

湘西龙王江金锑矿田变形序列、成矿时代背景与控矿构造

赵央连¹, 李彬^{2*}, 柏道远^{2*}, 邓新³, 陈剑锋², 曾广乾², 黄建中², 许德如⁴

1.湖南省自然资源调查所, 湖南长沙 410007

2.湖南省地质调查所, 湖南长沙 410114

3.中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北武汉 430205

4.东华理工大学地球科学学院

摘要 为厘清湘西龙王江金锑矿田构造变形序列、控矿构造并揭示矿田形成的时代及构造背景, 利用细致的构造解析与含矿石英脉热液锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 结合区域构造演化和测年资料, 厘定了研究区由早到晚经历了 6 期构造变形事件: 志留纪晚期 NW~NWW 向挤压、中三叠世晚期 NW~NWW 向挤压、晚三叠世近 SN 向挤压、中侏罗世晚期 NWW 向挤压、白垩纪区域 NW—SE 向伸展、古近纪中晚期 NEE 向~NE 向挤压; 获得了石英脉热液锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $211.8 \pm 4.8 \text{ Ma}$ 。综合分析认为: 龙王江矿田成矿可能主要发生于晚三叠世 (211~206Ma), 成矿背景与印支期华南陆缘碰撞触发的陆内造山后碰撞阶段岩浆活动及晚期热液有关。矿田构造定位于龙王江断裂 (F_1) 和黑土坡断裂 (F_2) 反向逆冲围限的断夹块中, F_1 和 F_3 (江东南断裂) 是导矿构造, NE~NNE 向强劈理化带 (剪切带) 和 F_3 为配矿兼含矿构造; 配矿兼含矿构造深部具有较大找矿潜力, 陶金坪—火毛塘一带构造应力集中部位可重点部署勘查工作。

关键词: 变形序列; 热液锆石 U-Pb 定年; 成矿时代及背景; 控矿构造; 龙王江金锑矿田; 江南造山带。

中图分类号: P512、P613、P618.51

收稿日期: 2025-04-06

Deformation sequence, metallogenic age setting and ore-controlling structures of the Longwangjiang gold-antimony ore-field in western Hunan, south China

Zhao Yanglian¹, Li Bin², Bai Daoyuan², Deng Xin³, Chen Jianfeng², Zeng Guangqian², Huang Jianzhong², Xu Deru⁴

1. Natural Resources Survey Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410007, China

2. Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014, China

3. Wuhan Center of China Geological Survey (China Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan, Hubei 430205, China

4. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China

Abstract: To clarify the deformation sequence and ore-controlling structures of the Longwangjiang Au-Sb ore-field in western Hunan, as well as to reveal the age and tectonic setting of its formation, we conducted detailed structural analyses and LA-ICP-MS U-Pb dating of ore-bearing quartz vein hydrothermal zircon. Additionally, we comprehensively analyzed regional tectonic evolution and age data. The study area underwent six stages of structural deformation events, progressing from early to late: late Silurian NW-NWW compression, late Middle Triassic NW-NWW compression, late Late Triassic near SN compression, late Middle Jurassic NWW compression, Cretaceous regional NW-SE extension, and mid-late Cenozoic

基金项目: 自然资源部新一轮找矿突破战略行动科技支撑项目(NO. ZKKJ202408); 湖南省地质院科技计划项目(NO. HNGSTP202460、HNGSTP202407、201917); 湖南省自然科学基金(NO. 2024JJ8344); 湘财电采[2024]104025。

作者简介: 赵央连(1971—), 男, 高级工程师, 长期从事地质找矿及研究工作. ORCID: 0009-0004-4681-8497. E-mail: 13807459225@163.com.

***通讯作者:** 李彬, ORCID: 0009-0008-4846-8653. E-mail: cuglibin@163.com; 柏道远, ORCID: 0000-0002-0267-7838. E-mail:

daoyuanbai@sina.com.

NEE~NE compression. The LA-ICP-MS U-Pb age of the quartz vein hydrothermal zircon was determined to be 211.8 ± 4.8 Ma. The comprehensive analysis suggests that: mineralization primarily occurred during the late Triassic (211–206 Ma) and the formation of the Longwangjiang ore-field is associated with late-stage hydrothermal activity triggered by the collision of the Indochina period with the South China margin during the intracontinental collision phase. The ore-field is situated within a block confined by the reverse thrust of the Longwangjiang fault (F_1) and the Heitupo fault (F_2). The F_1 and F_3 faults serve as ore-guiding structures, while the NE-NNE-trending strong foliated zones (shear zones) and the Jiangdongwan fault serve as ore-distributing and ore-bearing structures simultaneously. The ore-distributing and ore-bearing structures in the deep parts of the ore deposit have great mineral exploration potential; the Taojinping-Huomaotang area is a key region for exploration due to concentrated structural stress.

Key words: deformation sequence; U-Pb dating of hydrothermal zircon; metallogenic age and setting; ore-controlling structures; Longwangjiang Au-Sb ore-field; Jiangnan Orogen.

0 引言

江南造山带湖南段(图 1a)发育有大量金(锑钨)矿床(图 1b),素有湖南“金腰带”之称(黄建中等, 2020)。前人对该带金(锑钨)矿床的地质特征、矿床成因进行过大量研究并且成果丰硕,但在成矿时代及构造背景方面尚存争议。Xu *et al.* (2017)认为存在早古生代(423~397Ma)、侏罗纪(176~170Ma)和早白垩世(144~130Ma)3期金成矿事件,其中晚燕山期(~130Ma)是主要成矿阶段;Zhang *et al.* (2019)指出存在三叠纪(~235Ma)和早白垩世两期金成矿(142~130Ma)及一期锑成矿(~130Ma)事件、早泥盆世(~402Ma)和晚三叠世-早侏罗世(224~163Ma)两期金-锑成矿事件;黄建中等(2020)则认为湖南金腰带成矿主要发生于早古生代和三叠纪;柏道远等(2021)强调除志留纪和三叠纪成矿外,尚存晚侏罗-早白垩世成矿作用。不同学者多认为志留纪晚期-早泥盆世成矿事件主要与加里东陆内造山运动有关(Xu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019; 柏道远等, 2021; 黄建中等, 2020; Wang *et al.*, 2022),晚侏罗-早白垩世成矿事件则与古太平洋板块的俯冲有关(Xu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2022; 李彬等, 2024; Zeng *et al.*, 2023),但对三叠纪成矿事件的构造背景则存在陆内造山(Xu *et al.*, 2017; 黄建中等, 2020; 谢桂青等, 2021)、陆缘碰撞远程效应(Zhang *et al.*, 2019)、与古太平洋板块俯冲(Zeng *et al.*, 2023)等不同观点。此外,尽管前人对各矿床(区)的导矿、容矿构造等已有基本认识(Zhang *et al.*, 2019; 柏道远等, 2021),但关于控矿构造运动学特征、形成时代及控矿构造体系等方面的研究大多非常薄弱。

雪峰弧形构造带西南段发育有众多金(锑、钨)矿床(图 1b),是区域重要的金-锑-钨成矿带。湘西龙王江金(锑)矿田位于淘金坪 NE 向倒转复背斜内部,并被 2 条平行的 NE 向区域性断裂(F_1 和 F_2)挟持,其中发育有多个金(锑)矿床(图 2a),近年来的勘察工作也有新的发现(尹大改等, 2015; 陈明辉等, 2018),显示较好的成矿地质条件和找矿前景。前人根据成矿地质、矿石与矿物、流体包裹体及地球化学等对该矿床的成因、成矿机理和成矿规律等进行了一些研究(尹大改等, 2015; 陈明辉等, 2018; 周超等, 2020; Zheng *et al.*, 2022),并获得了印支期(~253~206)Ma 成矿的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 同位素年龄(Zheng *et al.*, 2022),但总体研究程度较低,特别是矿田构造研究还十分薄弱。前人提出矿体主要赋存于复背斜南段北西翼 EW 向韧性剪切带(逆断层)、复背斜近轴部 NNE~NE 向强劈理化带(剪切带)、复背斜北东段南东翼近轴部倾向 SE 脆性断裂等 3 类构造中(尹大改等, 2015)。但对构造变形序列及形成背景、控矿构造“导-运(配)-储(含)体系”还缺乏研究和认识,对成矿时代及构造背景的认识还有待进一步深化和明确。

鉴于此,本文将系统的矿田构造解析工作与含矿石英脉热液锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年相结合,在确定含矿构造变形期次的基础上开展构造-成矿年代学研究,厘定了龙王江金锑矿田构造变形序列、成矿时代,并探讨了成矿构造背景及构造控矿规律。相关研究成果可深化对龙王江矿田的成矿地质背景和成矿规律的认识,对江南造山带湖南段金(多金属)地质演化与成矿研究以及该区下一

步找矿勘查均有重要意义。

1 地质背景

1.1 区域地质

雪峰造山带自南西向北东内部构造线总体呈向北西凸出的弧形展布（图 1b），主要出露新元古代冷家溪群、板溪群（高涧群）、南华系和下古生界，少量上古生界，并有中生代的洞庭盆地沅麻盆地、靖州盆地等叠覆其上。雪峰造山带及边缘自北西往南东依次发育倾向 SE 的慈利-保靖、怀化-官庄、溆浦-靖州断裂，以及倾向 NW 的通道-安化、城步-新化断裂等 5 条主干逆断裂，组成区域背冲构造样式（柏道远等，2021）。雪峰构造带东缘发育志留纪、三叠纪、侏罗纪花岗岩，分别与加里东运动、印支运动和早燕山运动造成的挤压逆冲、地壳叠置增厚以及于峰期变形之后挤压减弱、应力松弛的后碰撞构造环境（Zhang *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2017）有关。

龙王江矿田区域地层自下而上有高涧群岩门寨组板岩、粉砂质板岩，南华系含砾砂质板岩、砂岩夹炭质板岩，震旦系板岩、硅质岩，寒武系炭质页岩、页岩、灰岩，奥陶系泥岩，二叠系灰岩，白垩系紫红色碎屑岩等（图 2a）。南华系与高涧群之间呈平行不整合接触，其形成于板溪末期（约 720Ma）发生的横向上强度不均衡的雪峰运动（柏道远等，2014）；石炭系与前泥盆系之间呈角度不整合接触（区内无出露），反映加里东陆内造山运动（Shu *et al.*, 2021）；白垩系与前白垩系之间，呈角度不整合或正断裂接触：角度不整合之下的地层为新元古代板溪群-古生界（图 2a），正断裂为控盆断裂主要发育于白垩纪断陷盆地边缘，反映白垩纪区域伸展事件。

区内地层及构造线走向总体呈 NE 向，NE 向褶皱、逆断裂及白垩纪断陷盆地组成基本构造格架（图 2a、b）。主要褶皱构造自南东往北西有中都复向斜、淘金坪复背斜、统溪河复向斜、山门背斜等，轴迹在 40° ~50°，轴面倾角 40° ~70°；背斜部位出露岩门寨组，向斜部位出露震旦系—奥陶系。

矿田范围地表无岩浆岩发育，其南、南东约 20km 处出露多期侵入的白马山复式花岗岩体，

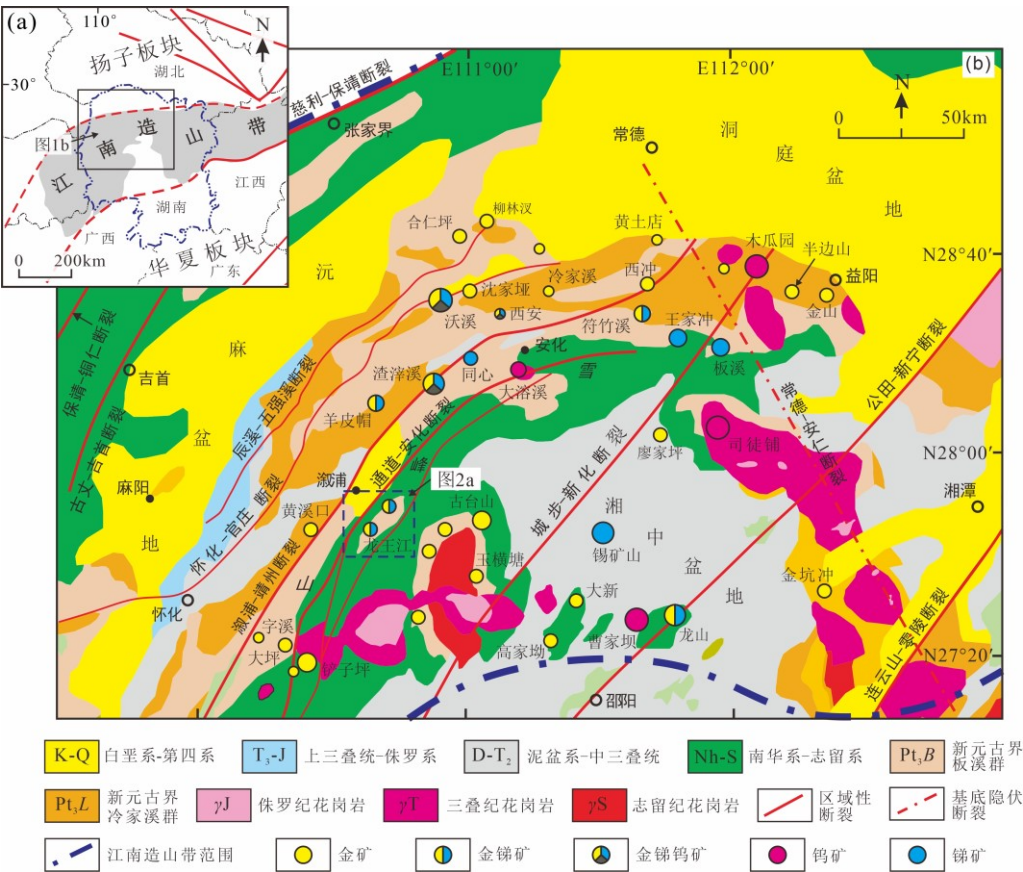


图 1 区域地质及金-锆-钨矿床分布

Fig. 1 Regional geology and distribution map of Au-Sb-W deposits

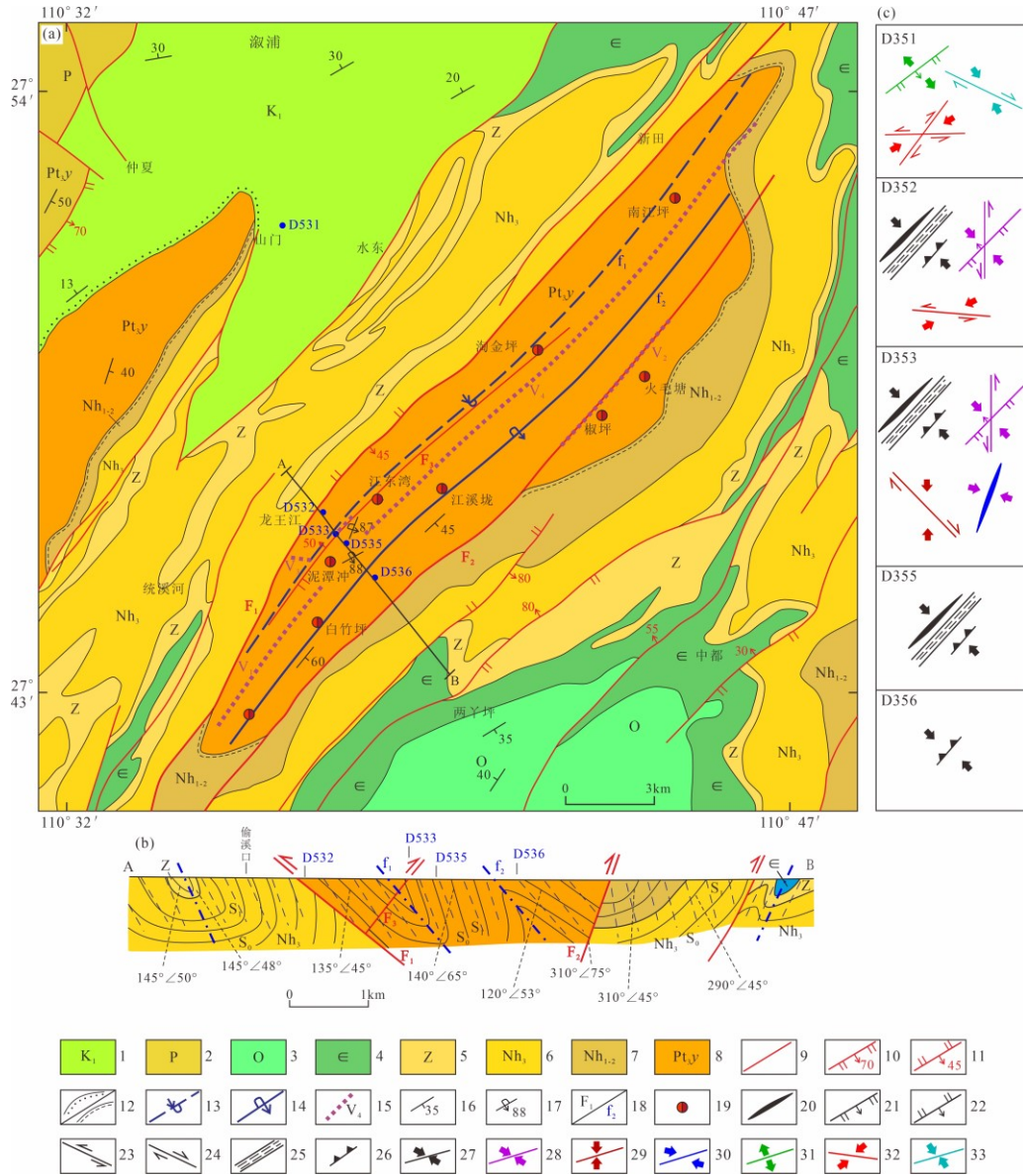


图2 龙王江金锑矿田及邻区地质图（a，据湖南省地质调查院，2017）、构造剖面图（b）及观察点上构造形迹与应力场方位（c）

Fig. 2 Geological map of the Longwangjiang Au-Sb ore field and adjacent areas (a, according to HIGS, 2017), structural profile (b), and structural features and stress field orientations at observation points (c).

1. 白垩系；2. 二叠系；3. 奥陶系；4. 寒武系；5. 震旦系；6. 上南华统；7. 下. 中南华统；8. 新元古代高洞群岩门寨组；9. 断裂；10. 正断裂及产状；11. 逆断裂及产状；12. 角度不整合界线/平行不整合界线；13. 倒转向斜轴迹；14. 倒转背斜轴迹；15. 矿脉及编号；16. 正常岩层产状；17. 倒转岩层产状；18. 断裂编号/褶皱编号；19. 矿床；20. 褶皱；21. 逆断裂或逆冲剪切破裂；22. 正断裂；23. 左行剪切断裂或破裂；24. 右行剪切断裂或破裂；25. 顺层剪切断裂；26. 板劈理；27. 加里东运动构造形迹及应力方位；28. 印支运动早幕（中三叠世晚期）构造形迹及应力方位；29. 印支运动晚幕（晚三叠世）构造形迹及应力方位；30. 早燕山运动（中侏罗世晚期）构造形迹及应力方位；31. 白垩纪构造形迹及伸展应力；32. 古近纪中晚期构造形迹及应力方位；33. 古近纪-新近纪构造形迹及应力方位。断裂名称：F₁—龙王江断裂（洞坪断裂）；F₂—黑土坡断裂；F₃—江湾断裂。褶皱名称：f₁—江湾倒转向斜；f₂—江湾倒转背斜

形成时代为加里东期、印支期和燕山期（李建华等，2014；刘贤红等，2025），矿区的龙王江断裂F₁往南西延伸与岩体相连通（图1b）。据物探资料，在矿区西南及下部可能有隐伏花岗岩体（柏道远等，2023a）。

1.2 矿田地质

矿田所在的淘金坪复背斜由江湾倒转向斜和南东面的江湾倒转背斜组成，导致向斜轴迹与

背斜轴迹之间区域岩层倒转、层面与劈理向 SE 陡倾，而其北西和南东侧岩层产状正常、层面与劈理向 SE 缓倾。该复背斜的北西、南东侧分别被龙王江断裂（洞坪断裂）（属区域通道-江口断裂组成部分，柏道远等，2014）和黑土坡断裂切割（图 2a、b），前者倾向 SE，后者倾向 NW，均为逆断裂。复背斜向北东、南西两端倾伏，中段陶金坪—火毛塘一带相对隆起。

区内自南西往北东主要发育有雁鹅界砷金矿、白竹坪砷金矿、泥潭冲金矿、江东湾金锑矿、江溪垅金锑矿、淘金坪金矿、南江坪金矿等锑砷金矿床（点），均分布于中部陡倾劈理化带或陡倾劈理化带向缓倾劈理化带的过渡部位（图2a、b；图3）；另有火毛塘和椒坪矿点分布于南东侧缓倾劈理带。根据控矿构造差异可分为以下几类矿床（尹大改等，2015；陈明辉等，2018）：

（1）受NNE~NE向剪切带控制的金锑矿床，包括龙王江（图3a）、江溪垅、江东湾、白竹坪等矿床，矿体产于陡倾劈理化带或陡倾与缓倾劈理化带过渡部位的剪切带内；剪切构造方向与区域劈理化带方向一致或小角度相交。金矿多产于剪切带及其上下盘蚀变岩中，辉锑矿则呈扁豆状分布于金矿脉的上部或下部。

（2）受EW向脆韧性剪切带（逆断层）控制的金矿床，以泥潭冲矿床为代表（图3b）。该矿床已发现11条金矿脉，石英矿体主要沿EW向断裂及其次级构造裂隙充填。主要矿脉V₃走向80°~110°，倾向S，倾角40°~50°；矿脉总长810m；有矿体5个，矿体长150~260m，厚0.10~3.26m，延深大于265m，并明显向东侧伏，侧伏角约45°。矿石中Sb品位为0.31%，Au品位平均为6.3g/t。金矿化主要有2期：早期石英脉沿NNE向~NE向劈理或剪切面理充填；晚期矿脉沿EW向剪切带及其次级构造裂隙充填，形成金的叠加富集期。

（3）受NNE~NE向与陡倾斜劈理化带（剪切带）产状一致的脆性剪切断裂带控制的金锑矿床，

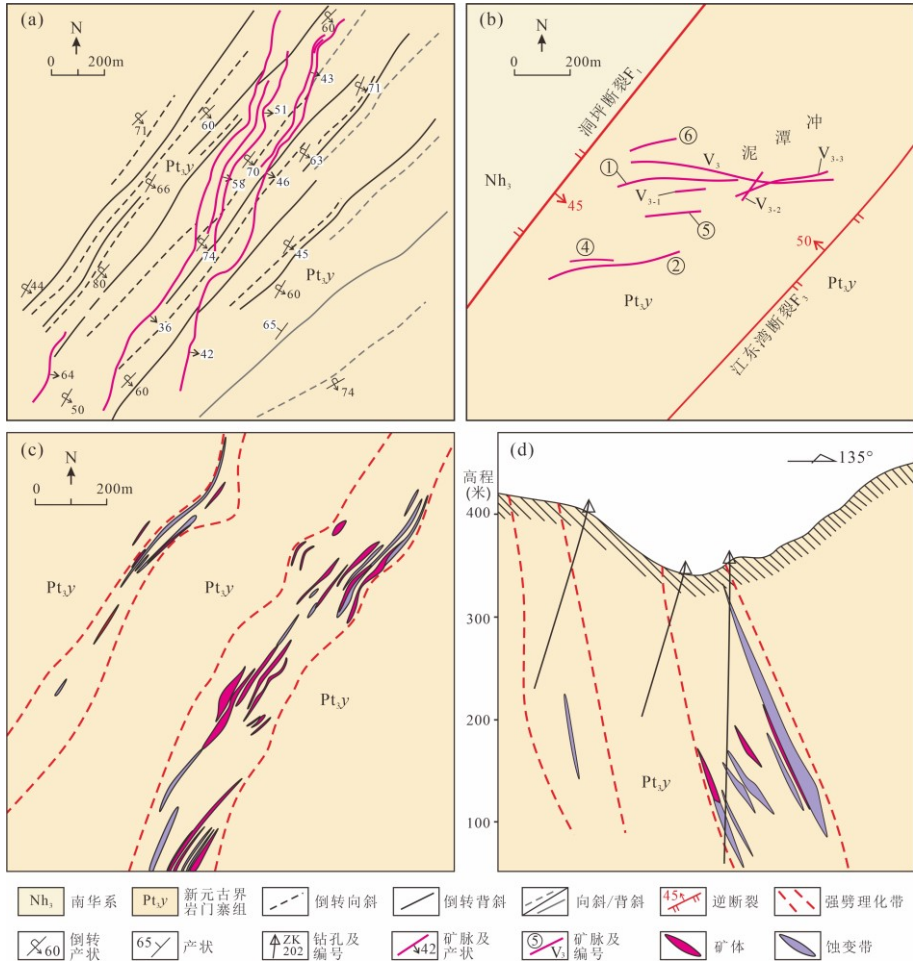


图3 龙王江金锑矿田典型矿脉（体）特征

Fig. 3 Typical ore vein characteristics of Longwangjiang Au-Sb ore field

a. 龙王江金锑矿床受NE~NNE向断裂控制的矿脉; b. 泥潭冲金锑矿床受EW向逆断裂控制的矿脉; c-d. 南江坪金锑矿床受NE~NNE向劈理化带(剪切带)控制的矿脉

以淘金坪、南江坪金矿床为代表。淘金坪金矿床脆性剪切断裂带长约1500m, 宽40~80m, 目前已发现4条含金石英脉带, 以V₄脉为主。地表所见矿脉一般由5~8条、厚5~30cm的石英脉及其蚀变带组成, 脉带厚度1.5~2.0m, 最厚8.0m, 有明显的分支复合现象。南江坪金矿产于脆性剪切断裂带中(图3c、d), 目前已查明3条构造蚀变带, 出露规模长1760~2200m、宽8~120m, 呈22°~45°走向, 倾向SE, 倾角51°~71°。

龙王江矿田矿体主要为含金-石英脉型, 如龙王江、泥潭冲、淘金坪等矿床, 少量为破碎带蚀变岩型, 如南江坪(陈明辉等, 2018)。矿石类型主要有石英脉型金矿石(包括少量锑金矿石)、破碎带型金矿石(包括部分锑金矿石)和蚀变岩型金矿。矿床围岩蚀变广泛发育, 主要蚀变类型有黄铁矿化、毒砂化和硅化, 其次为绿泥石化、碳酸盐化和绢云母化等。EW向矿体蚀变带一般为5~50cm, 最宽可达1.5m, 总体上呈现平行矿脉展布的线型蚀变带。大致可分为内、外两带, 内带主要为硅化、毒砂(黄铁矿)化, 与金矿化关系密切, 本身就是矿体; 外带主要为绢云母化、绿泥石化, 金含量低或无矿化现象。NNE~NE向石英脉型、破碎蚀变岩型的金、金锑矿床, 蚀变带宽10~25m, 最宽可达100m, 自矿脉向两侧蚀变大致为硅化、毒砂(黄铁矿)化、绢云母化环带状分布, 矿化程度与蚀变强度一致(陈明辉等, 2018)。与金锑矿化关系紧密的主要是毒砂化、黄铁矿化、硅化和绢云母化等(周超等, 2020)。前人研究表明(周超等, 2020; Zheng *et al.*, 2022), 主要成矿过程从早到晚可划分为3个阶段: 石英-黄铁矿、石英-硫化物-自然金阶段、石英-辉锑矿-方解石阶段。

2 构造变形序列

为了更好地厘定包括控矿构造在内的各类构造变形的序列和形成时代背景, 本次除针对矿田区新元古界岩门寨组外, 尚选择典型白垩系进行了野外露头构造的观察和解析(图2)。重点关注各类构造之间的叠加、改造、切错及限制关系, 以恢复包括控矿构造(褶皱、断裂、破裂)在内的各类构造形成的应力场(主要为最大主压应力方向)及其衍生次序(图2c)。结合前人有关区域主要变形事件及其构造体制(应力方位)方面的研究成果, 分析确定露头上各类构造形成的应力场特征和时代背景。

2.1 应力场恢复方法

文章涉及的构造变形形成的最大主应力方位确定方法如下: ①逆断裂、B型褶皱和轴面劈理形成的最大主应力垂直其走向(陈柏林等, 2011; 柏道远等, 2023b); ②Anderson断层模式以及前人大量的实际观测表明, 脆性剪切断裂或破裂形成的最大主压应力位于过擦痕并垂直于剪切破裂面的平面上、与擦痕呈30°左右交角。③石香肠构造形成最大主应力平行最大厚度而与岩层面垂直(王冉等, 2018)。

2.2 露头点构造解析

2.2.1 D531点

点处出露白垩系石门组紫红色厚层-块状含细砾杂砂岩剖面(图4a)。

剖面中段, 见3组近直立剪切破裂, 分别为NWW向右行剪切破裂L₁、近EW向左行剪切破裂L₂、NE向右行剪切破裂L₃(图4a)。其中, L₁切割L₂(图4b)、L₂与L₃互相切割或限制(图4a1, c), 表明L₂与L₃为共轭剪切破裂, 且其形成时代早于L₁。NWW向剪切破裂L₁断面较平直、发育水平擦痕, 正阶步示右行走滑(图4d), 反映NNW向挤压(图4a2、d)。近EW向剪切破裂L₂发育较多, 断面较粗糙, 正阶步示左行走滑(图4e); NE向剪切破裂L₃延伸规模较大, 局部密集发育形成NE向小断裂(图4f), 正阶步示右行走滑(图4g); 共轭剪切破裂L₂和L₃反映NEE向最大主应力(图4a1、c)。

剖面南段发育NEE向南倾小型正断裂F_a(图4a, 图4h), 带内S-C组构指示正滑兼左行, 其

上盘岩层相对下错约 1.2m (图 4i)，指示区域伸展事件。

2.2.2 D532 点

点处为一老窿，出露高涧群岩门寨组板岩，层、劈一致，产状为 $130^\circ \angle 43^\circ$ 。见上、下 2 条倾向 SE 的近顺层脆-韧性剪切断裂 (图 5a、b)，下部剪切带 (F_a) 总体顺劈理发育，局部小角度切割劈理且产状较劈理稍陡 (图 5b)，上部剪切带 (F_b) 中发育剪切褶皱，枢纽水平，形态指示上盘逆冲 (图 5c)。 F_a 与 F_b 应形成于岩层初始变形期的 NW 向挤压，变形受不同层次滑脱面控制 (张进等，2010；柏道远等，2014)。老窿内矿化石英脉沿下部剪切带 F_a 充填，同时受一组切割劈理面及 F_a ，走向 NE、倾向 NW 的剪切破裂 F_c (产状为 $290^\circ \sim 310^\circ \angle 40^\circ \sim 65^\circ$) 限制 (图 5d)， F_c 应为后期 NW 向挤压下形成的逆冲破裂。

该点至下点构造特征如下：①点南约 20m 发育切割先期劈 (层) 理面的 SN 向左行剪切破裂 L_1 和近 EW 向左行剪切破裂 L_2 (图 5a1、a2) 2 组破裂，后者左行切错前者形成较晚，错距可达 1cm 左右 (图 5e)。 L_1 产状为 $85^\circ \sim 95^\circ \angle 75^\circ$ 左右，反阶步指示左行 (图 5f)，反映 NW 向 $\sim$ NNW 向挤压 (图 5a1、f)； L_2 产状为 $10^\circ \angle 85^\circ$ 左右，反阶步指示左行走滑 (图 5g)，反映 NEE 向挤压 (图 5a2、g)。(②至偷溪口，层理和劈理仍缓倾 (图 5h)，产状为 $S_0 // S_1: 120^\circ \angle 35^\circ \sim 45^\circ$ 。③至泥潭冲东约 300m 公路边，进入陡倾劈理化带 (图 5i)，产状为 $S_0 // S_1: 140^\circ \angle 86^\circ$ ，岩层倒转。据岩层产状特征，偷溪口至此处之间存在一轴面东倾的倒转向斜 (图 2b)，指示早期 NW 向挤压。

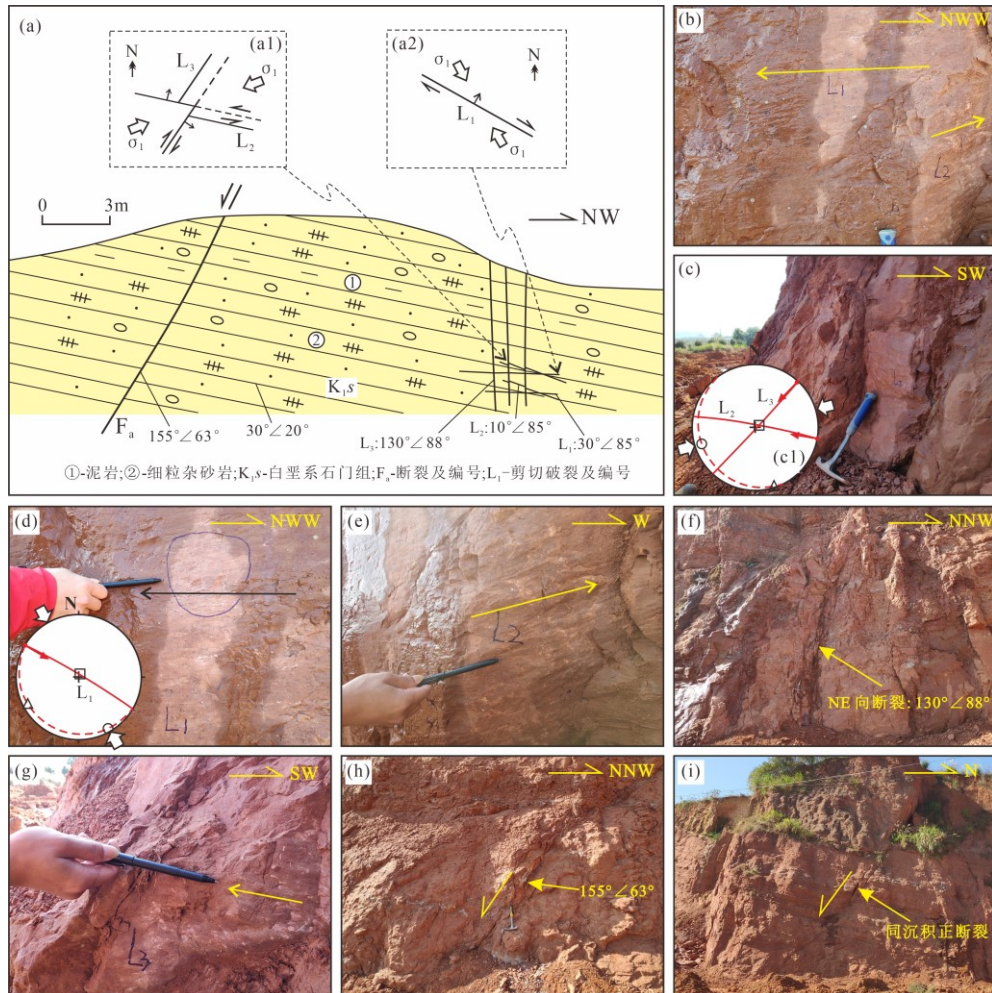


图 4 D351 点断裂、剪切破裂特征及其应力图解

Fig. 4 Fault and shear fracture characteristics and its stress diagram at D351

a. NWW 向剪切破裂 L_1 切割近 EW 向剪切破裂 L_2 ；b. EW 向剪切破裂 L_2 与 NE 向剪切破裂 L_3 互相切割和限制；c. 正阶步示 NWW 向剪切破裂 L_1 右行走滑；d. 正阶步示近 EW 向剪切破裂 L_2 左行走滑；e. 与 L_3 对应的 NE 向断裂 F_2 ；f. 正阶步示 NE 向剪切破裂 L_3 右行走滑；g. NE 向同沉积正断裂 F_1 ；h. NE 向同沉积正断裂 F_1 错位效应；发育多个裂面时，产状取倾向和倾角的加权平均值；应力图解中“o”示最大主

应力 σ_1 ; “□”示中间主应力 σ_2 ; “△”示最小主应力 σ_3 ; “→”示上盘运动方向; 黑边宽箭头示挤压应力的水平方位; 下同。

2.2.3 D533 点

该点见江东湾断裂 F_3 出露, 表现为一宽约 12.5m, 走向 NE、倾向 NW 的断裂带 (图 6a)。断裂带上盘 (北西盘) 为岩门寨组板岩, 层理 S_0 ($112^\circ \angle 87^\circ$) 较劈理 S_1 ($110^\circ \angle 75^\circ$) 陡, 表明岩层倒转。岩石中发育一组 NW 向右行剪切破裂 L_1 , 产状为 $45^\circ \sim 55^\circ \angle 75^\circ \sim 85^\circ$, 反阶步指示破裂右行剪切 (图 6b), 反映近 SN 向挤压 (图 6a1、b)。靠近断裂, 见顺劈理或剪切面发育的石英脉 (图 6c), 前者厚 2~10cm, 产状 $123^\circ \angle 88^\circ$; 同时见一组 SN 向剪切破裂 L_2 , 产状为 $80^\circ \sim 85^\circ \angle 88^\circ$, 正阶步指示左行走滑 (图 6d), 反映 NW 向挤压 (图 6a2、d)。断裂下盘 (南东盘) 为岩门寨组板岩, 顺层的直立劈理发育, 产状 $S_0 // S_1$: $130^\circ \angle 88^\circ$ 。

断裂带自北西往南东分为硅化破碎带 (I带)、板岩断夹块带 (II带)、硅化破碎带 (III带) 等 3 个带。硅化破碎带 I 带: 宽约 5m。其顶界面产状为 $305^\circ \sim 315^\circ \angle 50^\circ$ 左右。带内先期板岩劈理及剪切面理产状总体直立; 与断裂同产状的倾向 NW 的次级裂面切割先期劈理及剪切面理 (图 6e)。含矿石英脉非常发育; 脉体厚一般 10~30cm, 主要顺先期剪切面理发育。NNE 向石英脉常因后期强挤压而形成轴向近水平的石香肠 (图 6f), 其长约 20~40cm, 宽 5~20cm, 且常见石英脉体和板岩因后期构造变形叠加而产生破碎和 NNE 向揉皱变形 (图 6g)。板岩断夹块 II 带: 宽约 3m, 带内为板岩断夹块, 先期劈理和剪切面理极为发育 (图 6h), 其产状为 $310^\circ \angle 85^\circ$ 。带内发育 6 条顺剪切面

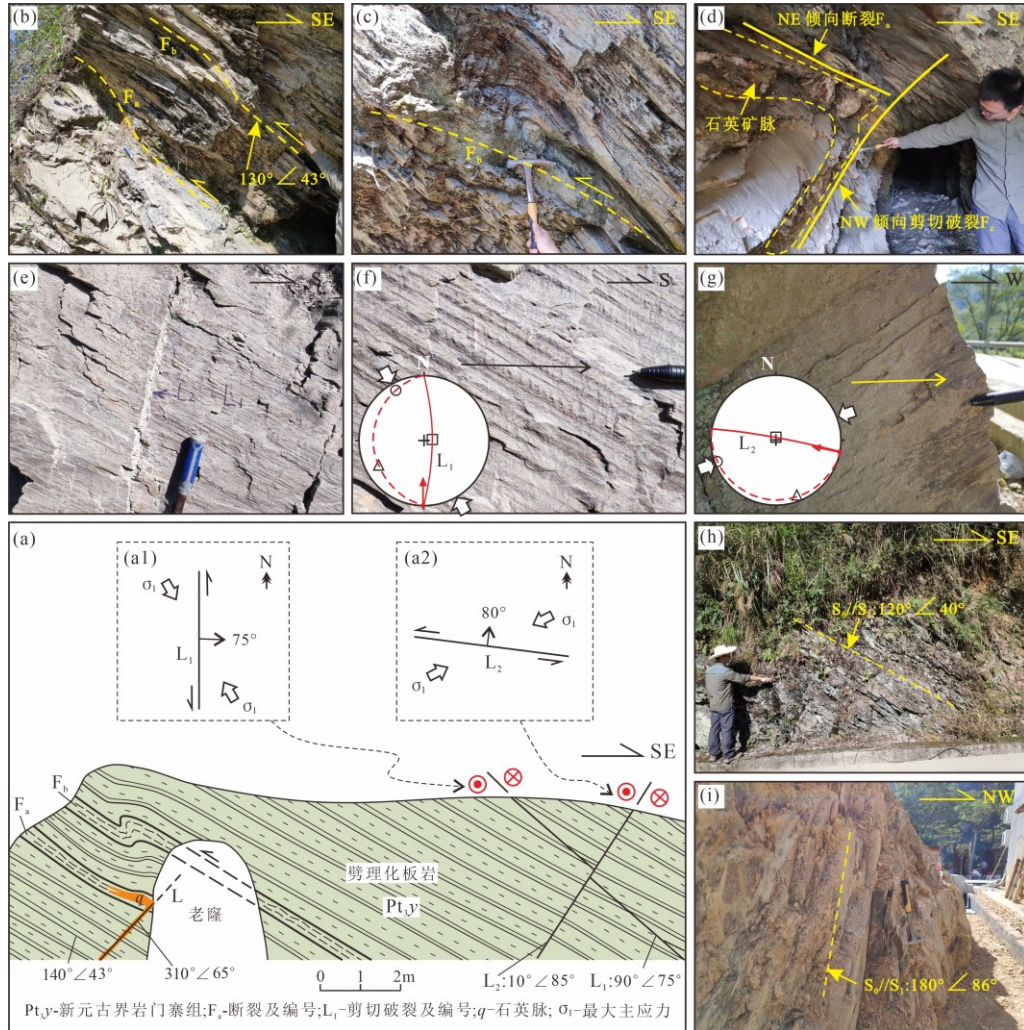


图5 D532点及其南 (南东) 面构造变形特征

Fig. 5 Structural deformation characteristics at D532 and its South (Southeast) Area

a. 倾向 SE 脆韧性剪切断裂 F_1 、 F_2 ; b. 剪切断裂 F_2 中剪切褶皱; c. 倾向 SE 脆韧性剪切断裂 F_1 与倾向 NW 剪切破裂控制石英脉; d. EW 向剪切破裂 L_2 左行切错 SN 向剪切破裂 L_1 ; e. 反阶步示 SN 向剪切破裂 L_1 左行; f. 反阶步示 EW 向剪切破裂 L_2 左行; g. 偷溪口缓倾面理;

理发育的含石英脉，脉宽 3~10cm，具石香肠化。硅化破碎带III带：宽约 4.5m，总体特征与I带相近。其底板产状为 $320^{\circ}\angle 40^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 。带内板岩中先期劈理或剪切面理产状为 $135^{\circ}\angle 80^{\circ}$ 左右，剖面上因波状弯曲而具变化，局部可向 NW 陡倾。近底板处发育一组产状与底板一致的倾向 NW 的次级裂面，裂面切割先期劈理和剪切面理（图 6i）。带内石英矿脉非常发育，脉体产状受早期剪切面理和倾向 NW 的后期裂面控制，具石香肠化、碎裂化。

以上特征显示，断裂 F_3 为后期 NW 向挤压下形成的逆断裂（图 6a3）；石英脉限制于 F_3 内，成矿发生于 F_3 同期或之后；NNE 向轴向近水平的石英脉香肠化反映成矿后的 NWW 向挤压。

2.2.4 D534 点

点处为岩门寨组条带状粉砂质板岩，见水平纹层（图 7a），岩层 S_0 缓倾（产状为 $280^{\circ}\angle 40^{\circ}$ ）而劈理 S_1 陡立（产状为 $120^{\circ}\angle 85^{\circ}$ ），指示产状正常（图 7b、c）。

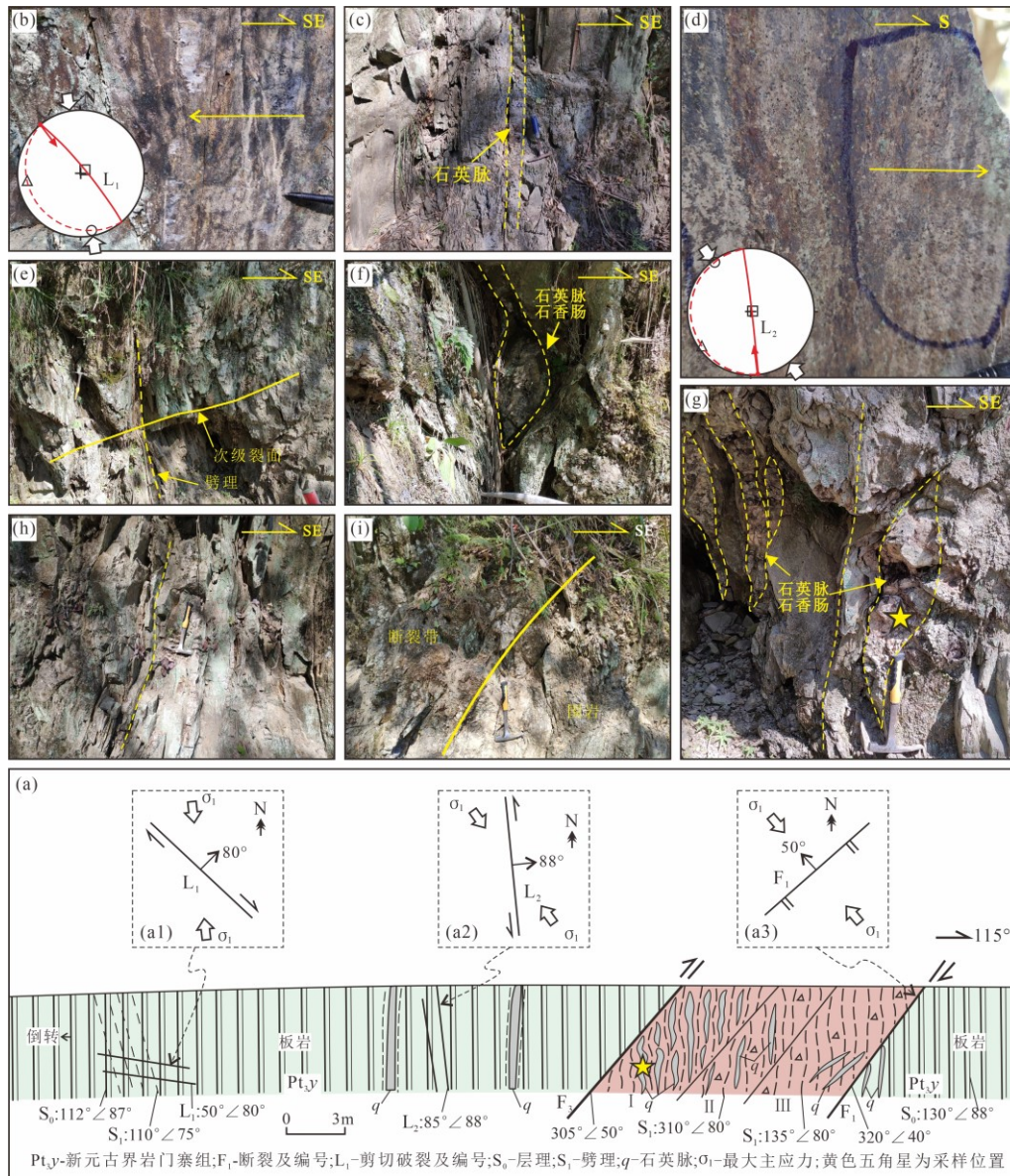


图 6 D533 点构造特征及采样位置

Fig. 6 Deformation Characteristics and Sampling Location at D533

a. 反阶步示 NW 向剪切破裂 L_1 右行；b. NE 向断裂 NW 盘顺面理发育的石英脉；c. 正阶步示 SN 向剪切破裂 L_2 左行；d. 断裂带I带硅化破碎带特征；e. 断裂带I带石英脉因挤压形成的石香肠；f. 断裂带I带中石英脉体破碎及揉皱变形；g. 断裂带II带板岩特征；h. 断裂带III带硅化破碎带中印支期 NW 倾裂面。黄色五角星处为石英脉锆石定年采样位置。

2.2.5 D535 点

点处为岩门寨组粉质板岩、板岩。层面 S_0 产状为 $160^\circ \angle 88^\circ$ ，劈理 S_1 产状 $155^\circ \angle 75^\circ$ ，层陡劈缓，表明岩层产状倒转（图 7d）。发育一 NE 向断裂带，产状为 $130^\circ \angle 70^\circ$ 左右。破碎带宽约 2.5m，带内发育多条顺剪切面理的石英脉，脉宽一般 3~20cm，产状 $140^\circ \sim 155^\circ \angle 75^\circ$ 左右。石英脉中发育 NE 向和 NW 向 2 组节理，产状分别为 $125^\circ \angle 64^\circ \sim 75^\circ$ 、 $200^\circ \sim 205^\circ \angle 80^\circ$ 左右，可能为共轭节理并指示 NE 向挤压（图 7e）。

2.2.6 D536 点

点处为岩门寨组条带状粉砂质板岩，劈理 S_1 较发育（图 7f），岩层 S_0 产状为 $140^\circ \angle 36^\circ$ ，劈理 S_1 产状为 $135^\circ \angle 60^\circ$ ，层缓劈陡（图 7g），指示岩层产状正常（图 7h）。

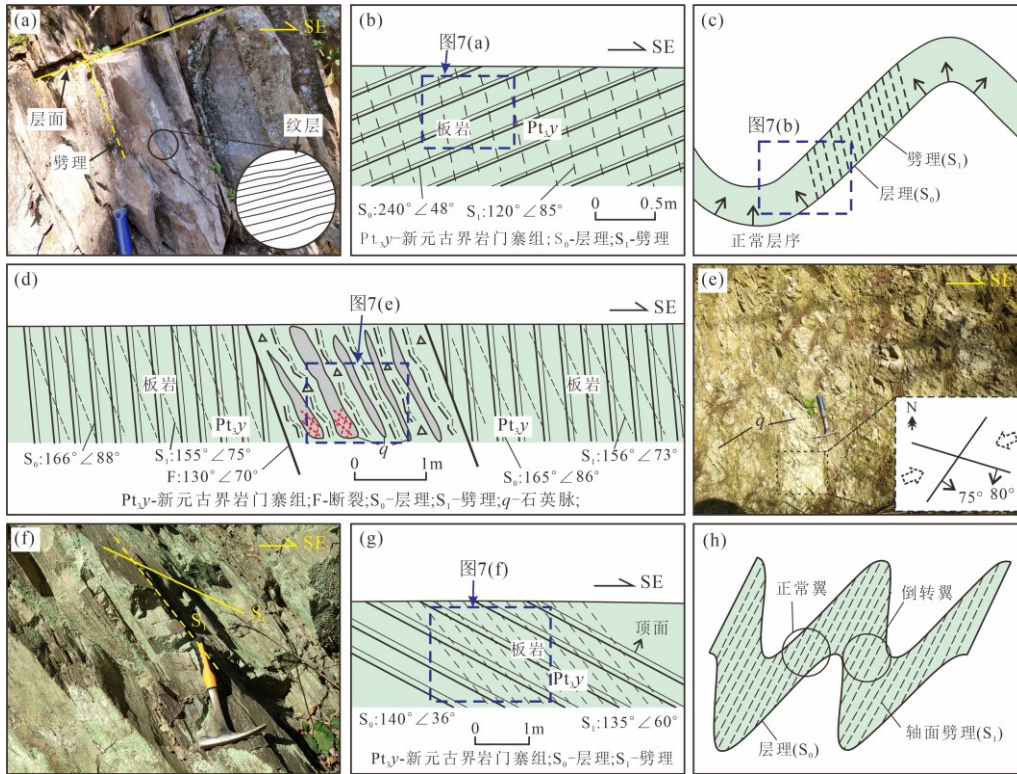


图 7 D534—D536 点构造变形特征及层劈关系示意图

Fig. 7 Diagram of structural deformation characteristics and bedding and cleavage relationships at D354-D356

a. D354 点层缓劈陡示产状正常；b. D354 点剖面；c. 正常产状层劈关系（李玮等，2025）；d. D355 点剖面；e. D355 点 NE 向断裂带及石英脉中节理应力图；f. D356 点层缓劈陡示产状正常；g. D356 点剖面；h. 轴面劈理与产状关系（陈柏林等，2011）

2.3 构造变形序列

将前人研究有关区域主要构造事件的主应力场与区域规模褶皱、断裂和野外露头所见各类构造反映的应力场比较，结合构造卷入地层和蚀变地质体时代以及不同构造的切错、叠加、改造关系，系统厘定研究区构造变形序列，确定了研究区自早至晚经历了 6 期主要变形事件（ $D_1 \sim D_6$ ）及其形成构造背景（图 2c，图 8；表 1）。

D_1 变形期为志留纪晚期加里东运动 NW~NWW 向挤压，卷入新元古界-下古生界，形成江东湾向斜和江溪垄背斜等 NE 向褶皱、NE 向顺层为主的脆韧性剪切带、NE~NNE 向板劈理等，其中脆韧性剪切带是龙王江矿区的主要含矿断裂。华南加里东运动影响范围波及整个江南隆起及其以东、以南大部分地区，且都造成相应地层的强烈褶皱和角度不整合，其总体存在由南向北挤压的特点（杜远生和徐亚军，2012），但受钦杭结合带与扬子陆块间弧形边界控制（柏道远等，2024），研究区构造体制为 NW~NWW 向挤压。区域上造成前泥盆系的褶皱、抬升以及泥盆系跳马涧组与先期地层的角度不整合（Zhang *et al.*, 2013）。本期变形的构造背景为早古生代晚期陆内造山运动

表 1 龙王江金锑矿区及外围地区构造变形序列

Table 1 Structural deformation sequence of Longwangjiang Au-Sb ore field and adjacent areas

时 代	变形期次	构造变形	实 例	区域构造体制	形成构造动力背景
E ₂ -E ₃	D ₆	EW 向左行剪切破裂 NE 向右行剪切破裂、断裂	D531、D532 D531	NEE~NE 向挤压	印度-欧亚板块碰撞 远程效应
K	D ₅	NEE 向正断裂、溆浦断陷盆地	D531	区域伸展	古太平洋板块俯冲 弧后伸展等
J ₂ 晚期	D ₄	NNE 向石英脉石香肠 NNE 向卷入面理和石英脉的褶皱	D533 D533	NWW 向挤压	早燕山运动, 古太平洋 洋板块俯冲
T ₃	D ₃	NW 向右行剪切破裂 EW 向逆断裂 (含矿)	D533 泥潭冲 V ₃ 脉	SN 向挤压	印支运动晚幕, 陆缘 碰撞远程效应
T ₂ 晚期	D ₂	NNE~NE 向逆冲剪切破裂、断裂 SN 向左行剪切破裂 NE~NNE 向板劈理	D532、D533; F ₁ (图 2) D532、D533 D532、D533、D535、 D536	NWW~NW 向 挤压	印支运动早幕, 陆内 造山
S 晚期	D ₁	NE 向顺层脆韧性剪切带 (含矿) NE 向褶皱及断裂 F ₁ 和 F ₂	D532、D533、D535 D532 南东、D536 北西; f ₁ 、f ₂ (图 2)	NW~NWW 向挤压	加里东运动, 扬子与 华夏陆内汇聚

(Zhang *et al.*, 2013; Shu *et al.*, 2021), 可能为华南板块对冈瓦纳板块聚合的远程效应(杜远生和徐亚军, 2012)。

D₂ 变形期为中三叠世晚期印支运动早幕 NWW~NW 向挤压, 形成 NNE~NE 向逆冲断裂和剪切破裂、SN 向左行剪切破裂等。龙王江矿床 NNE 向含矿断裂(图 3a)及江东湾断裂 F₃ (D533) 即形成于该期。区域上, 该期变形造成泥盆系—中三叠统褶皱, 在湘中上古生界中有大量形成于该期的 NE 向褶皱(Zhang *et al.*, 2013; 柏道远等, 2024)。本期变形的构造背景为华南大陆缘碰撞触发的扬子陆块与华夏古陆的继发性陆内造山(Zhang *et al.*, 2013; 李建华等, 2014; Shu *et al.*, 2021, 柏道远等, 2024)。

D₃ 变形期为晚三叠世印支运动晚幕 SN 向挤压, 形成 NW 向右行剪切破裂和 EW 向逆断裂等。泥潭冲金矿的主要含矿构造 EW 向逆断裂形成于该期。区域上本期构造体制为近 SN 向挤压, 溆浦—靖州断裂、通道—安化断裂、城步—新化断裂等先期 NNE 向断裂产生左行斜向逆冲(李建华等, 2014); 湘中凹陷内(柏道远等, 2024)发育近 EW 向复式褶皱。本期变形可能为印支期华南南、北陆缘碰撞的远程效应(李建华等, 2014)。

D₄ 变形期为中侏罗世晚期早燕山运动 NWW 向挤压, 形成 NNE 向石英脉石香肠、卷入面理和石英脉的 NNE 向小揉皱。华南构造体制在早—中侏罗世经历了从古特提斯域到古太平洋域的重大转折(Dong *et al.*, 2019), 区域发生早燕山运动总体呈 NWW~近 EW 挤压, 江南造山带湖南段均受其影响而形成 NNE 向褶皱和逆断裂、NW 向左行走滑断裂等构造形迹(柏道远等, 2021; Li *et al.*, 2022)。本变形期与古太平洋板块(或伊泽奈崎板块)向西俯冲有关(Zhang *et al.*, 2013)。

D₅ 变形期为白垩纪区域 NW—SE 向伸展, 形成 NEE 向正断裂和溆浦断陷盆地。区域上为 NW—SE 伸展体制, 华南岩石圈发生大规模伸展减薄与岩浆活动, 湖南于本阶段形成了大量以 NNE~NE 向的断陷盆地。白垩纪区域伸展变形的动力机制可能与古太平洋板块俯冲相关的弧后扩张有关(Li *et al.*, 2014)。

D₆ 变形期为古近纪中晚期 NEE 向~NE 向挤压, 形成 EW 向左行剪切破裂、NE 向右行剪切破裂和断裂。中新世之前印度—欧亚板块的碰撞致使亚洲东部形成一系列的右行走滑断裂(Zhang *et al.*, 2013), 华南内部整体受 NE 向挤压应力影响。湖南溆浦—靖州断裂、通道—安化断裂等 NNE 向断裂因此产生右行走滑(张进等, 2010; 李建华等, 2014), 湘西北沅麻盆地(Li *et al.*, 2014)、湘中地区(柏道远等, 2023a, 2024)均发育本期构造形迹。该变形期构造背景应为印度板块与亚洲大陆碰撞的远程效应(张进等, 2010; Zhang *et al.*, 2013; 李建华等, 2014)。

上述6期构造变形事件的先后次序受露头点构造解析及区域资料约束： D_2 变形期NE向逆冲断裂（破裂）、SN向左行剪切破裂切割 D_1 变形期NE~NNE向近顺层脆韧性剪切断裂或板劈理 S_1 （ D_{532} 、 D_{533} 点）； D_6 变形期EW向左行剪切破裂切错 D_2 变形期SN向左行剪切破裂（ D_{532} ）； D_4 变形期的NNE向石英脉香肠构造发育于 D_3 变形期的NE向断裂带中（包含NE向次级断裂及卷入的 D_1 变形期劈理 S_1 ，指示 D_4 晚于 D_3 ， D_{533} ）； D_4 变形期的NNE向小褶皱（ D_4 ）卷入 D_1 变形期的NE~NNE向劈理 S_1 （ D_{533} ）； D_3 变形期EW向含矿断裂（以泥潭冲V3脉为代表）被 D_1 期断裂 F_1 和 D_2 期断裂 F_3 限制，指示 D_3 期晚于 D_2 和 D_1 期；龙王江矿床形成于 D_2 期NNE向含矿断裂切割 D_1 期的褶皱及劈理（图3a）。需要指出的是， D_{531} 点NNW向右行走滑断裂（图2c，图4a2）可能指示区域上晚于 D_6 期的古近纪—新近纪NNW向挤压事件（李彬等，2022）。

图 8 龙王江矿田及外围地区变形序列与成矿事件

3 构造与成矿年代学

NWW 向挤压。因此，对香肠化的含石英脉中的热液锆石进行定年可确定成矿时间，并可对含矿构造形成的时代进行约束，从而为区内构造变形与成矿序列的建立提供可靠的时代依据，并为探讨区域成矿构造背景奠定基础。

3.2 测试方法

样品锆石分选、制靶和阴极发光（CL）照相均在南京宏创地质科技服务有限公司完成。除拍摄 CL 照片，还对样品进行了透射光和反射光照相，以便更好地了解锆石内外部特征，便于后续定年测试。锆石 U-Pb 定年在中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学实验室完成，所仪器为 RESOLutionLR/S155193nmArF 准分子激光剥蚀系统和 iCAP-Q 型电感耦合等离子体质谱的联用装置（LA-ICP-MS），详细实验流程参见邱啸飞（2022）。采用软件 ICPMSDataCal（ver.10.8）进行数据处理分析（Liu *et al.*, 2008），U-Pb 年龄计算和谐和图的绘制采用软件 Isoplot3.0 完成（Ludwig, 2003）。考虑到 ²⁰⁷Pb 放射性子体同位素的累计问题，讨论中对 U-Pb 年龄小于和大于 1200Ma 的数据分别选取 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄和 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄。

3.3 测试结果

对 28 个锆石颗粒进行了 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测定，测试结果见表 2。锆石阴极发光图像、U-Pb 年龄统计直方图、年龄谐和图及年龄加权平均值见图 9。28 个测年结果中，有 2 个年龄数据谐和度低于 85%而未被采用。26 个有效年龄数据落在谐和线之上或附近（图 9c），呈现出约 2.5Ga、

表 2 含矿石英脉锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb analysis results of zircon from ore-bearing quartz veins													
测点	含量 (10 ⁻⁶)		Th/U	同位素比值								年龄 (Ma)	
	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
D533													
-1	509	450	1.13	0.06500	0.00074	1.09966	0.02091	0.12271	0.00218	776	24	746	13
-2	126	1970	0.06	0.11235	0.00083	5.34752	0.09297	0.34463	0.00565	1839	13	1909	27
-3	246	2183	0.11	0.12764	0.00226	6.79830	0.27385	0.37752	0.00954	2066	31	2065	45
-4	69	147	0.47	0.06722	0.00114	1.24996	0.02454	0.13517	0.00210	856	35	817	12
-6	174	368	0.47	0.06626	0.00080	1.23751	0.02071	0.13545	0.00199	815	24	819	11
-7	168	185	0.91	0.06561	0.00104	1.14507	0.02415	0.12671	0.00216	794	33	769	12
-8	107	202	0.53	0.07040	0.00091	1.52779	0.02960	0.15695	0.00224	939	22	940	12
-9	38	44	0.87	0.06672	0.00181	1.15341	0.03063	0.12676	0.00262	828	56	769	15
-10	13	907	0.01	0.16231	0.00125	10.44678	0.16020	0.46584	0.00643	2480	8	2465	28
-11	295	411	0.72	0.16875	0.00118	11.08197	0.18841	0.47553	0.00774	2546	21	2508	34
-12	254	169	1.50	0.07097	0.00111	1.25292	0.02529	0.12791	0.00187	967	32	776	11
-13	114	119	0.95	0.06648	0.00120	1.24504	0.02407	0.13615	0.00200	820	38	823	11
-14	110	798	0.14	0.15572	0.00122	9.40830	0.18052	0.43757	0.00802	2410	18	2340	36
-15	88	202	0.43	0.07057	0.00104	1.20511	0.02290	0.12416	0.00213	946	31	754	12
-16	132	283	0.47	0.12100	0.00103	5.36669	0.08986	0.32112	0.00485	1972	10	1795	24
-17	170	221	0.77	0.06758	0.00095	1.20761	0.01910	0.12972	0.00167	857	28	786	10
-19	367	255	1.44	0.06684	0.00105	1.18924	0.02199	0.12919	0.00194	833	33	783	11
-20	759	875	0.87	0.06600	0.00064	0.85938	0.01120	0.09430	0.00100	806	20	581	6
-21	90	1409	0.06	0.11224	0.00091	5.16030	0.09134	0.33277	0.00542	1836	15	1852	26
-22	239	291	0.82	0.06640	0.00079	1.26849	0.02358	0.13847	0.00226	820	24	836	13
-23	177	197	0.90	0.06869	0.00118	1.26106	0.02513	0.13347	0.00212	900	35	808	12
-24	105	136	0.77	0.06813	0.00119	1.26129	0.02613	0.13452	0.00223	872	37	814	13
-25	1006	2284	0.44	0.05266	0.00063	0.24354	0.00434	0.03356	0.00057	322	28	213	4
-26	665	1304	0.51	0.05566	0.00073	0.25594	0.00529	0.03325	0.00054	439	34	211	3
-27	262	315	0.83	0.06689	0.00091	1.08336	0.02372	0.11733	0.00222	835	29	715	13
-28	96	113	0.85	0.06712	0.00124	1.15843	0.03305	0.12536	0.00307	843	16	761	18

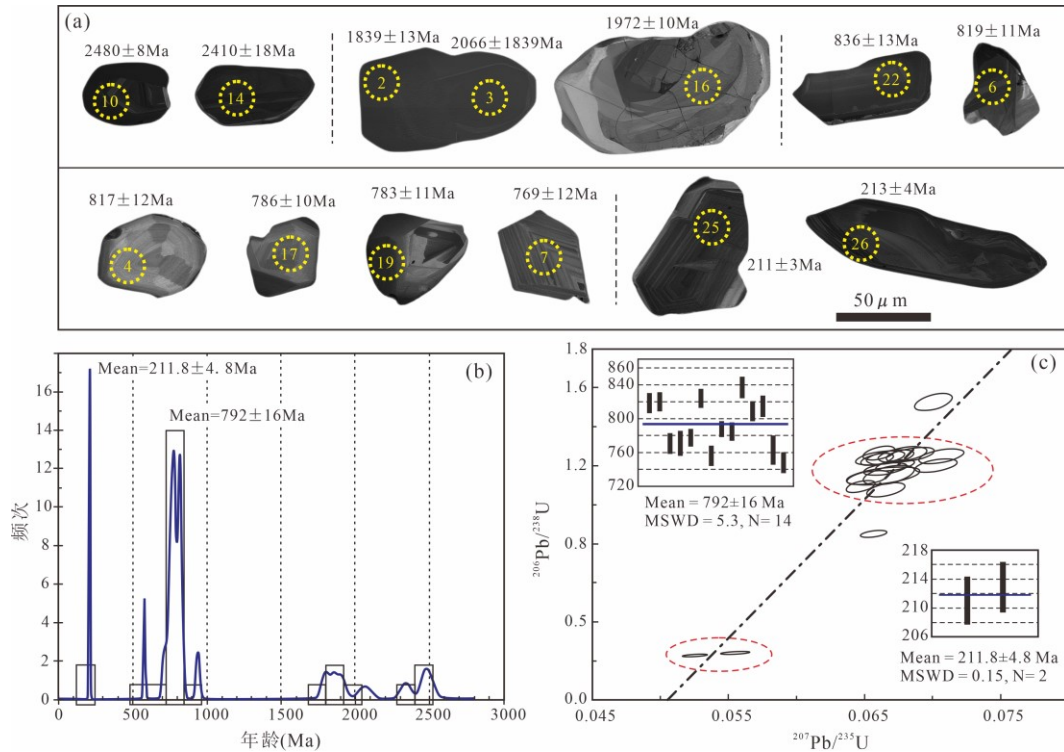


图 9 龙王江矿田含矿石英脉锆石阴极发光 (CL) 图像 (a)、U-Pb 年龄频谱图 (b) 及年龄谱和图与加权平均值 (c)
Fig. 9 Cathodoluminescence (CL) image (a), U-Pb age spectrum (b), concordia diagram, and weighted average of zircon from the ore-bearing quartz veins in the Longwangjiang ore field

1.8~2.0Ga、800Ma、200Ma 的峰值 (图 9b)。其中, 年龄约 2.5Ga 的锆石颜色较暗、粒径在 50~75 μm 之间, 环带发育较少 (图 9a); 1.8~2.0Ga 的锆石颜色较暗或较亮、粒径在 40~120 μm 之间, 具核边结构而环带不明显, 锆石破碎且有一定的磨圆; 800Ma 左右的锆石颜色深浅不一, 大多在 40~80 μm 之间, 呈板条、短柱、不规则状等多种形态, 部分发育典型的岩浆锆石环带, 部分具有明显的磨圆特征, 该部分锆石的年龄加权平均值为 792 $\pm$ 16Ma (图 9c); 200Ma 左右锆石颜色较暗, 大小在 80~150 μm 之间, 呈板条状, 发育环带结构, 该部分锆石的年龄加权平均值为 211.8 $\pm$ 4.8Ma (图 9c)。

4 讨 论

4.1 成矿时代

矿床形成时代是正确认识矿床成因的重要基础 (Xu *et al.*, 2017; Zeng *et al.*, 2023), 并对指导找矿勘查具有重要意义。由于定年矿物 (特别是与成矿直接相关) 的难以获取, 脉状金矿床的成矿时代厘定一直存在很大挑战。事实上, 通过细致的矿田构造解析工作和含矿构造形成背景分析, 获得研究区的变形序列可为成矿提供有效的时代约束 (柏道远等, 2023a, 2023b, 2023c; Li *et al.*, 2022), 如果与同位素成矿年代学研究相结合可获得可靠的成矿时代背景, 同时两种方法的研究结果可相互印证。如 Li *et al.* (2022) 发现湘西沃溪金锑矿床主要矿体均受中生代 NE~NNE 向褶皱控制, 认为除前人认为的加里东期成矿有更重要的中生代成矿, 被近年来获得的大量原位高精度燕山期成矿年龄 (142~132Ma, Li *et al.*, 2022; 李彬等, 2024) 证实; 柏道远等 (2023b) 指出湘西渣滓溪锑钨矿床中晚三叠世断裂是重要的含矿构造, 进而提出该矿除前人提出的印支期成矿尚存燕山期成矿, 被之后的白钨矿原位 U-Pb 年龄 (158~151Ma, Wang *et al.*, 2024) 证实。本文厘定的变形序列表明 (图 8), 龙王矿田主要的含矿构造有形成于 D1 变形期 (志留纪晚期) 的 NE 向层间脆韧性剪切带 (如 D532 观察点 F_a、F_b)、陡倾的劈理带 (如 D533 观察点的图 6a 采样处), 形成于 D2 变形期

（中三叠世晚期）NNE~NE向逆断裂（如D533观察点F₃）以及形成于D3变形期（晚三叠世早期）的EW向逆断裂（泥潭冲V3脉）。因此，成矿时间被限定在晚三叠世之后。D533观察点上陡倾的石英矿脉发生了石香肠化并卷入NNE向小揉皱，指示成矿后的NWW向挤压（D4，中侏罗世）。由此，构造变形序列的厘定可将区内金（锑）成矿的时限限定在D3变形期和D4变形期之间的晚三叠世-早侏罗世。

流体和流体饱和熔体中可直接形成热液锆石，热液活动也可使先期锆石形成增生边（Zhai *et al.*, 2022）。因此，热液锆石 U-Pb 定年是直接确定成矿时代和有效识别多期热液成矿事件的有效工具（Li *et al.*, 2018）。本文香肠化含石英英脉中的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果显示约 2.5Ga、1.8~2.0Ga、710~850Ma、210Ma 的年龄峰值（图 9）。年龄大于 710Ma 的锆石无论是颗粒大小、颜色明暗、环带发育程度以及 Th/U 比值（0.1<大部分<1.0，少量<0.1 或>1.0）均呈现出多样性，同时部分锆石呈现一定程度磨圆和碎裂，指示其为热液上升过程中卷入基底或围岩（岩门寨组及以下层位）的碎屑锆石（邱啸飞，2022），其意义在此不做过多讨论。但值得指出的是，其中~800Ma（平均值 792±15Ma）的年龄记录了扬子和华夏板块拼贴碰撞相关的岩浆活动（Shu *et al.*, 2021）。热液锆石多具有暗沉的 CL 图像，不仅会发育与岩浆锆石类似的振荡环带或扇形分带结构，当流体中富含 CO₂ 时还可形成与岩浆锆石一致的高 Th/U 比值（Zhai *et al.*, 2022）。而 210Ma 左右的锆石 CL 图像形态较规则、颜色较暗、环带结构发育，具有上述典型热液锆石特征。其 Th/U 比值较高在 0.44~0.51 之间，可能与成矿流体中富含 CO₂（周超等，2020）有关。通常认为热液锆石中具有较高的轻稀土含量和较低的(Ce/Ce*)与(Sm/La)_N 比值（Hoskin, 2005; Li *et al.*, 2018），但由于锆石极易受到微米级矿物包裹体（如磷灰石、钛石、独居石等）的污染，其指示意义往往不明确（Zhong *et al.*, 2018）。本文中 210Ma 的锆石微量元素主要落入岩浆成因锆石的范围（图 10），结合其形貌、结构及 Th/U 比值等特点，可能指示其为岩浆活动晚期热液锆石。

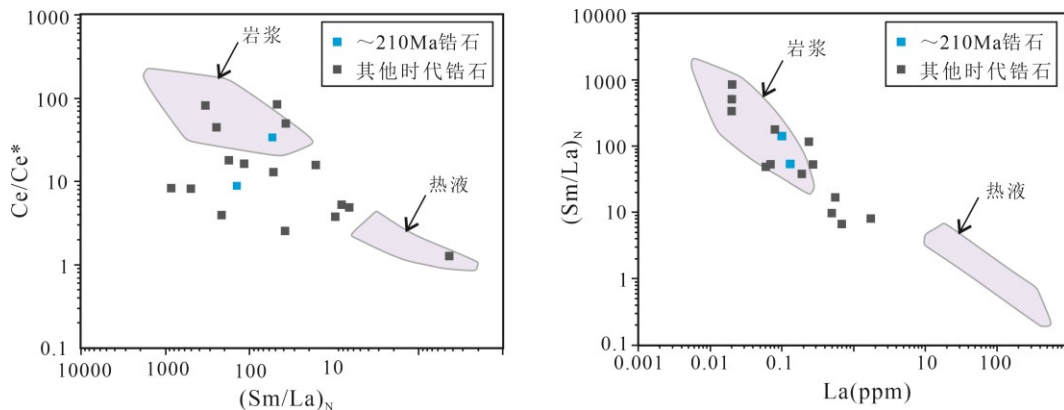


图 10 龙王江金锑矿田石英脉锆石成因判别图（底图据 Hoskin, 2005）

Fig. 10 Discrimination diagram of zircons from quartz veins in the Longwangjiang Au-Sb ore-field (after Hoskin, 2005)

因此，210Ma 的锆石年龄加权平均值 211.8±4.8Ma 可代表含石英英脉的形成时间，也即 NEE 向金（锑）矿脉形成的时间。Zheng *et al.* (2022) 获得龙王江、江东湾矿床矿脉中 3 个热液绢云母样品的 ⁴⁰Ar-⁴⁰Ar 坪年龄分别为 253±4Ma、234±3Ma 和 206±2Ma，并认为矿床形成于三叠纪幕式变形和变质过程中的多阶段矿化，其中 206±2Ma 年龄值与本文获得的成矿时间在误差范围内一致。较大的 253~234Ma 的年龄与华南内陆印支运动主造山-变形变质作用时代较为一致（李建华等，2014），其总体挤压的应力环境可能不利于成矿因而不是成矿的主要时期。印支晚期成矿也可得到区域构造背景和成矿动力机制的支持：晚三叠世早期 SN 向挤压下，NNE 向~NE 向劈理或剪切面则相对开放，从而导致其后的印支期成矿事件中形成 NNE 向~NE 向矿脉。

值得指出的是，以泥潭冲矿床为代表的受晚三叠世 EW 向逆断层控制的金矿床是否存在燕山期成矿，有待进一步研究。主要依据为：①龙王江矿田与存在燕山期成矿（晚侏罗世-早白垩世）的渣滓溪锑钨矿、沃溪金锑钨矿床处于同一 NNE~NE 向构造带上，东与古台山金锑矿相邻（柏道远等，

2021; Li *et al.*, 2022; 李彬等, 2024; Wang *et al.*, 2024); 且这些矿床都发育中-晚三叠世的容矿构造。②如前文所述, 泥潭冲金矿床主要产于 EW 向逆断裂中并具 2 期矿化, 早期石英脉沿 NNE 向~NE 向劈理或剪切面理充填, 晚期 (主成矿期) 矿脉沿 EW 向断裂及其次级构造裂隙充填。在区域构造-岩浆背景上, 早燕山运动 NWW 向挤压 (D₄), EW 向逆断裂产生伸展而相对开放, 更易在晚侏罗世成矿事件中形成 EW 向矿脉; 南东面白马山岩体内部即有燕山期花岗岩出露 (Chen *et al.*, 2007)。顺便指出, 区域上加里东期成矿只有金矿而无铋矿 (Zhang *et al.*, 2019), 由此可初步排除龙王江金铋矿田形成于加里东期的可能。

综合上述含矿构造对成矿时代的约束、含矿石英脉热液锆石 U-Pb 结果与前人研究资料, 认为龙王江矿田的主要成矿时代为晚三叠世晚期, 约 211~206Ma; 可能存在燕山期成矿, 有待进一步研究。

4.2 成矿构造背景

华南地区印支期被华北、印支和古太平洋三大板块围限, 其地球动力学背景主要存在华南与南北陆缘的印支与华北板块碰撞导致的陆内造山作用 (碰撞模型) 和古太平洋板向西的俯冲或平板俯冲过程 (俯冲模型) 等不同观点 (Li and Li, 2007; Zhang *et al.*, 2013; 王岳军等, 2022; 柏道远等, 2024)。

始于二叠纪的古太平洋板块平板俯冲的地球动力学模型 (Li and Li, 2007) 可以较好解释华南 250~190Ma 的岩浆活动及 1300km 宽的 NE~NNE 向褶皱带, 但受到华南陆缘及内部 EW 向构造线, 缺乏该时期俯冲相关镁铁质弧岩浆作用以及三叠纪花岗岩往大陆内部年轻化趋势不能很好地证实等地质事实的挑战 (Gao *et al.*, 2017; 王岳军等, 2022)。Zeng *et al.* (2023) 对华南中生代金 (多金属) 矿床的地质与时空分布特征进行了系统总结, 认为华南存在 245~200Ma 造山型金矿, 210~195Ma 与侵入岩相关的金铋钨矿和 170~90Ma 与侵入岩相关的金矿床, 在此基础上提出华南地块中生代陆内不同类型的金矿化符合古太平洋板块西向平板俯冲模型, 但也强调了华南板块顺时针与华北板块的碰撞的作用。然而, 碰撞模型认为华南印支期南、北缘的拼合碰撞、深俯冲/碰撞诱发了华南腹地先期构造薄弱带发生陆内造山过程 (Zhang *et al.*, 2013; Shu *et al.*, 2021)。碰撞模型约束了华南大陆印支期两阶段挤压变形过程 (李建华等, 2014; 王岳军等, 2022; 柏道远等, 2024), 尽管对两阶段过程中的 SN 向挤压与 NW 向挤压的先后关系还存在争议, 但解释了华南地区印支期 NE~NNE 向和 EW 向构造线的成因。

本文龙王江矿区形成于印支运动早幕 (中三叠世晚期) 的 NE 向断裂 F₃、形成于印支运动晚幕 (晚三叠世早期) 的 EW 向逆断裂 (矿脉 V₃), 以及区域上如渣滓溪铋金矿 (柏道远等, 2023b)、铲子坪-大坪金矿 (柏道远等, 2023c)、古台山金铋矿 (柏道远等, 2023a) 等矿床印支期控矿构造的应力体制, 均支持碰撞模型下华南腹地印支期两阶段变形过程中 NW 向挤压 (D₂ 变形期) 早于 SN 向挤压 (D₃ 变形期)。华南三叠纪花岗岩的地球化学特征、岩石成因与时空分布特征符合碰撞模型, 即 265~225Ma 时期的各类花岗岩形成于主碰撞阶段 (图 11a, b), 而 225~200Ma 之间的各类花岗岩与挤压之后的后碰撞伸展有关 (图 11c, d) (Gao *et al.*, 2017)。雪峰构造带中白马山岩体印支晚期后碰撞花岗岩呈 EW 向展布侵位于加里东期岩体中, 表现为受控于 EW 向基底逆冲断裂 (D₃) 控制 (图 1b), 符合碰撞模型。碰撞模型虽然认为三叠纪古太平洋板块向西具有俯冲作用 (王岳军等, 2022; 柏道远等, 2024), 但需要强调的华南构造体制由特提斯构造域向古太平洋域开始转换发生于早中侏罗世之交 (Zhang *et al.*, 2013), 此时古太平洋俯冲作用影响可能更多只是起到阻滞华南大陆向东逃逸 (王岳军等, 2022)。

位于研究区东南侧的白马山印支期黑云母二长花岗岩主体形成于 204~212Ma (李建华等, 2014; 刘贤红等, 2025), 滞后于华南大陆印支运动主造山-变形变质时代 (255~220Ma) 约 20Ma (李建华等, 2014), 为后造山应力松弛阶段加厚地壳减压熔融作用的产物 (Gao *et al.*, 2017), 其成岩时代与本文获得的龙王江金铋矿体成矿时代一致。地球物理资料显示, 龙王江矿田下部可能存在隐伏的岩体 (图 12); H-O-S-Pb 同位素表明成矿以变质流体为主并可能有岩浆流体参与 (周超等, 2020; Zheng *et al.*, 2022)。因此, 龙王江矿田金 (铋) 矿田的形成应与印支晚期花岗质岩浆活动有关。

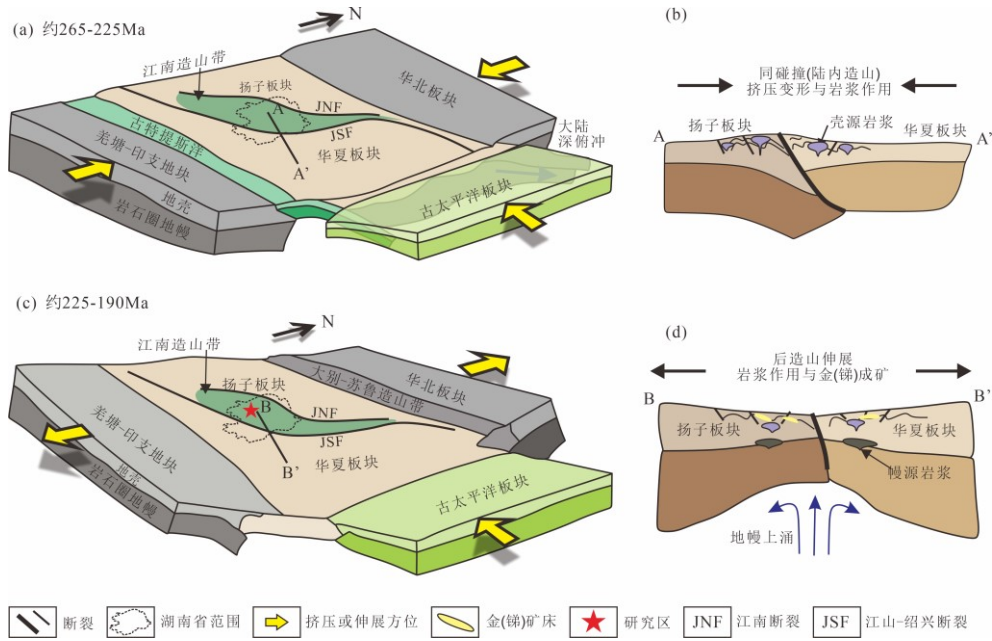


图 11 龙王江矿田及区域三叠纪金-锑-钨成矿构造背景 (改自 Gao et al., 2017)

Fig. 11 The tectonic setting of Triassic Au-Sb-W mineralization in the Longwangjiang ore field and region (modified from Gao et al., 2017)

区域上还发育大量形成于印支晚期后造山伸展期的岩体, 如黄茅园岩体、洩山岩体、桃江岩体、大神山岩体、歇马岩体等(Gao *et al.*, 2017)。而区域上主要产于新元古代板岩中的晚三叠世 Au-(Sb-W) 矿床, 还有古台山 Au-Sb 矿床、杏枫山 Au-W 矿、铲子坪和大坪 Au 矿床、包金山 Au 矿床、渣滓溪 Au-Sb-W 矿床以及龙山 Sb-Au 矿床等, 矿床形成时代集中在 224~205Ma (谢桂青等, 2021), 略滞后印支晚期岩浆活动峰期 225~210Ma (李建华等, 2014; Gao *et al.*, 2017), 也暗示区域上晚三叠世 Au-(Sb-W) 成矿多于该时期岩浆作用晚期的热液活动有关。最近对白马山南缘杏枫山金钨矿的成矿时代 (215.1 ± 7.5 Ma) 及原位 S 同位素 ($\delta^{34}\text{S}$ 在 -9.2‰~-7.7‰) 研究 (娄元林等, 2024) 就表明其与侵入岩有关, 也佐证了这一认识。

综上所述, 本文认为龙王江矿田及区域同期晚三叠世 Au-Sb-W 矿床形成矿构造背景为华南大陆南、北陆缘碰撞/深俯冲及古太平洋板块西向俯冲 (围限) 相关的陆内造山过程, 成矿与后碰撞阶段花岗质岩浆活动及其后期热液密切相关。

4.3 构造控矿规律

4.3.1 矿床定位的构造条件

龙王江金锑矿田定位于加里东期龙王江断裂 F_1 (由SE往NW推覆) 和印支期黑土坡断裂 F_3 (由NW往SE推覆) 之间, 表现为不同期构造叠加的冲起断夹块 (图2b, 图13)。矿田内部因应力集中变形强烈, 以发育加里东期的NE (NNE) 向的褶皱、脆韧性断裂及劈理为主, 并叠加了印支运动早幕NNE (NE) 向的断裂、印支运动晚幕EW向的断裂, 为龙王江矿田成矿流体运移提供了良好的构造网络系统。

另外, 矿田西侧龙王江断裂是区域性通道-安化断裂的组成部分 (图1b), 深大断裂是流体从深部向浅部运移的重要通道 (Zhang *et al.*, 2019; 柏道远等, 2023a, 2023c), 为矿质来源、流体、能量等方面提供了良好的成矿条件。矿床主定位于江东湾倒转向斜轴迹与江溪垄倒转背斜轴迹之间的岩层倒转带中 (图2a, 图13), 可能与倒转翼经历了更强烈的变形改造, 岩层经历了由水平→倾斜→直立→倒转的持续大角度旋转, 递进变形相关的劈理、节理、剪切面等构造变形更为复杂, 可为流体的运移、岩石的蚀变和矿质的沉淀等提供更好的条件。

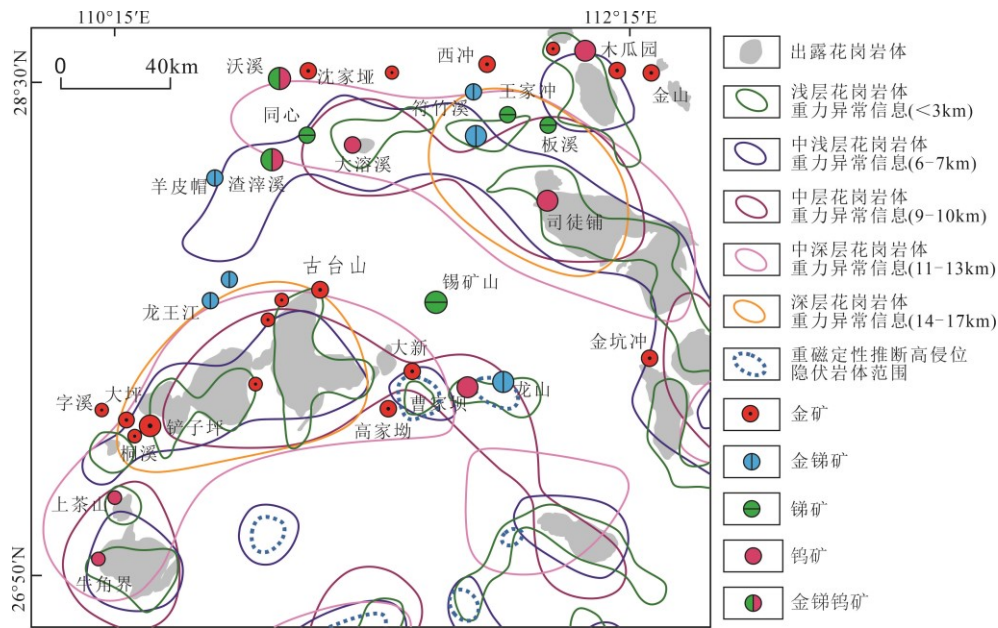


图12 区域隐伏岩体推断图

Fig. 12 Diagram of inferred concealed rock masses in the region

4.3.2 “导-运（配）-储（含）”构造

由于成矿流体的金属含量有限，大型-超大型矿床的形成需要成千上万倍于矿体的流体通过成矿部位，如果某一构造不与导矿或配矿构造相连，或者只是一端相连而且没有出口，那么就没有大量的流体通过而不利成矿（Li *et al.*, 2022）。因此，厘清矿田（床）的“导-运（配）-储（含）”构造对理解成矿过程及指导找矿勘查意义重大。其中，导矿构造起到与深部流体库连通的作用，是控矿构造中级别序次较高的构造部分；运（配）是连接导矿构造与储（容）矿构造之间的桥梁，为成矿流体转运的通道；储（含）通常是构造末端有利于矿质沉淀的部位（Li *et al.*, 2022）。

前述控矿构造解析及前人研究资料表明（图13），龙王江断裂 F_1 是形成于加里东期的区域性断裂，往下交于深部与板溪群与冷家溪群之间的区域滑脱断裂相连（张进等，2010），而黑土坡断裂 F_2 是形成于印支运动早幕的较大规模逆断裂，往深部能切穿下伏滑脱断裂（柏道远等，2014）。泥潭冲矿床EW向含矿构造（V3脉）形成于印支运动晚幕SN向挤压，受龙王江断裂 F_1 （D1）和江东湾断裂 F_3 （D2）所围限并与其连通。龙王江金锑矿床主要的容矿构造为形成于印支运动早幕（D2）NNE向的断裂，如图3a所示的NNE向矿脉含矿构造以及D533观察点的江东湾断裂 F_3 ，均是印支期区域由NW往SE逆冲推覆构造的组成部分（柏道远等，2014）。从规模及产状来看，NNE向含矿构造（图3a）应主要是江东湾断裂 F_3 的反冲断裂，其往下应与江东湾断裂 F_3 或直接与龙王江断裂 F_1 相连。淘金坪金矿及南江坪金矿的含矿构造为NE向强劈理化带（剪切带）及脆性断裂，其含矿构造组合可能成因是：加里东期形成NE向陡倾的褶皱及劈理化带，印支运动早幕叠加NW向挤压，在褶皱轴部已经劈理化的岩石上叠加纯剪切作用而进一步形成剪切带，同时发生部分简单剪切作用形成NE向逆冲脆性断裂。陡倾的强劈理化带（剪切带）往深部可直接与龙王江断裂相连；椒坪和火毛塘一带金锑矿床NE向容矿构造可能是黑土坡断裂反冲断裂，往下与黑土坡断裂连通。

综上所述（图13），龙王江断裂 F_1 和黑土坡断裂 F_2 应是整个龙王江矿田主要的导矿构造；龙王江断裂和江东湾断裂是泥潭冲金矿EW向矿脉、龙王江矿床NNE~NE向矿脉的导矿构造；龙王江断裂是淘金坪金矿、南江坪金矿的导矿断裂；黑土坡断裂是椒坪和火毛塘一带金锑矿床的导矿断裂。容矿构造主要为NNE~NE向劈理面和剪切面（形成于D1和D2期），控制发育蚀变岩型和石英脉型金锑矿脉；以及EW向逆断裂（形成于D3期）控制石英脉型、破碎带型、蚀变岩型金矿脉。江东湾断裂、陡倾的强劈理化带（剪切带）本身含矿其往深部与龙王江断裂 F_1 相接而与深部连通，为配矿兼容构造。

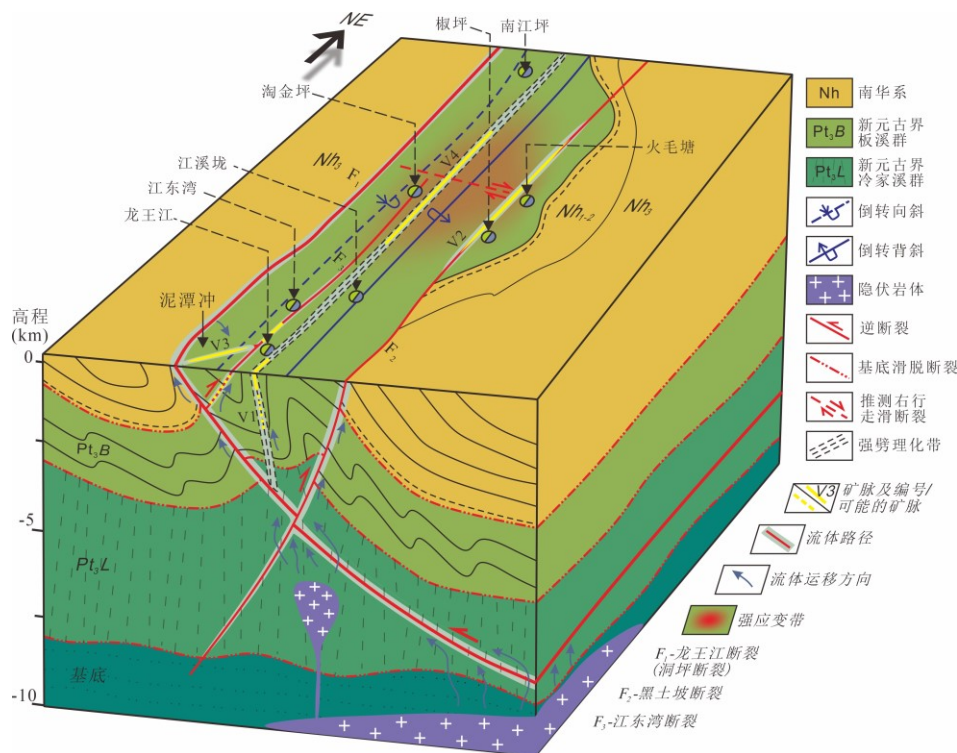


图 13 龙王江矿田构造控矿系统

Fig. 13 Structural control system of the Longwangjiang ore-field

4.3.3 找矿方向

根据前文论述的龙王江铋砷金矿田矿床定位构造条件及控矿构造类型：（1）江东湾倒转向斜轴部与江溪垅倒转背斜轴部之间的NE向陡倾劈理化（剪切带），以及江东湾断裂为配矿及容矿构造，其往深部延伸距离大，具有寻找深部矿体的较大潜力，是找矿的首要方向。（2）区内陶金坪—火毛塘一带因龙王江断裂向西逆冲推覆的幅度大于NE、NW两侧而形成向两端倾伏的背斜构造，为强挤压部位，下一步可重点部署地质填图工作，特别是有EW向构造与NEE向构造交汇的部位，进一步明导矿和含矿断裂的分布情况。

5 结 论

（1）研究区主要经历了6期构造变形事件（D1~D6）：志留纪晚期NW~NWW向挤压（D1）、中三叠世晚期NW向挤压（D2）、晚三叠世近SN向挤压（D3）、中侏罗世晚期NWW向挤压（D4）、白垩纪NW—SE向伸展（D5）、古近纪中晚NEE~NE向挤压。

（2）石英矿脉热液锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果为 $211.8 \pm 4.8 \text{ Ma}$ ，成矿时代为晚三叠世（约211~206Ma），成矿与华南陆缘碰撞/深俯冲触发的陆内造山后碰撞伸展阶段岩浆活动晚期热液有关。

（3）龙王江矿田构造定位于龙王江断裂和黑土坡断裂反向逆冲围限的断夹块中，龙王江断裂和黑土坡断裂是主要导矿构造；陡倾的强劈理化带（剪切带）和江东湾断裂为配矿兼容构造；EW向逆断裂、NNE向逆断裂为主要容矿构造。

（4）NE向陡倾劈理化（剪切带）、江东湾断裂F₃深部具有较大潜力；陶金坪—火毛塘一带为构造应力集中部位可重点部署。

致谢：主编蒋少涌教授，审稿专家李欢教授和另一名匿名审稿人对本文进行了细致审阅并提出了十分有益的修改意见和建议，在此深表感谢！

References

- Bai, D. Y., Li, B., Jiang, C., et al., 2023a. Deformation Sequences, Metallogenic Events and Ore-controlling Structures at Gutaishan Au-Sb Deposit in Central Hunan Province. *Mineral Deposits*, 42(02): 229—252(in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Li, B., Wu, M. J., et al., 2023b. Deformation Sequences, Ore-Forming Epoch and Attributes of Ore-Bearing Structural in the Zhazixi Sb-W Deposit, Hunan Province. *Geotectonica et Metallogenia*, 47(02): 260—283(in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Li, B., Zeng, G. Q., et al., 2023c. Deformation Sequences and Ore-controlling Structures of the Chanziping–Daping Gold Mining Area in Hunan Province, China. *Journal of Geomechanics*, 29(06): 801—823(in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Li, B., Zeng, G. Q., et al., 2024. Characteristics and Dynamic Mechanisms of the Stress Field of the Indosinian Movement in Hunan Province. *South China Geology*, 40(2): 252—269(in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Li, B., Zhou, C., et al., 2021. Gold Mineralization Events of the Jiangnan Orogen in Hunan and Their Tectonic Settings. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(05): 897—922(in Chinese with English abstract).
- Bai, D. Y., Xiong, X., Yang, J., et al., 2014. Geological Structure Characteristics of the Middle Segment of the Xuefeng Orogen. *Geology in China*, 41(02): 399—418(in Chinese with English abstract).
- Chen, B. L., Cao, F. G., Zhao, S. M., et al., 2011. Fold Structure and Its Origin in Dapinggou Area, Eastern Altun Mountains. *Geological Bulletin of China*, 30(12): 1934—1940(in Chinese with English abstract).
- Chen, M. H., Yin, H., Yang, Z. M., et al., 2018. Analysis of Geological and Geochemical Characteristics and Metallogeny of Longwangjiang Sb-As-Au Deposit in West Hunan and Prospecting of Such Ore Deposit. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 33(01): 31—40(in Chinese with English abstract).
- Chen, W.F., Chen, P. R., Huang, H. Y., et al., 2007. Chrono-Logical and Geochemical Studies of Granite and Enclave in Baimashan Pluton, Hunan, South China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50: 1606—1627. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0073-1>
- Dong, S. W., Zhang, Y. Q. Li, H. L., et al., 2019. The Yanshan Orogeny and Late Mesozoic Multi-Plate Convergence in East Asia—Commemorating 90th Years of the “Yanshan Orogeny”. *Science China - Earth Science*, 61(12): 1888—1909. <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9297-y>
- Du, Y. S., Xu, Y. J., 2012. A Preliminary Study on Caledonian Event in South China. *Geological Science and Technology Information*, 31(05): 43—49(in Chinese with English abstract).
- Gao, P., Zheng, Y. F., Zhao, Z. F. 2017. Triassic Granites in South China: a Geochemical Perspective on Their Characteristics, Petrogenesis, and Tectonic Significance. *Earth-Science Reviews*, 173: 266—294. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.016>
- Hoskin, P. W. O., 2005. Trace-Element Composition of Hydrothermal Zircon and the Alteration of Hadean Zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(3): 637—648. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.006>
- Huang, J. Z., Sun, J., Zhou, C., et al., 2020. Metallogenic Regularity and Resource Potential of Gold Deposits of Hunan Area in the Jiangnan Orogenic Belt, South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(02): 230—252(in Chinese with English abstract).
- Hunan Institute of Geology Survey (HIGS), 2017. The Regional Geology of China, Hunan Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, B., Xu, D. R., Bai, D. Y., et al., 2022. Characteristics of Structural Deformation and Its Tectonic Setting in the Huishangang Area, Northern Xuefeng Orogen. *Geotectonica et Metallogenia*, 46 (01): 1—22(in Chinese with English abstract).
- Li, B., Xu, D. R., Bai, D. Y., et al., 2022. Structural Deformation, Metallogenic Epoch and Genetic Mechanism of the Woxi Au-Sb-W deposit, Western Hunan Province, South China. *Science China-Earth Science*, 65(12): 2358—2384. <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9978-0>
- Li, B., Xu, D. R., Bai, D. Y., et al., 2024. Episodic Mineralization at Yanshannian in the Woxi Au-Sb-W Deposit, Western Hunan, South China: Constraints from In-Situ Scheelite LA-ICP-MS U-Pb Geochronology and Element-Isotope of Pyrite. *Acta Petrologica Sinica*, 40(01): 215-240(in Chinese with English abstract).
- Li, H., Li, J. W., Algeo, T. J., et al., 2018. Zircon Indicators of Fluid Sources and Ore Genesis in a Multi-Stage Hydrothermal System: the Dongping Au Deposit in North China. *Lithos*, 314—315: 463—478. [doi:10.1016/j.lithos.2018.06.025](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.025)
- Li, J. H., Zhang, Y. Q., Dong, S. W., et al., 2014. Cretaceous Tectonic Evolution of South China: a Preliminary Synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134: 98—136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.008>
- Li, J. H., Zhang, Y. Q., Xu, X. B., et al., 2014. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from the Baimashan Longtan Super-Unit and Wawutang Granites in Hunan Province and Its Geological Implication. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(01): 158—175(in Chinese with English abstract).
- Li, W., Wang, M. C., Jiang, D. Z., et al., 2025. Cleavage Research and Instructional Design. *Geotectonica et Metallogenia*, 49(01): 46-56(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Li, X. H. 2007. Magmatic Province in Mesozoic South China: a Flat-Slab Subduction Model Formation of the

- 1300-km-Wide Intracontinental Orogen and Postorogenic. *Geology*, 35(2): 179—182. <https://doi.org/10.1130/G23193A.1>
- Liu, X. H., Liu, D. L., Lou, Y. L., et al., 2025. Geochronology, Hf Isotope, Geochemistry and Petrogenesis of the Baimashan Granitic Complex in the Central Hunan Province. *Earth Science*, 50(02): 609—620(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. S., Zong, K. Q., Kelemen P. B., et al., 2008. Geochemistry and Magmatic History of Eclogites and Ultramafic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drill Hole: Subduction and Ultrahigh-Pressure Metamorphism of Lower Crustal Cumulates. *Chemical Geology*, 247(1): 133—153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.016>
- Lou, Y. L., Liu, X. H., Zeng, H., 2024. Genesis of Xingfengshan Au-W Deposit in Central Hunan Province: Constraints from Hydrothermal Apatite U-Pb Dating and In Situ S Isotopes. *Earth Science*, 49(12): 4265—4277(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K. R. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex(rev.2.49): Ageochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeleygeochronology Center, Special Publication: No. 1a.
- Qiu, X. F., 2022. Pre-Devonian Crustal Evolution of the Northern Yangtze Craton: Evidence from U-Pb Ages and Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Acta Geologica Sinica*, 96(11): 3784—3798(in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., Yao, J. L., Wang, B., et al., 2021. Neoproterozoic Plate Tectonic Process and Phanerozoic Geodynamic Evolution of the South China Block. *Earth-Science Reviews*, 216: 103596. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103596>
- Wang, Q. F., Yang, L., Zhao, H. S., et al., 2022. Towards a Universal Model for Orogenic Gold Systems: a Perspective Based on Chinese Examples With Geodynamic, Temporal, and Deposit-Scale Structural and Geochemical Diversity. *Earth-Science Reviews*, 224: 103861. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103861>
- Wang, R., Xiao, Z. X., Lin, J. Y., et al., 2018. The Diverse Tectonic Background of Boudinage Structures. *Geotectonica Et Metallogenia*, 42(5): 777—785(in Chinese with English abstract).
- Wang, T. X., Fu, S. L., Tang, Y. W., et al., 2024. Scheelite U—Pb Dating Constraints on the Timing of the Formation of the Zhazixi Sb-W Deposit in South China. *Mineralium Deposita*, 59(3): 445—452. <https://doi.org/10.1007/s00126-024-01249-4>
- Wang, Y. J., Wang, Y., Zhang, Y. Z., et al., 2022. Indosinian Deformation in the South China Block and Interaction with the Adjoining Blocks. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(03): 399—415(in Chinese with English abstract).
- Xie, G. Q., Mao, J. W., Zhang, C. Q., et al., 2021. Triassic Deposits in South China: Geological Characteristics, Ore-forming Mechanism and Ore Deposit Model. *Earth Science Frontiers*, 28(03): 252—270(in Chinese with English abstract).
- Xu, D. R., Deng, T., Chi, G. X., et al., 2017. Gold Mineralization in the Jiangnan Orogenic Belt of South China: Geological, Geochemical and Geochronological Characteristics, Ore Deposit-Type and Geodynamic Setting. *Ore Geology Reviews*, 88: 565—618. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.02.004>
- Yin, D. G., Sun, J. M., Yin, H. F., et al., 2015. An Analysis of Ore-Controlling Regularity and Prospecting Direction of Taojinping Gold Mining Area. *Mineral Resources and Geology*, 29(01): 29—35(in Chinese with English abstract).
- Zeng, Y. S., Wang, Q. F., Groves, D. I., et al., 2023. Prolonged Mesozoic Intracontinental Gold Mineralization in the South China Block Controlled by Lithosphere Architecture and Evolving Paleo-Pacific Plate Subduction. *Earth-Science Reviews*, 240: 104387. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104387>
- Zhai, W., Zhang, E., Zheng, S. Q., et al., 2022. Hydrothermal Zircon: Characteristics, Genesis and Metallogenic Implications. *Ore Geology Reviews*, 149: 105111. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105111>
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Wang, Y. J., et al., 2013. Tectonics of South China Continent and Its Implications. *Science China - Earth Science*, 56(11): 1804—1828. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4679-1>
- Zhang, J., Ma, Z. J., Chen, B. H., et al., 2010. Paleozoic Deformational Characteristics of the Central Xuefeng Mt. and Implication a Case Study on the Suining-Jingzhou-Tianzhu-Xinhuang Section, China. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 44—57(in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Yang, L. Q., Groves, D. I., et al., 2019. An Overview of Timing and Structural Geometry of Gold, Gold-Antimony and Antimony Mineralization in the Jiangnan Orogen, Southern China. *Ore Geology Reviews*, 115: 103173. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103173>
- Zheng, Y., Zhang, G. Z., Wu, Y. H., et al., 2022. Triassic Multistage Antimony-Gold Mineralization in the Precambrian Sedimentary Rocks of South China: Insights from Structural Analysis, Paragenesis, 40Ar/39Ar age, In-Situ S-Pb Isotope and Trace Elements of the Longwangjiang-Jiangdongwan Orefield, Xuefengshan Mountain. *Ore Geology Reviews*, 148: 105030. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.105030>
- Zhong, S. H., Feng, C. Y., Seltnann, R., et al., 2018. Can Magmatic Zircon be Distinguished from Hydrothermal Zircon by Trace Element Composition? The Effect of Mineral Inclusions on Zircon Trace Element Composition. *Lithos*, 314—315: 646—657. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.06.029>
- Zhou, C., Sun, J., Guo, A. M., et al., 2020. A Comparative Study of the Ore-Forming Fluids of the Typical Gold-Antimony Deposits along Middle Xuefeng Arc Structure Belt. *Geology in China*, 47(4): 1241—1259(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 柏道远, 李彬, 曾广乾, 等, 2023c. 湖南铲子坪-大坪金矿区变形序列及控矿构造. 地质力学学报, 29(06): 801—823.
- 柏道远, 李彬, 曾广乾, 等, 2024. 湖南省印支运动应力场特征及其动力机制. 华南地质, 40(2): 252—269.
- 柏道远, 李彬, 江灿, 等, 2023a. 湘中古台山金锑矿床变形序列、成矿事件及控矿构造. 矿床地质, 42(02): 229—252.
- 柏道远, 李彬, 吴梦君, 等, 2023b. 湖南渣滓溪锑钨矿区变形序列、成矿时代及含矿构造属性. 大地构造与成矿学, 47(02): 260—283.
- 柏道远, 李彬, 周超, 等, 2021. 江南造山带湖南段金矿成矿事件及其构造背景. 岩石矿物学杂志, 40(05): 897—922.
- 柏道远, 熊雄, 杨俊, 等, 2014. 雪峰造山带中段地质构造特征. 中国地质, 41(02): 399—418.
- 陈柏林, 曹富根, 赵树铭, 等, 2011. 阿尔金山东段大平沟地区褶皱构造的特征及其成因. 地质通报, 30(12): 1934—1940.
- 陈明辉, 尹灏, 杨长明, 等, 2018. 湖南龙王江锑砷金矿床地质地球化学特征、成矿分析与找矿. 地质找矿论丛, 33(01): 31—40.
- 杜远生, 徐亚军. 2012. 华南加里东运动初探. 地质科技情报, 31(05): 43—49.
- 湖南省地质调查院, 2017. 中国区域地质志·湖南志. 北京: 地质出版社.
- 黄建中, 孙骥, 周超, 等, 2020. 江南造山带(湖南段)金矿成矿规律与资源潜力. 地球学报, 41(02): 230—252.
- 李彬, 许德如, 柏道远, 等, 2022. 雪峰造山带北段灰山港地区构造变形特征及其形成构造背景. 大地构造与成矿学, 46(01): 1—22.
- 李彬, 许德如, 柏道远, 等, 2024. 湘西沃溪金锑钨矿床燕山期幕式成矿作用: 来自原位白钨矿 U-Pb 定年与黄铁矿元素-同位素的约束. 岩石学报, 40(01): 215—240.
- 李建华, 张岳桥, 徐先兵, 等, 2014. 湖南白马山龙潭超单元、瓦屋塘花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 44(01): 158—175.
- 李玮, 王美聪, 姜大志, 等, 2025. 劈理研究及构造意义. 大地构造与成矿学, 49(01): 46—56.
- 刘贤红, 刘德亮, 娄元林, 等, 2025. 湘中白马山复式岩体年代学、Hf 同位素、地球化学及岩石成因. 地球科学, 50(02): 609—620.
- 娄元林, 刘贤红, 曾昊等, 2024. 湘中杏枫山金钨矿床成因: 热液磷灰石 U-Pb 定年和原位 S 同位素制约. 地球科学, 49(12): 4265—4277.
- 邱啸飞. 2022. 扬子克拉通北部前泥盆纪地壳演化: 来自碎屑锆石 U-Pb 和 Hf 同位素证据. 地质学报, 96(11): 3784—3798.
- 王冉, 肖宙轩, 林靖愉, 等, 2018. 石香肠构造的多种地质构造背景. 大地构造与成矿学, 42(5): 777—785.
- 王岳军, 王洋, 张玉芝, 等, 2022. 华南印支期变形格局及多陆块围限模型. 大地构造与成矿学, 46(03): 399—415.
- 谢桂青, 毛景文, 张长青, 等, 2021. 华南地区三叠纪矿床地质特征、成矿规律和矿床模型. 地学前缘, 28(03): 252—270.
- 尹大改, 孙际茂, 尹华锋, 等, 2015. 陶金坪金矿区控矿规律及找矿方向分析. 矿产与地质, 29(01): 29—35.
- 张进, 马宗晋, 陈必河, 等, 2010. 雪峰山中段古生代变形的特征及意义——以绥宁-靖州-天柱-新晃剖面为例. 地质通报, 29(1): 44—57.
- 周超, 孙骥, 郭爱民, 等, 2020. 雪峰弧形构造带中段典型金锑矿床成矿流体对比研究. 中国地质, 47(4): 1241—1259.