥为主,极少数断裂带内存在角砾岩,局部具褐铁矿化,原岩主要为大理岩、花岗闪长岩、变质石英砂岩和绢云砂质板岩。

断裂面局部擦痕发育,其运动学性质显示正、逆断层均有发育,但以正断层为主。根据断裂面形态、带内充填物特征判断北西向断裂力学性质以压性-压扭性为主,少部分断裂可能存在张性力学特征。以地质点 YL1601、3450-9、3450-30、3175-d92 为代表的北西向断裂,力学性质分析显示该类断裂受到了北东-南西向(σ_1)的主压应力作用(见图 5),表明早喜马拉雅期羊拉铜矿床主压应力方向为北东-

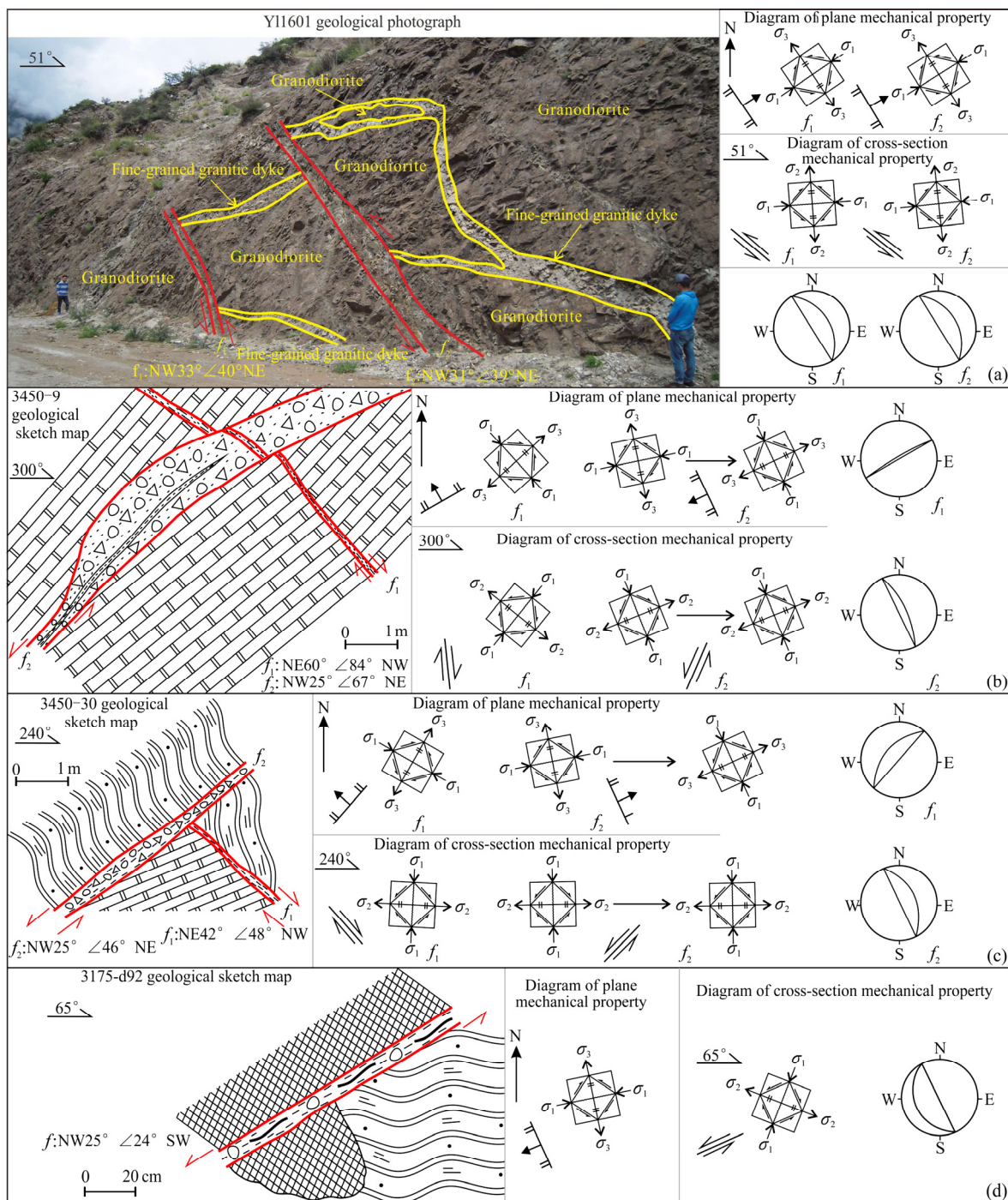


图 5 羊拉铜矿床北西-南东向断裂素描图

Fig. 5 Sketch of NW-SE structural profile map in Yangla Cu deposit

南西向, 力学性质的转变可能与印度板块-欧亚板块的陆陆碰撞有关。

2.4 近南北向断裂

羊拉铜矿床近南北向断裂较为发育, 多为层间岩性界面, 断裂规模中等, 带宽几厘米至十几米, 倾向西, 倾角较缓, 为羊拉铜矿床主要容矿构造。里农矿段 KT2、KT4、KT5 矿体均产于该类断裂破碎带内^[7, 11]。根据成岩-成矿年代(印支期, 约 230 Ma)^[16, 20, 22, 26, 30-31], 及铜矿体赋存于该类断裂带内的宏观地质现象, 羊拉铜矿床近南北向断裂可能形成于海西期, 推测为区域性近南北向羊拉断裂、金沙江深大断裂派生的次级断裂。近南北向断裂主要发育于泥盆系里农组和江边组绢云砂质板岩、变质石英砂岩、大理岩的层间接触部位, 以及花岗质岩体与围岩的接触带, 断裂面形态呈现舒缓波状; 断裂上、下盘均为泥盆系里农组和江边组或花岗质岩体, 但岩性不一致, 带内充填物以构造碎裂岩、断层泥为主, 少数断裂带内存在围岩透镜体; 断裂带内及旁侧围岩具不同程度砂卡岩化、黄铁矿化、黄铜矿化、斑铜矿化、硅化、碳酸盐化, 原岩主要为大理岩、花岗闪长岩、变质石英砂岩和绢云砂质板岩。断裂面擦痕发育, 其运动学性质显示近南北向断裂以逆断层为主。根据断裂面形态、带内充填物

特征判断近南北向断裂力学性质以压性-压扭性为主。以地质点 Ln23、Ln24、Ln32 为代表的近南北向断裂, 力学性质分析显示该类断裂受到了东西-近东西向(σ_1)的主压应力作用(见图 6), 表明海西期羊拉铜矿床主压应力方向可能为东西-近东西向。

2.5 近东西向断裂

羊拉铜矿床近东西向断裂整体不发育, 断裂规模较小, 断裂带宽几十厘米, 倾向北, 倾角较陡, 多为切层、破岩-破矿断裂; 根据近东西向断裂切割、错移地层、岩体的地质证据, 认为该类断裂可能形成于喜马拉雅期。喜马拉雅期(约 65 Ma)以来, 印度板块早期由南西向北东、晚期呈近东西向与欧亚板块碰撞, 金沙江缝合带中段(即羊拉铜矿床范围内)整体表现为近东西向的一些张性走滑断层^[9, 11]。近东西向断裂主要发育于泥盆系里农组大理岩、绢云砂质板岩和花岗质岩体中, 断裂面呈波状起伏, 局部呈现锯齿状弯曲; 断裂上、下盘岩性一致, 均为泥盆系里农组或花岗质岩体, 带内充填物主要为构造碎裂岩、碎粒岩、断层泥, 少数断裂带内存在构造角砾岩; 局部具有褐铁矿化和孔雀石化, 无明显砂卡岩化、黄铁矿化、黄铜矿化、硅化、碳酸盐化。断裂面局部擦痕发育, 指示该类断裂以正断层为主。根据擦痕、裂面形态、带内充填物特征判断

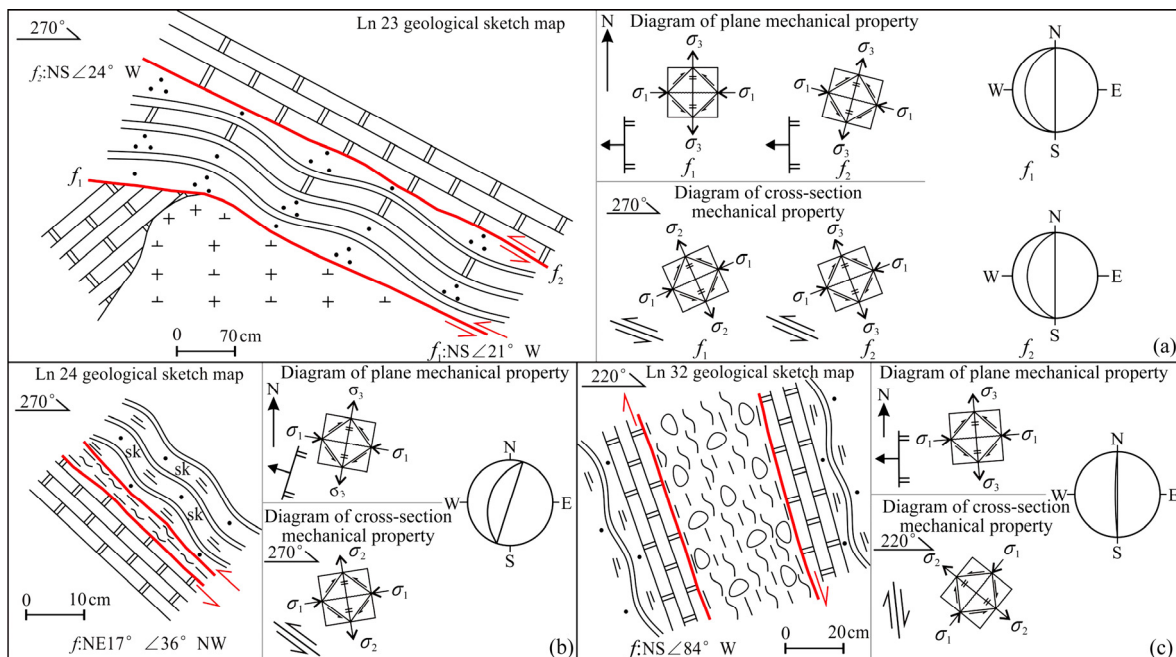


图 6 羊拉铜矿床南北-近南北向断裂素描图

Fig. 6 Sketch of NS structural profile map in Yangla Cu deposit

该类断裂可能经历了多期次活动，力学性质可能经历了压扭性→张性的转变。以地质点 3450-37、3450-87、Y028 为代表的近东西向断裂，力学性质分析显示该类断裂早期受到了北东-南西向的主压应力作用，后期主压应力方向转变为近东西向(见图 7)；表明晚喜马拉雅期羊拉铜矿床主压应力方向由北东-南西向转变为近东西向(σ_1)，力学性质的转变可能与印度板块-欧亚板块的陆陆碰撞的远程效应有关。

3 构造体系

通过对羊拉铜矿床 300 多条断裂构造的野外观察、素描及结构面几何学、运动学、力学性质分析，结合西南“三江”地区区域构造演化^[8-11, 19, 26, 32-33]，本文认为羊拉铜矿床经历了海西期、印支期、燕山期、喜马拉雅期的构造演化，推断构造演化序次为褶皱构造(里农背斜+江边向斜)、近南北向断裂→早北东向断裂→晚北东向断裂→北西向断裂→东西向断裂。羊拉铜矿床的断裂可划分为 3 种构造体系，即南北构造带(早-晚)、北东构造带(早-晚)、北西构造带，反映经历了 5 期构造运动，早南北构造带→早北东构造带→晚北东构造带→北西构造带→晚南北构造带，分别对应海西期、印支期、燕山期、早喜马拉雅期、晚喜马拉雅期^[34](见图 8)。

海西期，金沙江洋盆裂解，由东向西扩张、俯冲消亡^[16, 20]，由于受到东西向或近东西向主压应力

作用，这一时期的构造主要为顺层剪切褶皱和逆冲推覆构造；羊拉铜矿床表现为南北-近南北向层间压性-压扭性断裂和轴向近南北向的褶皱构造(里农背斜和江边向斜)，构成了羊拉铜矿床的早南北构造带。

印支期，金沙江洋基本闭合，但闭合时限较长，在闭合消亡过程中，中甸微板块与江达-维西陆缘弧发生碰撞，引发大规模中酸性岩浆上涌、侵位、成岩-成矿^[3, 16]，此时主压应力方向转变为北西-南东向，主压应力方向的转变可能与弧-陆碰撞效应有关，这一时期构造主要表现为左行韧性平移剪切带；羊拉铜矿床主要表现为北东-南西向的压性-压扭断裂^[7, 9]，构成了羊拉铜矿床的早北东构造带。

燕山期，金沙江缝合带主压应力为北西-南东向，与印支期主压应力方向一致。这一时期主要表现为脆性变形构造，羊拉铜矿床主要表现为北东-南西向的压性-压扭性、北西-南东向的张性，近东西向的扭压性、张扭性及近南北向的扭性断裂，且明显切割、错移印支期北东-南西向断裂及花岗闪长岩体、矽卡岩型矿体。该期北东-南西向断裂属成岩-成矿后断裂，为破岩-破矿构造，构成了羊拉铜矿床的晚北东构造带。

早喜马拉雅期，在印度板块与欧亚板块早期北东-南西向陆陆碰撞的地质背景下^[7, 11, 35-36]，主压应力为北东-南西向；这一时期主要表现为北西-近东西向的左行走滑断层^[6, 20]，羊拉铜矿床范围内表现为北西-南东向的压性-压扭性或扭压性断层，构成

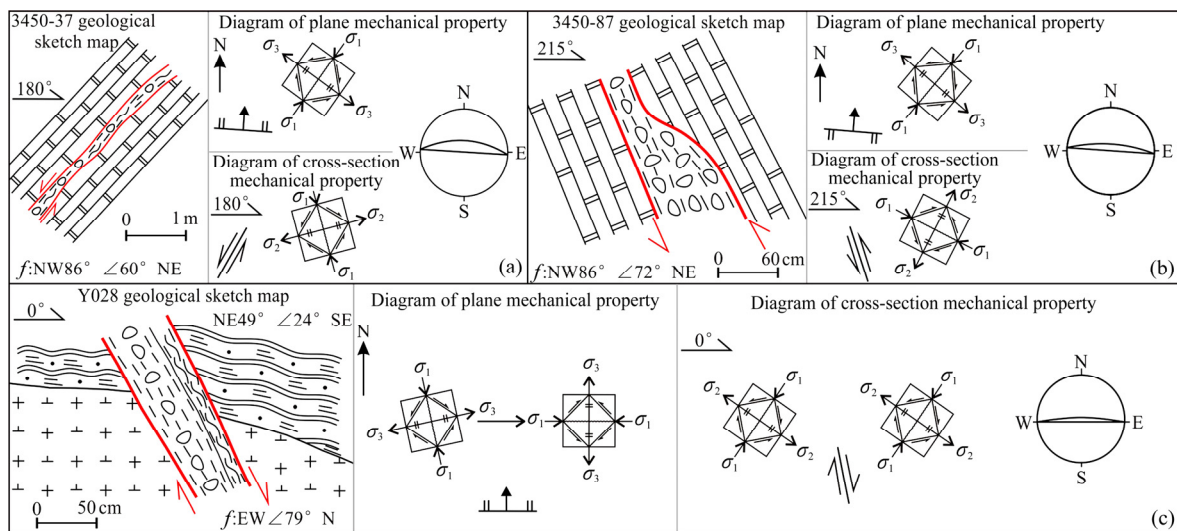


图 7 羊拉铜矿床东西-近东西向断裂素描图

Fig. 7 Sketch of EW structural profile map in Yangla Cu deposit

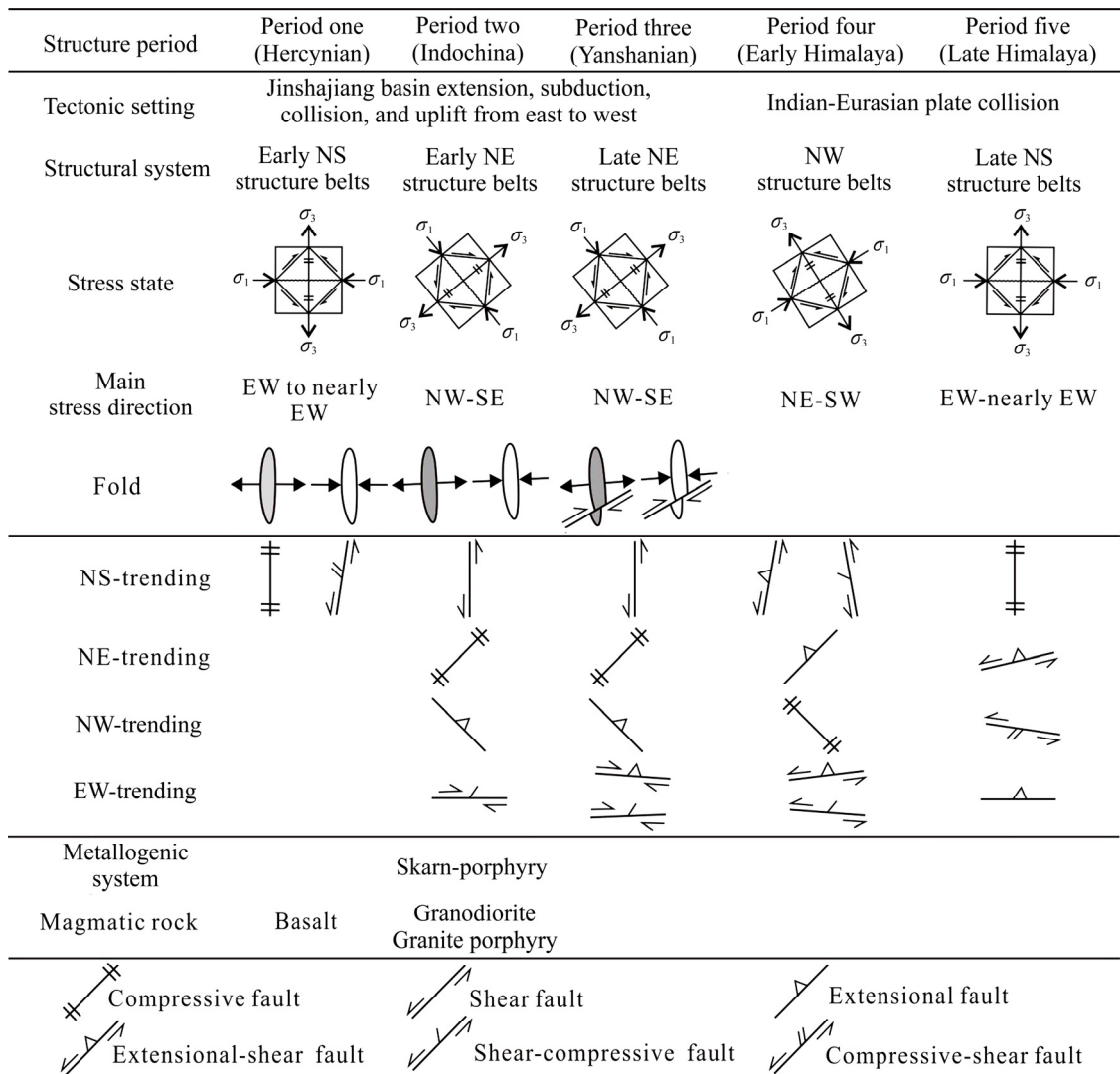


图 8 羊拉铜矿床断裂体系示意图(地质年代划分据文献[34])

Fig. 8 Ore-field structural system of Yangla Cu deposit (Age of geology from Ref. [34])

了羊拉铜矿床的北西构造带。

晚喜马拉雅期, 在印度板块与欧亚板块晚期近东西向陆陆碰撞的地质背景下, 主压应力由北东-南西向转变为近东西向, 这一时期主要表现为近东西向的伸展-走滑^[6, 9, 11]; 羊拉铜矿床范围内表现为东西-近东西向的张性断层, 构成了羊拉铜矿床的晚南北构造带。

4 构造控岩控矿模式

矿床的形成与区域构造演化、岩浆活动等密切相关^[18, 32]。根据羊拉铜矿床构造体系和金沙江缝合带的演化特征, 本文将羊拉铜矿床的构造控岩控矿模式厘定为: 海西期南北-近南北向“层间断裂”

+印支期北东-南西向“侵入接触构造”+燕山期“λ字型构造”+喜马拉雅期“阶梯状构造”(见图 9)。

海西期, 在区域性近东西向主压应力作用下, 伴随昌都-思茅微板块从扬子板块裂离, 出现了金沙江洋盆, 而后金沙江洋盆向西扩张、俯冲于昌都-思茅微板块之下^[16, 20-21, 26]。金沙江洋盆由东向西裂解、扩张、俯冲引发玄武质岩浆活动, 在羊拉铜矿床形成了玄武岩^[21], 同时形成了轴向近南北的褶皱构造(里农背斜和江边向斜)和南北-近南北向的层间断裂(羊拉断裂、金沙江断裂及羊拉铜矿床次级南北向层间断裂), 奠定了海西期南北向压性-压扭性“层间断裂”控岩控矿的基础(见图 9(a)), 为印支期大规模中酸性岩浆侵位和成矿流体沉淀、富

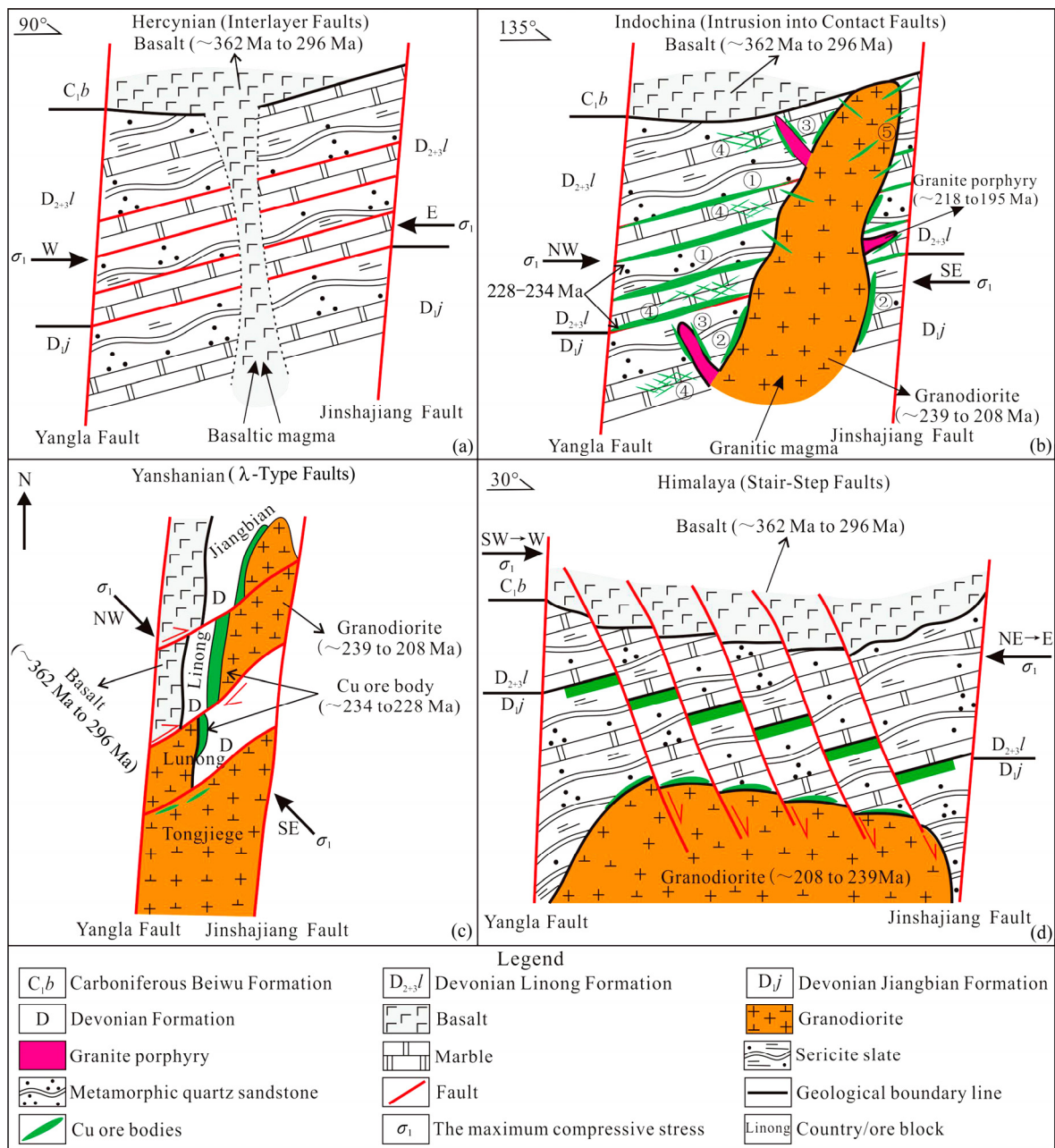


图9 羊拉铜矿床构造控岩控矿模式示意图(图9(c)据文献[7]修改)

Fig. 9 Rock- and ore-controlling structural model of Yangla Cu deposit (Fig. 9(c) from Ref. [7])

(a) Ore controlling model of “Interlayer Fault”; (b) Ore controlling model of “Intrusion into Contact Faults”: ① Skarn Cu ore-bodies produced along the Interlayer Fault, and its morphology and occurrence which are controlled by Interlayer Faults. ② Skarn Cu ore-bodies produced along contact zone of intrusion, morphology and occurrence were controlled by “Intrusion into Contact Faults; ③ Vein and disseminated porphyry Cu ore-bodies produced in granite porphyry dyke contact zone, morphology and occurrence were controlled by contact zone; ④ Vein-network Cu ore-bodies produced in wall rocks, and morphology were controlled by fissures/fracture; ⑤ Vein Cu ore-bodies produced at edge of intrusion and controlled by intrusion cracks; (c) Ore controlling model of “λ-Type Faults”; (d) Ore controlling model of “Stair-Step Faults”

集提供了有利的空间。

印支期, 伴随金沙江洋的闭合、消亡和弧-陆碰撞过程^[8, 16, 26], 区域性左行韧性平移剪切作用促

使大规模中酸性岩浆上涌、侵位, 岩浆侵入到围岩(碳酸盐岩、钙质碎屑岩)内, 沿接触带产状由陡变缓或凹陷等有利空间, 与围岩发生接触交代作用形

成矽卡岩及矽卡岩型矿体,其形态受侵入接触构造形态的控制。此外,由于钙质碎屑岩(绢云砂质板岩、变质石英砂岩)中南北-近南北向的层间断裂发育,为岩浆成矿热液的运移、金属矿质沉淀提供了有利通道和空间,形成了规模较大的层状-似层状矽卡岩矿体(KT2 矿体),其形态受层间断裂控制。岩浆演化晚阶段,残余岩浆浅成就位形成的花岗斑岩,呈脉状侵入到围岩中,形成细脉状、浸染状斑岩型矿(化)体,其形态受花岗斑岩侵入接触形态的控制^[7, 27-28, 37]。同时,由于岩浆顶蚀及岩浆冷凝作用,在岩体顶部及边缘形成一些脉状-网脉状裂隙,成矿热液沿着裂隙充填形成矿体,其形态受脉状-网脉状裂隙的控制。因此,印支期控岩控矿构造总体表现为“侵入接触构造”,自岩体边部→岩体与围岩接触带→围岩,控矿构造依次为岩体内的裂隙→岩体与围岩的接触构造→层间断裂及围岩的裂隙构造,对应矿体形态依次为脉状→脉状-层状矿体→层状-似层状矿体(主矿体)及脉状-网脉状矿体(见图 9(b))。因此,印支期北东-南西向岩体与围岩接触带的“侵入接触构造”为羊拉铜矿床主要控岩控矿构造。

燕山期,在碰撞后或后碰撞的构造背景下^[16, 27-28],金沙江缝合带持续受到北西-南东向挤压应力作用;在羊拉铜矿床形成了一组近平行的北东-南西向断裂,与近南北向的羊拉断裂、金沙江深大断裂组成“λ 字型构造”,该组断裂切割、错移印支期花岗质岩体和矽卡岩型矿体,将羊拉铜矿床在空间上分割成了 7 个矿段(见图 9(c)),构成了羊拉铜矿床“λ 字型”构造控岩控矿模式。

喜马拉雅期,由于印度-欧亚板块碰撞的远程效应,使得西南“三江”地区整体向南东逃逸,此时金沙江缝合带处于相对拉张的构造背景^[8, 26, 38],表现为伸展-走滑作用,存在北东-南西向、近东西向、南北向挤压应力。因存在不同碰撞阶段主压应力方向的转变^[29, 34],在羊拉铜矿床依次形成了北西-南东向的压性-压扭性断裂→近东西向的张性断裂;由于北西-南东向断裂往往具有正断层性质,且明显切割、错移海西期南北向层间断裂、印支-燕山期北东-南西向断裂和花岗质岩体、矿体,致使花岗质岩体和矽卡岩型矿体在剖面上呈“阶梯

状”展布特征,构成了羊拉铜矿床“阶梯状”构造控岩控矿模式(见图 9(d))。

5 结论

1) 羊拉铜矿床构造几何学、运动学及力学性质分析显示,自海西期→印支期→燕山期→喜马拉雅期,羊拉铜矿床主压应力主要经历了从近东西向→北西向→北西向→(北东向→近东西向)的转变,依次形成了早南北构造带、北东构造带(早-晚)、北西构造带和晚南北构造带等构造体系。

2) 海西期早南北构造带构成了羊拉铜矿床控岩控矿构造格架的基础,早北东构造带是控制印支期中酸性岩浆有关的矽卡岩-斑岩成矿系统的主导构造,燕山期晚北东构造带、喜马拉雅期北西构造带和晚南北带为破岩破矿构造。

3) 羊拉铜矿床构造控岩控矿模式依次为海西期“层间断裂”+印支期“侵入接触构造”+燕山期“λ 字型构造”+喜马拉雅期“阶梯状构造”。

致谢:

在野外工作中得到了云南迪庆矿业开发有限责任公司罗诚、李在早、刘凤泽等工程师,及中国有色金属工业昆明勘察设计研究院沈忠义、张林红、陈八富等工程师的指导和帮助;中国有色金属学报编辑部龙怀中老师和两位匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢!

REFERENCES

- [1] DU Li-juan, LI Bo, HUANG Zhi-long, et al. Carbon-oxygen isotopic geochemistry of the Yangla Cu skarn deposit, SW China: Implications for the source and evolution of hydrothermal fluids[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 809-821.
- [2] DU Li-juan, LI Bo, HUANG Zhi-long, et al. Mineralogy, fluid inclusion, and hydrogen and oxygen isotope studies of the intrusion-related Yangla Cu deposit in the Sanjiang Region, SW China: Implications for metallogenesis and deposit type[J]. *Resource Geology*, 2019, 70(1): 28-49.
- [3] 朱经经, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 滇西北羊拉铜矿矿区花岗

- 岩成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2553-2566.
- ZHU Jing-jing, HU Rui-zhong, BI Xian-wu, et al. Genesis and tectonic significance of granites in the Yangla ore district, northwestern Yunnan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(9): 2553-2566.
- [4] ZHU Jing-jing, HU Rui-zhong, BI Xian-wu, et al. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of granitoids in the Jinshajiang suture zone, SW China: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the Paleo-Tethys Ocean[J]. *Lithos*, 2011, 126(3): 248-264.
- [5] 杜丽娟. 滇西北羊拉铜矿床热液体系演化与成矿机制研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2017: 1-165.
- DU Li-juan. Hydrothermal fluid evolution and the ore-forming mechanism in the Yangla Cu deposit, northwest Yunnan[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2017: 1-165.
- [6] 林仕良, 王立全. 云南德钦羊拉铜矿床构造特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2004, 24(3): 48-51.
- LIN Shi-liang, WANG Li-quan. Structural features of the Yagra copper deposit in Deqin, Yunnan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2004, 24(3): 48-51.
- [7] 李波, 邹国富, 文书明, 等. 滇西北羊拉铜矿床断裂、构造控矿模式及找矿预测[J]. 矿产勘查, 2014, 5(5): 699-711.
- LI Bo, ZOU Guo-fu, WEN Shu-ming, et al. Fault structure, ore-controlling structural model and prospecting prediction of Yangla copper deposit, northwestern Yunnan[J]. *Mineral Exploration*, 2014, 5(5): 699-711.
- [8] 曾普胜, 尹光候, 李文昌, 等. 金沙江造山带德钦-羊拉矿集区构造-岩浆-成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 2015: 56-91.
- ZENG Pu-sheng, YIN Guang-hou, LI Wen-chang, et al. Tectonic- magma-metallogenic system in the Deqin-Yangla ore-gathering district of the Jinshajiang orogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015: 56-91.
- [9] 甘金木, 战明国, 余凤鸣, 等. 滇西德钦羊拉铜矿区构造变形特征及其控矿作用分析[J]. 华南地质与矿产, 1998, 14(4): 59-65.
- GAN Jin-mu, ZHAN Ming-guo, YU Feng-ming, et al. Structural deformation and its ore-control significance in Yangla copper district, Deqing, western Yunnan[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 1998, 14(4): 59-65.
- [10] 余凤鸣, 战明国, 甘金木, 等. 滇西羊拉大型铜矿床石英构造岩微观构造与动力学分析[J]. 中国区域地质, 2000, 19(1): 92-99.
- YU Feng-ming, ZHAN Ming-guo, GAN Jin-mu, et al. Analysis of micro-tectonic and mechanism of quartz tectonite in Yangla large-scale copper deposit in west Yunnan[J]. *Regional Geology of China*, 2000, 19(1): 92-99.
- [11] 杨喜安, 刘家军, 韩思宇, 等. 滇西羊拉铜矿床、鲁春铜铅锌矿床构造控矿特征[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(2): 248-258.
- YANG Xi-an, LIU Jia-jun, HAN Si-yu, et al. Characteristics of ore-controlling structures in the Yangla copper deposit and Luchun Cu-Pb-Zn deposit, Western Yunnan[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(2): 248-258.
- [12] 陈正乐, 陈柏林, 张青. 矿田构造调查工作指南[M]. 北京: 地质出版社, 2019: 1-44.
- CHEN Zheng-le, CHEN Bai-lin, ZHANG Qing. Guidance for ore field structural investigation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019: 1-44.
- [13] 孙家骢, 韩润生. 矿田地质力学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 86-115.
- SUN Jia-cong, HAN Run-sheng. Geological mechanics theory and method of ore field[M]. Beijing: Science Press, 2016: 86-115.
- [14] DENG Jun, WANG Qing-fei, LI Gong-jian, et al. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China [J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 419-437.
- [15] DENG Jun, WANG Qing-fei, LI Gong-jian. Tectonic evolution, superimposed orogeny, and composite metallogenic system in China[J]. *Gondwana Research*, 2017, 50: 216-226.
- [16] 朱经经. 滇西北羊拉铜矿成矿地质背景及成因机制[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2012: 1-179.
- ZHU Jing-jing. The geological setting and metallogenesis of the Yangla copper deposit, SW Yunnan[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2012: 1-179.
- [17] 杨喜安, 刘家军, 韩思宇, 等. 云南羊拉铜矿床矿物组成、地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2012, 26(2): 229-242.
- YANG Xi-an, LIU Jia-jun, HAN Si-yu, et al. Mineral composition, geochemistry of the Yangla copper deposit in Yunnan and their geological significances[J]. *Geoscience*,

- 2012, 26(2): 229–242.
- [18] 邓军, 王长明, 李文昌, 等. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究态势及启示[J]. 地学前缘, 2013, 21(1): 52–64.
DENG Jun, WANG Chang-ming, LI Wen-chang, et al. The situation and enlightenment of the research of the tectonic evolution and metallogenesis in the Sanjiang Tethys[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 21(1): 52–64.
- [19] 李文昌, 潘桂棠, 侯增谦, 等. 2010. 西南“三江”多岛弧盆-碰撞造山成矿理论与勘查技术[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 227–238.
LI Wen-chang, PAN Gui-tang, HOU Zeng-qian, et al. Metallogenic theory and exploration technique of “Sanjiang” multi-island arc basin collisional orogeny in southwest China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 227–238.
- [20] 王立全, 潘桂棠, 李定谋, 等. 金沙江弧-盆系时空结构及地史演化[J]. 地质学报, 1999, 73(3): 206–218.
WANG Li-quan, PAN Gui-tang, LI Ding-mou, et al. The spatio-temporal framework and geological evolution of the Jinshajiang arc-basin systems[J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(3): 206–218.
- [21] 路远发, 战明国, 陈开旭. 金沙江构造带嘎金雪山岩群玄武岩铀-铅同位素年龄[J]. 中国区域地质, 2000, 19(2): 155–158.
LU Yuan-fa, ZHAN Ming-guo, CHEN Kai-xu. U-Pb isotopic dating of basalt from the Gajinxueshan Group in the Jinshajiang tectonic belt[J]. Regional Geology of China, 2000, 19(02): 155–158.
- [22] 王彦斌, 韩娟, 曾普胜, 等. 云南德钦羊拉大型铜矿区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(6): 1833–1844.
WANG Yan-bin, HAN Juan, ZENG Pu-sheng, et al. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from granodiorite in Yangla copper deposit, Deqin County, Yunnan, Southwest China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(6): 1833–1844.
- [23] 杨喜安, 刘家军, 韩思宇, 等. 云南羊拉铜矿床里农花岗闪长岩体锆石 U-Pb 年龄、矿体辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2567–2576.
YANG Xi-an, LIU Jia-jun, HAN Si-yu, et al. U-Pb dating of zircon from the Linong granodiorite, Re-Os dating of molybdenite from the ore body and their geological significances in Yangla copper deposit, Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(9): 2567–2576.
- [24] 陈思尧. 滇西北羊拉铜矿床地质地球化学特征及成因探讨[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 1–96.
CHEN Si-yao. Geological, geochemical characteristics and genesis of the Yangla copper deposit, Northwestern Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013: 1–96.
- [25] 朱俊. 云南省德钦县羊拉铜矿地质地球化学特征与成因研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011: 1–166.
ZHU Jun. Geological, geochemical characteristics and genesis of the Yangla copper deposit, Deqin county, Yunnan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011: 1–166.
- [26] 曾普胜, 王彦斌, 麻菁, 等. 滇西北羊拉地区金沙江古洋盆的穿时碰撞闭合: 来自花岗岩年龄的制约[J]. 地学前缘, 2018, 25(6): 92–105.
ZENG Pu-sheng, WANG Yan-bin, MA Jing, et al. Diachronous collision-closure of the Jinshajiang pale-ocean basin in the Yangla area: Constraints from ages of the granites[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(6): 92–105.
- [27] LI Bo, WANG Xin-fu, DU Li-juan, et al. Zircon U-Pb ages and geochemistry of granite porphyries in the Yangla Cu deposit, SW China: Constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the Jinshajiang suture belt[J]. Geofluids, 2020, 2020: 8852277. <https://doi.org/10.1155/2020/8852277>.
- [28] WANG Xin-fu, LI Bo, GUAN Shen-jin, et al. Mineralized granitic porphyry of the Yangla copper deposit, western Yunnan, China: Geochemistry of fluid inclusions and H-O, S, and Pb isotopes[J]. Geofluids, 2020, 2020: 4391703. <https://doi.org/10.1155/2020/4391703>.
- [29] 魏君奇, 陈开旭, 魏福玉. 滇西羊拉地区构造-岩浆-成矿作用分析[J]. 华南地质与矿产, 2000, 16(1): 59–62.
WEI Jun-qi, CHEN Kai-xu, WEI Fu-yu. Tectonism-magmatism-mineralization in Yangla region, western Yunnan[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2000, 16(1): 59–62.
- [30] YANG Xi-an, LIU Jia-jun, LI Da-peng, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Linong granitoid and its relationship to Cu mineralization in the Yangla copper deposit, Yunnan, China[J]. Resource Geology, 2013, 63(2): 224–238.
- [31] 高睿, 肖龙, 何琦, 等. 滇西维西-德钦-带花岗岩年代学、地球化学和岩石成因[J]. 地球科学, 2010, 35(2):

- 186–200.
- GAO Rui, XIAO Long, HE Qi, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of granites in Weixi-Deqin, West Yunnan[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(2): 186–200.
- [32] 邓 军, 张 静, 王庆飞. 中国西南特提斯典型复合成矿系统及其深部驱动机制研究进展[J]. *岩石学报*, 2018, 34(5): 1229–1238.
- DENG Jun, ZHANG Jing, WANG Qing-fei. Research advances of composite metallogenic system and deep driving mechanism in the Tethys, SW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(5): 1229–1238.
- [33] 邓 军, 王长明, 李龚健, 等. 复合成矿系统理论: 揭开西南特提斯成矿之谜的关键[J]. *岩石学报*, 2019, 35(5): 1303–1323.
- DENG Jun, WANG Chang-ming, LI Gong-jian, et al. The theory of composite metallogenic system: Key of recovering metallogenic mystery in the SW Tethys[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 1303–1323.
- [34] 侯增谦, 由晓明, 杨竹森, 等. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. *矿床地质*, 2006, 25(6): 629–651.
- HOU Zeng-qian, QU Xiao-ming, YANG Zhu-sen, et al. Metallogenesis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(6): 629–651.
- [35] 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 印度-欧亚侧向碰撞带构造-岩浆演化的动力学背景与过程—以藏东三江地区构造演化为例[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 775–786.
- LIU Jun-lai, SONG Zhi-jie, CAO Shu-yun, et al. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between Indian and Eurasian plates: Exemplified by the tectonic evolution of the three river region, eastern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 775–786.
- [36] 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. *中国地质*, 2006, 33(2): 340–351.
- HOU Zeng-qian, MO Xuan-xue, YANG Zhi-ming, et al. Metallogenesis in the collisional orogeny of the Qinghai-Tibet Plateau: Tectonic setting, tempo-spatial distribution and ore deposit types[J]. *Geology in China*, 2006, 33(2): 340–351.
- [37] 李 波, 邹国富, 黄智龙, 等. 滇西北羊拉铜矿床研究中的几个问题[J]. *矿物学报*, 2013, 33(4): 676–680.
- LI Bo, ZOU Guo-fu, HUANG Zhi-long, et al. Several problems in genetic studies on Yangla copper deposit, Yunnan province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, 33(4): 676–680.
- [38] 陈炳蔚, 李永森, 曲景川. 三江地区主要大地构造问题及其与成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 13–30.
- CHEN Bing-wei, LI Yong-sen, QU Jing-chuan. The main tectonic problems in Sanjiang district and their relationship with mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 13–30.

Ore-field structural system and its mechanism of rock-and ore-controlling processes of Yangla Cu deposit in northwest Yunnan, China

LI Bo¹, WANG Xin-fu¹, YUE Yan¹, HUANG Zhi-long², TANG Guo^{1,3}, LIU Yue-dong⁴,
ZOU Guo-fu³, XIANG Zuo-peng¹

(1. Faculty of Land and Resource Engineering,

Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry,
Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

3. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Kunming 650051, China;

4. Yunnan Diqin Mining Industry Group, Shangrila 674400, China)

Abstract: The Yangla Cu deposit is located in northwest Yunnan, China and formed during the Mesozoic structure-magma-mineralization events, is one of the typical skarn-porphyry deposits in the Jinshajiang suture zone, “Sanjiang” polymetallic metallogenic domain. Well developed structures in the Yangla Cu deposit composed a typical folds-faults rock- and ore-controlling structural system, which constituted the skarn-porphyry metallogenic system. In this paper, the theory and method of ore-field geomechanics are used to analyze the geometry, kinematics and mechanical property of the structure traces in the Yangla Cu deposit, and to determine the ore-field structural system and its mechanism of rock-and ore-controlling model. The results show that the Yangla Cu deposit mainly experienced transformation of main constructional compressive stress from EW- to NW- to NW- to (NE- to nearly EW) trending, and formed the early NS, NE (early to late), NW, late NS structure belts in turn, since the Hercynian→Indochina→Yanshanian→Himalaya, and affected the Jianshajiang suture—zone and Indian-Eurasian plates. It is believed that the early NS structure belt was the rock- and ore-controlling structural framework system in the Hercynian. The early NE structure belt was provided a favorable structural setting for the skarn-porphyry metallogenic system, which was the dominant ore-controlling structural system in the Indochina. In contrast, the late NE structure belt destroyed the rock and ore-bodies, which belong to rock- and ore-breaking structure in Yanshanian. The NW and late NS structure belts also destroyed the intrusions and ore-bodies, and belong to the rock- and ore-breaking structure in Himalaya. The corresponding structure rock- and ore-controlling model are successively the “Interlayer Faults” of the Hercynian, “Intrusion into Contact Faults” of the Indochina, “λ-Type Faults” of the Yanshanian, and “Stair-Step Faults” of the Himalaya, which based on the structural system and its rock- and ore-controlling structure type.

Key words: structural system; rock- and ore-controlling structure; ore-controlling structure model; Yangla Cu deposit; Northwest Yunnan

Foundation item: Projects(41862007, 41402072) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(YNWR-QNBJ-2018-093) supported by the Yunnan Ten Thousand Talents Plan Young & Elite Talents Program, China; Project(14078384) supported by the Key Disciplines Construction of Kunming University of Science and Technology, China

Received date: 2020-09-23; **Accepted date:** 2021-01-10

Corresponding author: LI Bo; Tel: +86-15987187981; E-mail: libo8105@qq.com

(编辑 龙怀中)