

doi: 10.12029/gc20220613

万新, 韩润生, 李波, 肖宪国, 何志威, 王景腾, 魏庆喜. 2022. 黔西北乐开铅锌矿床构造地球化学研究及深部找矿预测[J]. 中国地质, 49(6): 1875–1892.

Wan Xin, Han Runsheng, Li Bo, Xiao Xianguo, He Zhiwei, Wang Jingteng, Wei Qingxi. 2022. Tectono-geochemistry and deep prospecting prediction in the Lekai lead-zinc deposit, Northwestern Guizhou Province, China[J]. Geology in China, 49(6): 1875–1892(in Chinese with English abstract).

黔西北乐开铅锌矿床构造地球化学研究 及深部找矿预测

万新¹, 韩润生¹, 李波¹, 肖宪国², 何志威², 王景腾², 魏庆喜³

(1. 有色金属矿产地地质调查中心西南地质调查所, 云南昆明 650093; 2. 贵阳矿业开发投资股份有限公司, 贵州 贵阳 550002;
3. 中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司, 云南昆明 650051)

摘要:【研究目的】乐开铅锌矿床是近些年黔西北铅锌矿集区内新发现的矿床之一, 与该矿集区内铅锌矿床主要受 NW 向断裂控制有所不同, 乐开铅锌矿床严格受 NE 向断褶构造控制, 与滇东北矿集区铅锌矿床具有一致的成矿地质条件。该研究对黔西北乐开地区乃至川滇黔接壤区铅锌矿深部找矿具有重要的指示意义。【研究方法】主要包括构造精细解析和构造地球化学等方法。【研究结果】该区控矿构造型式为典型的“多字型”和“入字型”, 并划分出 3 种构造组合, 分别代表 4 种不同的构造体系: 海西期—印支中期(早 SN 构造带)、印支晚期—燕山早期(NE 构造带)、燕山中晚期(NW 构造带)及喜马拉雅期(晚 SN 构造带)。断裂构造岩主要表现为低温成矿阶段的前缘晕元素组合(Sb-As-Hg)、中温成矿阶段的近矿晕元素组合(Zn-Pb-Cd)与中高温成矿阶段的尾晕元素组合(In-Sn-Ni-Cu)。【结论】NE 构造带为该矿床的成矿构造体系, 推断成矿流体在平面上自 SW 向 NE 向运移, 提出矿区深部 6 个定位找矿靶区。
关键词: 构造地球化学; 异常梯度; 深部找矿预测; 矿床构造解析; 乐开铅锌矿床; 黔西北矿集区; 矿产勘查工程
创 新 点: 厘定了矿区 4 种不同的构造体系和主要成矿构造体系; 提出了矿区深部找矿的新方向并提供了 6 个找矿靶区。

中图分类号: P552; P632⁺.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)06-1875-18

Tectono-geochemistry and deep prospecting prediction in the Lekai lead-zinc deposit, Northwestern Guizhou Province, China

WAN Xin¹, HAN Runsheng¹, LI Bo¹, XIAO Xianguo², HE Zhiwei², WANG Jingteng², WEI Qingxi³

(1. Southwest Institute of Geological Survey, Geological Survey Center for Non-ferrous Mineral Resources, Kunming 650093, Yunnan, China; 2. Guiyang Mining Investment & Development Corporation. Ltd., Guiyang 550002, Guizhou, China; 3. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Kunming 650051, Yunnan, China)

收稿日期: 2019-11-19; 改回日期: 2020-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572060、U1133602)、云岭学者项目(2014)、大学企业合作项目(20160039)及云南省矿产资源预测评价工程实验室(2010)和云南省创新团队项目(2012)联合资助。

作者简介: 万新, 男, 1993 年, 硕士, 从事矿产普查与勘探工作; E-mail: 782030310@qq.com。

通讯作者: 韩润生, 男, 1964 年, 研究员, 博士生导师, 从事构造成矿动力学、隐伏矿床预测和矿床学研究; E-mail: 554670042@qq.com。

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The Lekai lead–zinc deposit, located in the Pb–Zn deposit concentration of northwestern Guizhou, is one of the small–scale lead–zinc deposits newly discovered in recent years. Different from most lead–zinc deposits in the Pb–Zn deposit concentration of northwestern Guizhou, the Lekai lead–zinc deposit is controlled strictly by NE trending fault–fold structure, which is similar to most lead–zinc deposits in the Pb–Zn deposit concentration of northeastern Yunnan. The current research provided significant implications for the deep exploration in the Lekai lead–zinc deposit and the Sichuan – Yunnan – Guizhou Triangle area (SYGT). **[Methods]** This study applied a large deal of detailed structural analysis on mechanical properties for faults and folds in the mining area and tectono–geochemistry method. **[Results]** The results showed that duo–type and λ –type are the main ore–controlling structural styles in this area. Moreover, three tectonic associations have been divided, which are correspond to four tectonic systems, namely Hercynian to Mid Indosinian, Late Indosinian to Early Yanshanian, Mid–Late Yanshanian, and Himalayan epochs. The trace elements concentrations of tectonites represented three element associations of principal factors, including frontal halo elements (Sb–As–Hg) in low temperature ore–forming stage, mineralization–halo elements (Zn–Pb–Cd) in medium–low temperature ore–forming stage, and tail–halo elements (In–Sn–Ni–Cu) in medium temperature ore–forming stage. **[Conclusions]** In four tectonic systems, ore–forming tectonic system corresponded with Late Indosinian to Early Yanshanian. According to anomaly features and their distribution regularities, the possible migration direction of ore–forming fluid is from southwest to northeast, and six target prospecting areas have been put forward in the depth of mining.

Key words: tectono–geochemistry; abnormal gradient; prediction of deep prospecting; deposit tectonic analysis; Lekai lead–zinc deposit; Northwestern Guizhou; mineral exploration engineering

Highlights: The current study summarized four tectonic systems and proposed the ore–forming tectonic system in the Lekai lead zinc deposit. A new direction for depth prospecting prediction has been provided in the six important target prospecting areas.

About the first author: WAN Xin, male, born in 1993, master, engaged in mineral prospecting and exploration; E–mail: 782030310@qq.com.

About the corresponding author: HAN Runsheng, male, born in 1964, senior researcher, supervisor of doctor candidates, engaged in the dynamics of tectonic ore–forming processes and prognosis of concealed deposits, economic geology; E–mail: 554670042@qq.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41572060, No.U1133602), Yunling scholar project (2014), School–enterprise cooperation projects (No.20160039), projects for Yunnan Engineering Laboratory of Mineral Resources Prediction and Evaluation (YM lab) (2010), Yunnan Province Innovation Team (2012).

1 引 言

黔西北铅锌矿集区是川滇黔铅锌多金属成矿区的重要组成部分,目前已发现的铅锌矿床(点)达100余处,除猪拱塘超大型矿床和9个中型矿床外,其他均为小型矿床、矿点和矿化点。这些铅锌矿床受NW向垭都—蟒硐、威宁水城断褶构造带控制(韩润生等, 2017),而乐开铅锌矿处于滇东北矿集区会泽—彝良—牛街斜冲走滑—断褶带的南延部分,直接受NE向断褶构造控制(韩润生等, 2012)。近些年来,在相邻的滇东北矿集区内会泽、毛坪等铅锌矿深部及外围均取得重大找矿突破,而且乐开铅锌矿床与滇东北矿集区铅锌矿床具有一致的成矿地质条件,预示了乐开铅锌矿床深部具有找矿潜力。因此,该研究对黔西北矿集区和滇东北矿集区的对

比研究具有指示作用。

对于明显受构造控制的金属矿床,韩润生认为构造地球化学是进行隐伏矿床定位预测的有效技术方法之一(韩润生, 2003, 2005; 韩润生等, 2017),并应用构造地球化学勘查、构造–蚀变岩相填图、高精度坑道重力定位矿体探测等集成技术在云南会泽、毛坪等铅锌矿床深部找矿中相继取得了重大找矿突破(韩润生等, 2019)。构造地球化学是研究地质构造作用与地壳中化学元素的分配、迁移、分散和富集等关系的学科,一方面研究构造作用中的地球化学过程,另一方面研究地球化学过程中所引起和反映出来的构造作用(涂光炽, 1984)。吕古贤等(2011)总结了构造地球化学的研究进展,并且展望了其发展前景。韩润生(2013)总结了10多年来构造地球化学理论与找矿技术研发及其应用的主要

进展。韩润生(2005)指出,运用构造地球化学勘查技术来指导深部找矿勘查,首先要从构造-流体-成矿系统出发,将成矿建造与控矿改造、力学分析与历史分析、构造地球化学与构造应力场、不同层次的成矿预测与不同比例尺找矿预测、典型矿床解剖与区域成矿规律研究紧密结合,建立构造地球化学勘查模式,在危机矿山深部和外围找矿中发挥重要作用。

黔西北矿集区西部与康滇陆块相邻,东南部以师宗—弥勒断裂带与右江造山带相接(许亚明等, 2009)。近年来,前人对黔西北铅锌矿集区在构造控制机制、成矿前景及成矿物源、矿床成因等方面取得重要进展(肖宪国等, 2011; 韩润生等, 2020)。随着找矿勘查工作的进行和研究程度的不断深入,该区铅锌成矿与构造的关系基本达成了共识(余未来和范良伍, 2007; 金中国, 2008; 程鹏林等, 2015; 成晨等, 2021; 宋丹辉等, 2021)。但是,黔西北矿集区内受NE构造带控制的铅锌矿床构造控矿-成矿机制研究薄弱,而且深部隐伏矿预测的任务还很艰巨,其中深部低弱矿化信息有效提取和隐伏矿体产状判别是开展深部找矿预测的难题之一。乐开矿区构造活动强烈,明显受斜冲走滑-断褶构造的控制(韩润生等, 2017, 2020),为开展该区构造地球化学研究和深部隐伏矿预测奠定了基础。故本文基于矿床构造精细解析,不断完善构造地球化学勘查技术方法程序(韩润生, 2013),通过对乐开铅锌矿区控矿构造规律及构造成生发展的研究,厘定了矿区成矿构造体系,并结合构造地球化学异常展布规律和异常梯度特征,揭示了断褶构造与铅锌成矿作用的耦合关系,为乐开铅锌矿区深部找矿勘查提供了科学依据。本文对黔西北乐开地区乃至川滇黔接壤区深部找矿预测具有借鉴意义。

2 矿床地质概况

乐开铅锌矿床位于黔西北威宁县石门乡,受会泽—彝良—牛街构造带之NE向洛泽河断裂(区域上称为待补断裂)控制。矿区出露的主要地层为上泥盆统望城坡组(D_3w)、尧梭组(D_3y)、下石炭统汤耙沟组(C_{1t})、祥摆组(C_{1x})、旧司组(C_{1j})、上司组(C_{1s})、大埔组(C_{1-2d})及上石炭统黄龙组(C_2h),下二叠统包磨山组(P_1b)及中二叠统梁山组(P_2l)、栖霞组

(P_2q)、茅口组(P_2m)(图1)。地层倾向 $100^\circ\sim 130^\circ$,倾角 $20^\circ\sim 55^\circ$ 。其中,望城坡组(D_3w)是区内主要的赋矿层位,岩性以深灰至浅灰色中晶白云岩为主。矿区内未见岩浆岩出露。矿区内构造发育,褶皱主要发育规模较大的石门背斜和主断裂上盘分布的一系列小型褶皱,整个矿床均位于石门背斜之SE翼。断裂按走向大致分为NE、NW向两组,具“多”字型控矿构造型式(图1)。其中,NE向主断裂(F_1 、 F_2 及 F_3)与成矿关系密切,为区域上洛泽河断褶构造的南延部分,控制了铅锌矿床展布。NW向断裂规模较小,后期明显将NE向断裂右行错动。

矿体多呈脉状、透镜状及“似层状”产出,倾向 $110^\circ\sim 125^\circ$,倾角 $40^\circ\sim 55^\circ$ 。矿体主要赋存于NE向主断裂上盘背斜的望城坡组(D_3w)浅灰色中晶蚀变白云岩中,明显受层间断裂带控制。矿区已共圈出4个铅锌矿(化)体:Ⅰ号矿化体位于银厂附近,产于 F_2 主断裂上盘,距主断裂约150 m,呈“似层状”产出,矿化层厚度0.72~1.5 m, $(Pb+Zn)\geq 3\%$;Ⅱ号矿体位于打厂坡附近,产于 F_2 主断层上盘,呈透镜状产出,矿体厚度1.04~1.6 m,已控制延长约150 m,矿石含Pb(1.89%)与Zn(5.96%);Ⅲ号矿体位于两天窝东侧,产于 F_2 主断层上盘,矿化体厚度1.27 m,矿石含Pb(0.68%)与Zn(1.22%);Ⅳ号矿体位于乐开地段,矿体厚度1.2~1.8 m,矿石含Pb(1.10%~4.38%,平均3.05%)、Zn(4.87%~12.13%,平均8.54%)。矿(化)体在平面、剖面上呈现“缓宽陡窄”和“膨大缩小”的显著特征。主要矿石矿物为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等,主要脉石矿物有白云石和方解石等。矿石构造主要具脉状、网脉状、角砾状等,矿石结构以半自形-他形粒状结构为主,并见交代、共边、包含、填隙结构等(图2)。该矿床的形成经历了两个成矿期:热液成矿期和表生氧化期。热液成矿期可分为四个成矿阶段:白云石-黄铁矿阶段、黄铁矿-闪锌矿阶段、闪锌矿-方铅矿-黄铁矿阶段、方解石-白云石阶段。

3 矿床构造解析与构造控矿规律

3.1 矿床构造解析

3.1.1 构造控矿特征及其力学性质

构造结构面力学性质鉴定既是认识断裂力学性质的基础,也是识别矿区导矿构造、配矿构造和

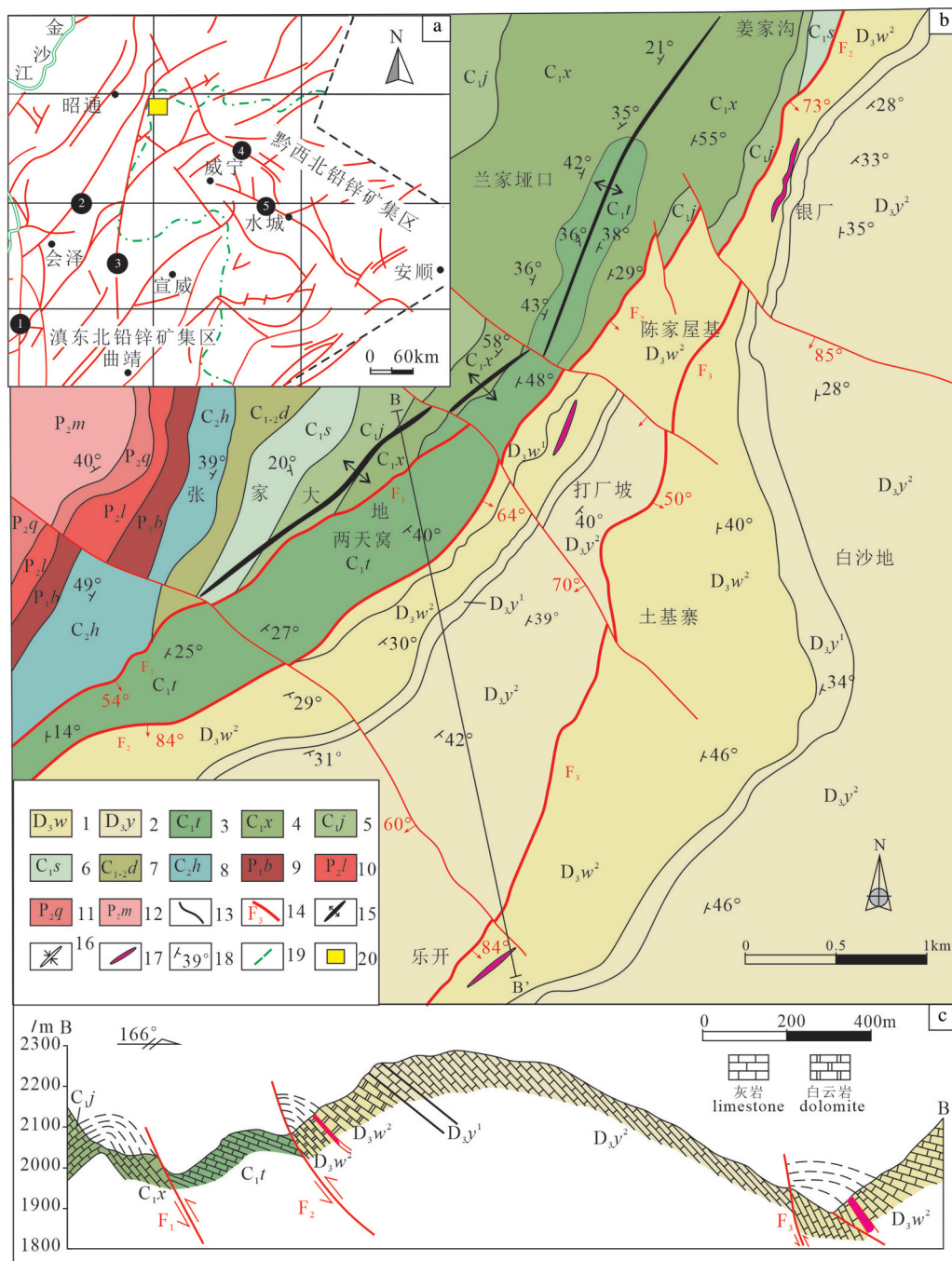


图1 a—乐开铅锌矿床地质简图;b—川滇黔区域地质图(据柳贺昌, 1995修改);c—矿区BB'实测地质剖面图
1—泥盆系望城坡组;2—泥盆系尧梭组;3—石炭系汤耙沟组;4—石炭系祥摆组;5—石炭系旧司组;6—石炭系上司组;7—石炭系大浦组;
8—石炭系黄龙组;9—二叠系包磨山组;10—二叠系梁山组;11—二叠系栖霞组;12—二叠系茅口组;13—地层界线;14—断裂及编号;15—背斜;
16—向斜;17—矿体;18—产状;19—省界;20—研究区;①—小江断裂带;②—会泽—牛街断裂带;③—昭通—曲靖隐伏断裂带;④—垭都—蟒洞断裂带;⑤—威宁—水城断裂带

Fig.1 a—simplified geological map of the Lekai lead-zinc deposit; b—distribution of the main fold-belts in the Sichuan-Yunnan-Guizhou district (modified from Liu Hechang, 1995); c—BB' measured geological profile of the mine
1—Wangchengpo Formation; 2—Yaosuo Formation; 3—Tangbagou Formation; 4—Xiangbai Formation; 5—Jiusi Formation; 6—Shangsi Formation; 7—Dapu Formation; 8—Huanglong Formation; 9—Baomoshan Formation; 10—Liangshan Formation; 11—Qixia Formation; 12—Maokou Formation; 13—Stratigraphic boundary; 14—Fault and number; 15—Anticline; 16—Syncline; 17—Ore body; 18—Attitude; 19—Provincial boundaries; 20—Research area; ①—Xiaojiang fault zone; ②—Huize—Niujie fault zone; ③—Zhaotong—Qujing buried fault zone; ④—Yadu—Mangdong fault zone; ⑤—Weining—Shuicheng fault zone

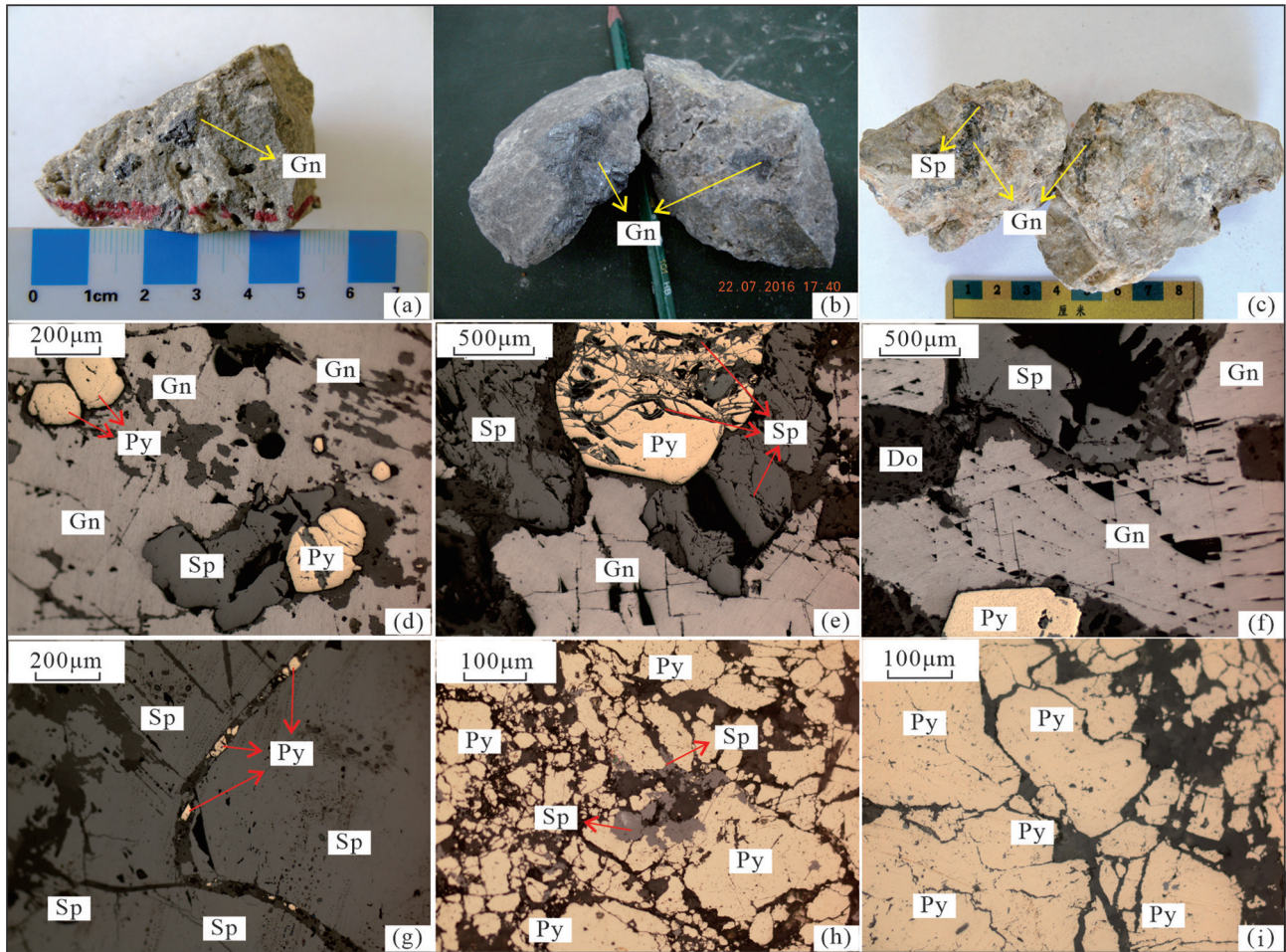


图2 乐开铅锌矿床主要类型矿石结构构造照片

a—角砾状铅锌矿石; b—浸染状铅锌矿石; c—脉状铅锌矿石; d—包含结构; e—交代结构; f—共边结构; g, h—填隙结构; i—压碎结构; Gn—方铅矿; Sp—闪锌矿; Py—黄铁矿; Do—白云石

Fig.2 Photographs showing main ore textures and structures of the Lekai lead-zinc deposit

a—Brecciated lead-zinc ore; b—Disseminated lead-zinc ore; c—Vein lead-zinc ore; d—Inclusion structure; e—Metasomatic structure; f—Coplanar structure; g, h—Interstitial structure; i—Crushed structure; Gn—Galenite; Sp—Sphalerite; Py—Pyrite; Do—Dolomite

容矿构造必不可少的条件,同时在划分矿区构造体系、判断构造与成矿的关系及找矿预测方面有重要意义(孙家骢和韩润生,2016)。通过构造剖面精测和主要断裂结构面力学性质鉴定是矿区断裂构造精细解析的重要内容。

(1) 北东向断裂

该组断裂在矿区最为发育,走向介于NE20°~70°,其走向总体与石门背斜轴向平行,其倾向SE或NW,倾角变化较大(50°~84°)。断裂带内发育碎裂岩、碎粉岩、粒化岩(构造透镜体)、断层泥,常充填团块状、网脉状白云石和方解石,部分断裂具多期次活动的特征,多呈压扭性或扭压性,明显发育黄铁矿化和铅锌矿化。

F₂主断裂带为矿区NE向断裂的典型代表(图3),其断裂带内发育碎裂岩化、碎粉岩化、构造片理化、透镜体化等现象。在PM4-5剖面的CD段,可见6条NE向断裂(F₂₋₁: NE23°(走向)∠81°(倾角)SE(倾向)、f₁₀: NE10°∠85°SE、f₁₁: NE50°∠50°SE、f₁₂: NE45°∠61°SE、f₁₃: NE25°∠60°NW、F₂₋₂: NE55°∠88°SE)(F、f均表示为断裂,其中,F表示矿区(床)内规模较大的断裂,f表示矿区(床)内规模较小的断裂),F₂₋₁与F₂₋₂分别为F₂主断裂的上下裂面,裂面呈舒缓波状,裂带宽12~18 m,靠近裂带内发育揉皱、透镜体化及片理化现象,并见少量白云石脉和方解石脉。主断裂带内发育白云质碎裂岩、碎粉岩。其断裂下盘为灰—中灰色中晶白云岩,见大量网脉状、条带状、团

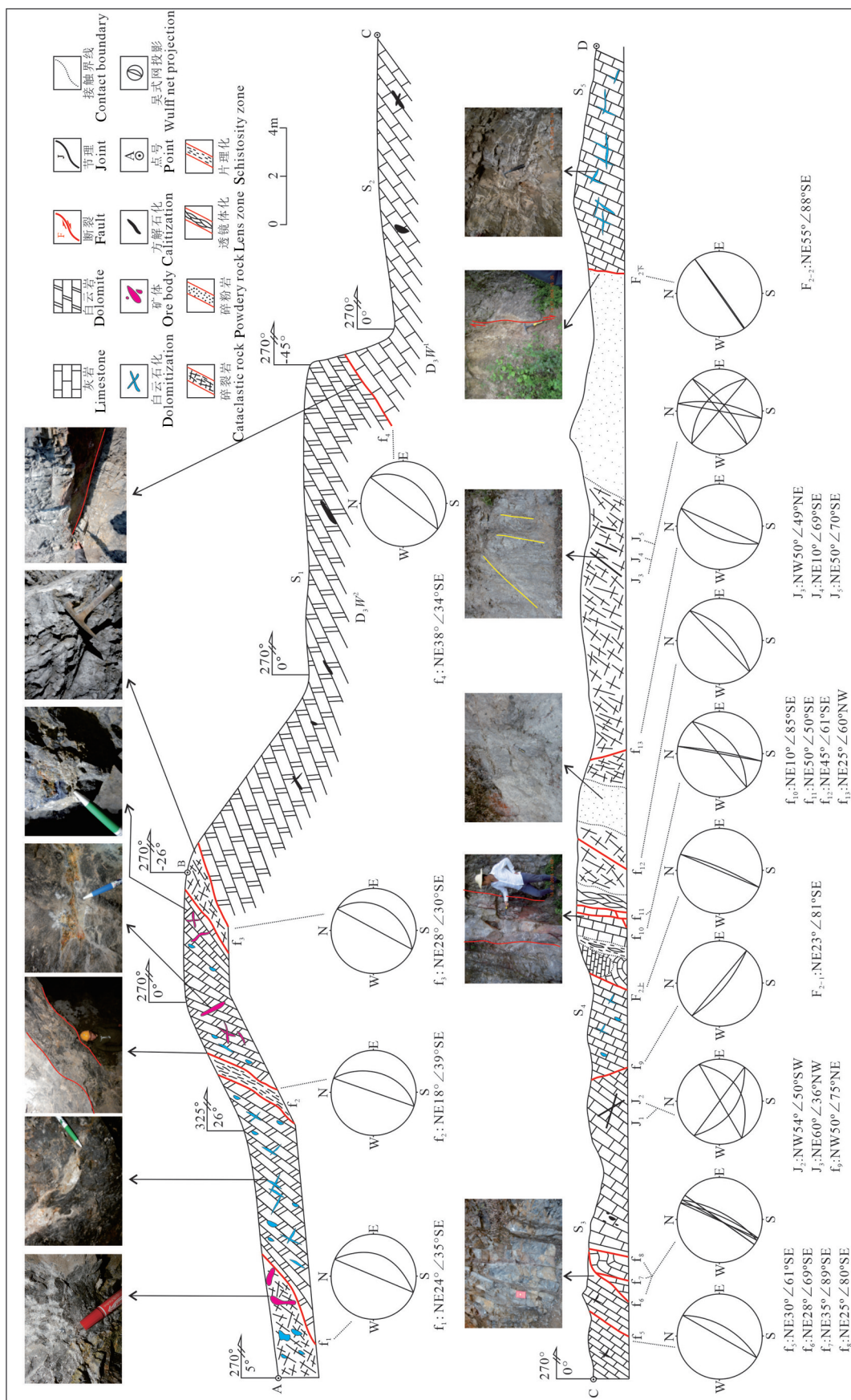


图3 乐开铅锌矿床厂坡段F2主断裂带PM4-5实测构造剖面图及照片
Fig.3 The PM4-5 measured structural profile and photographs of F₂ fault zone section in the Dachangpo ore block of the Lekai lead-zinc deposit

块状白云石分布;在其断裂上盘发育一组NE向层间断裂(f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4);在PM4-5剖面的AB段,可见NE向层间断裂带内发育强片理化、碎裂岩化等现象,脉状、团块状闪锌矿、方铅矿赋存其中,还见白云石、褐铁矿(黄铁矿氧化而成)呈网脉状、团块状分布,反映了这组层间断裂为主要的容矿构造。

LK11点处NE向断裂(f : NE40°∠72°SE),断裂面呈缓波状,断裂带内为褐黄色片理化断层泥,断裂下盘见大量棱角分明、大小混杂的深灰色白云质角砾,被方解石、白云石胶结。断裂上下盘岩石较破碎,同时在断裂上盘发育次级断裂。通过对断裂及旁侧次级断裂特征等综合分析,认为其主要经历了两期构造活动:早期呈右行扭性,晚期呈左行压(扭)性(图4)。

LK917点处NE向断裂(f : NE35°∠58°SE),裂面

呈舒缓波状,裂带宽20~80 cm,断裂带内发育灰—浅灰色白云质碎裂岩,发育团块状、脉状白云石,并具有典型的透镜体化、片理化现象。断裂上下盘为灰—中灰色细晶白云岩,下盘岩石较为破碎,并见少量方解石脉,同时见一组共轭节理 J_1 和 J_2 (J_1 : NW25°∠75°NE, J_2 : NW35°∠65°SW)。该点断裂特征显示其力学性质具有明显的左行压扭性,其主压应力方向NW—SE向(图5)。

LK90点处NE向断裂带(NE31°∠45°SE)(图6),裂面呈舒缓波状,断裂带宽约5 m,带内为灰白色白云质碎裂岩、碎粉岩。该断裂面上见两个方向擦痕,从擦痕可判断该断裂主要有两期构造活动特征:早期具左行压(扭)性,晚期具右行扭压性。

(2)北西向断裂

该组断裂在矿区较为发育,走向介于NW20°~

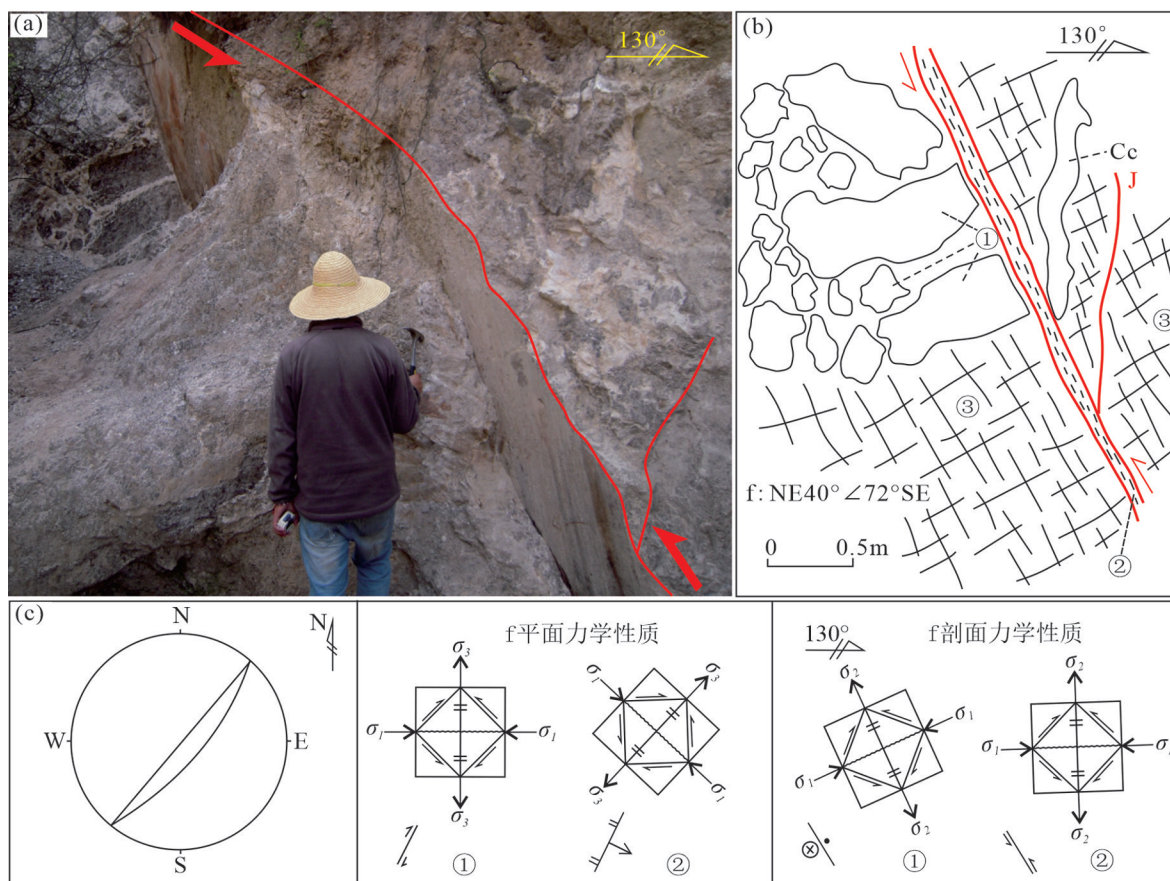


图4 乐开铅锌矿床LK11点断裂剖面素描图与照片

a、b—NE向断裂野外照片及素描图; c—断裂 f 吴式网下半球投影图; 图b中: ①—深灰色白云岩角砾; ②—片理化断层泥; ③—浅灰色白云质碎裂岩; Cc—方解石

Fig.4 Profiles and photographs of fractures at point LK11 of the Lekai lead-zinc deposit

a, b—Picture and sketch map of NE trending fault; c—Projection map of the Wulff net about the fault; Fig.4b: ①—Dark-gray dolomite breccia; ②—Schistose fault gouge; ③—Pale gray dolomitic cataclasite; Cc—Calcite

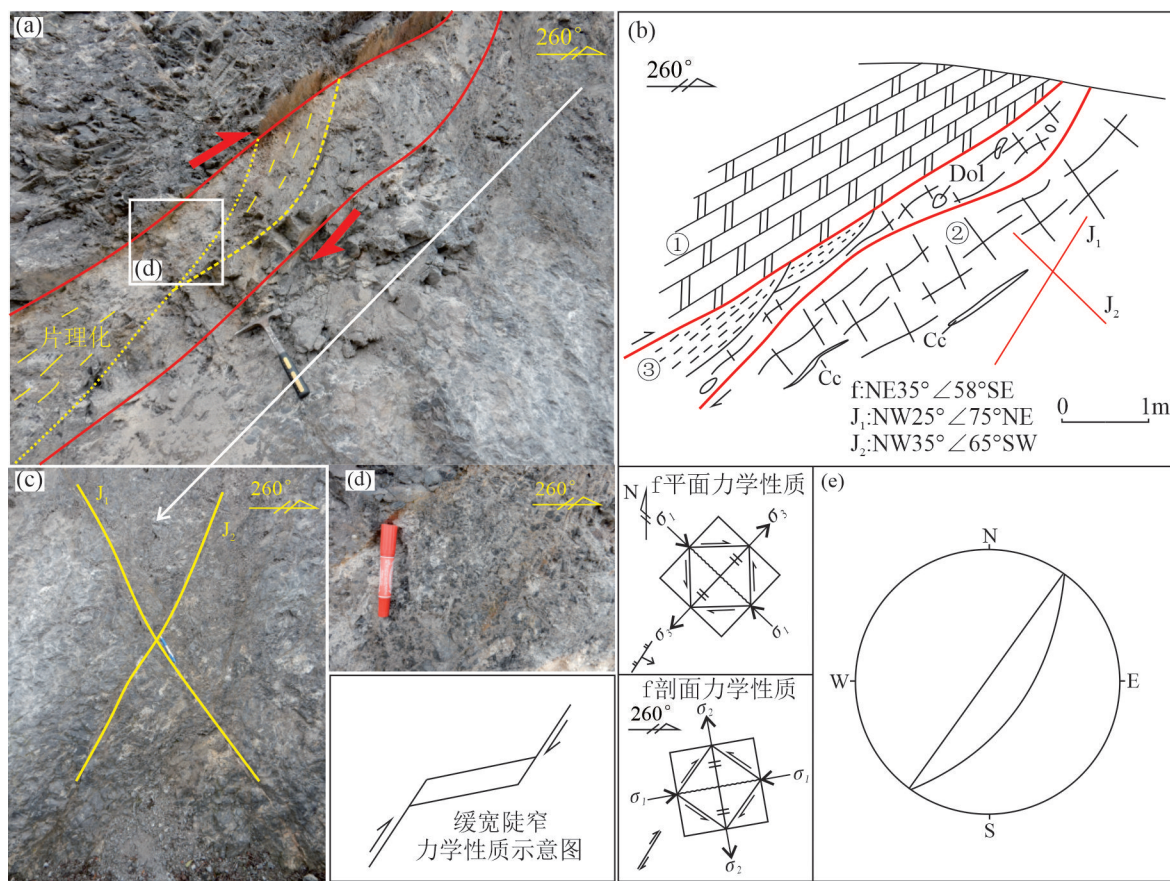


图5 乐开铅锌矿床LK917点断裂剖面素描图和照片

a、b—NE向断裂野外照片及素描图；c—共轭节理野外照片；d—断裂带内片理化照片；e—断裂f吴式网下半球投影图；

①—灰色中细晶白云岩；②—灰色白云质碎裂岩；③—片理化、透镜体化破碎带，发育少量白云石脉；Dol—白云石

Fig.5 Profiles and photographs of fractures at point LK917 of the Lekai lead-zinc deposit

a, b—Photographs and sketches of NE trending faults; c—Photographs of conjugated joints; d—Physical and chemical photographs within the fault zone; e—Projection map of the Wulff net about the fault; ①—Grey medium-fine dolomite; ②—Grey dolomitic cataclasite rock; ③—Foliated lenticular broken zone, the development of a small amount of dolomite veins; Dol—Dolomite

70°，倾角80°以上，倾向SW或NE。带内常充填黄褐色—红褐色泥质物，部分发育构造角砾岩和碎粒岩，多具张性和压扭性特征。LK918点处NW向断裂(NW38°∠68°SW)，裂面呈舒缓波状，带宽10~50 cm，带内充填褐黄色外来泥质物，发育梳状方解石。断裂上下盘为灰色碎裂状白云岩，见脉状、团块状方解石。该断裂具有两期构造活动特征：早期具张性，晚期具右行压扭性(图7)。LK133点处NW向断裂(NW46°∠78°SW)，裂面呈舒缓波状，局部呈锯齿状，裂带宽10~20 cm，带内充填红褐色断层泥与灰色灰岩角砾，断裂两盘为深灰色碎裂状细晶灰岩，沿裂隙见少量方解石细脉。该断裂具有两期构造活动特征：早期呈张性(成矿期)，晚期转化为右行压扭性(图8)。

综上所述，乐开铅锌矿区(床)断裂发育，具有多期构造活动的特征，多经历了力学性质转变，其这种转变可以反映矿区构造的演化过程。NE向断裂主要经历了3期构造活动：右行扭性→左行压(扭)性→右行扭压性；NW向断裂主要经历了2期构造活动：张性→右行压扭性。

3.1.2 矿区构造体系

通过对该矿区内(图1)148个不同方向断裂点的细致观察及结构面力学分析，结合前人对区域构造演化研究成果(韩润生等, 2012)，基于构造形迹筛分和配套(孙家骢和韩润生, 2016)，将乐开矿区构造形迹划分为4类构造体系：早SN构造带、NE构造带、NW构造带、晚SN构造带，反映4期构造成生发展，反映出其主压应力(σ_1)方位变化依次为：近EW→NW30°

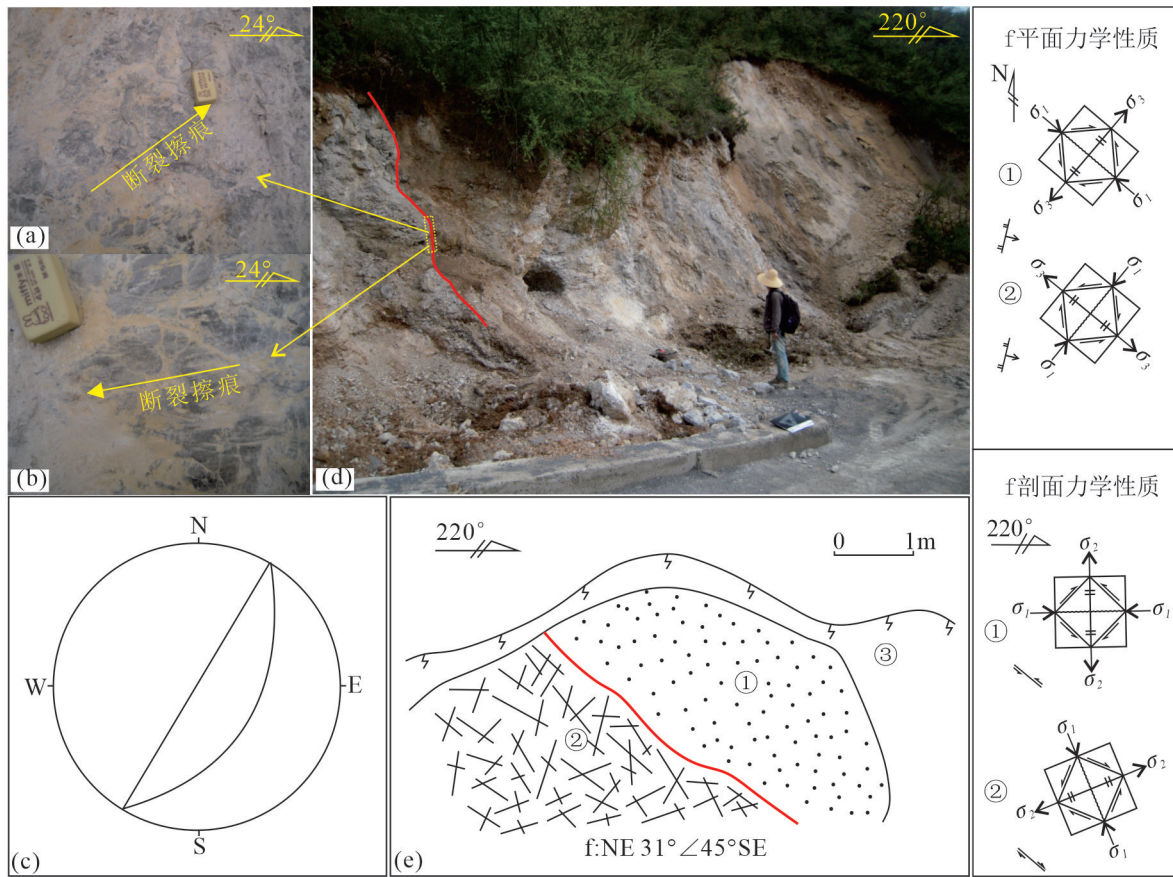


图6 乐开铅锌矿床LK90点断裂剖面素描图和照片

a、b—断裂面上擦痕,分别代表了两期构造活动;c—断裂吴式网下半球投影图;d、e—NNE向断裂野外照片及素描图

图e中:①—灰—灰白色白云质碎粉岩;②—灰—灰黄色白云质碎裂岩;③—第四系坡积物

Fig.6 Profiles and photographs of fractures at point LK90 of the Lekai lead-zinc deposit

a, b—Scratches on the fault surface, representing two stages of tectonic activity respectively; c—Projection map of the Wulff net about the fault;

d, e—Photographs and sketches of NNE trending faults

Fig.6e: ①—Gray-white dolomitic pulverized rock; ②—Gray-yellow dolomitic cataclastic rock; ③—Quaternary sediment

~40°→NE30°~40°→近EW,呈现顺时针循环的演化过程,说明本区经历了规律性的构造演化史。

从区域地层展布与构造形迹等特征来看(图9),可识别的最早构造活动发生在海西期—印支期,形成了近SN向的海库向斜,影响到最新地层P₂,结合前人对贵州印支期构造的研究(秦守荣等,2009),故认为该区海西期—印支早中期的 σ_{H1} 主体方位为近EW向。在印支晚期—燕山早期,古特提斯洋闭合以及该期强烈的造山作用使川滇黔接壤区内产生区域性的NW-SE向主压应力(韩润生等,2014),在毛坪—云炉河矿田范围内形成彝良向斜、石门坎背斜等一系列NE向褶皱。结合矿区(床)内构造研究,认为本区在印支晚期—燕山早期 σ_{H1} 主体方位为NW30°~40°。在这两期构造活动的叠加作用下,使区内如猫猫山背斜

(也称石门坎背斜)为代表性的NE向褶皱发生“S”形弯转。燕山中晚期,伴随印度板块的快速北移和特提斯洋的持续萎缩,黔西北矿集区内的主压应力为NE-SW向(吴开彬等,2019),也与滇东北矿集区的主压应力方向(NE45°~50°)大体一致(韩润生等,2017);喜马拉雅期,前人通过对贵州喜马拉雅期褶皱和断裂的研究,认为区域地应力方向主要为近EW向(秦守荣和刘爱民,1998)。

因此,乐开铅锌矿区构造体系生成发展的顺序为:①早SN构造带(海西期—印支中期);②NE构造带(印支晚期—燕山早期);③NW构造带(燕山中晚期,在该区显示较弱);④晚SN构造带(喜马拉雅期)。其主压应力(σ_1)的方位变化也依次为:近EW→NW30°~40°→NE30°~40°→近EW(图10)。

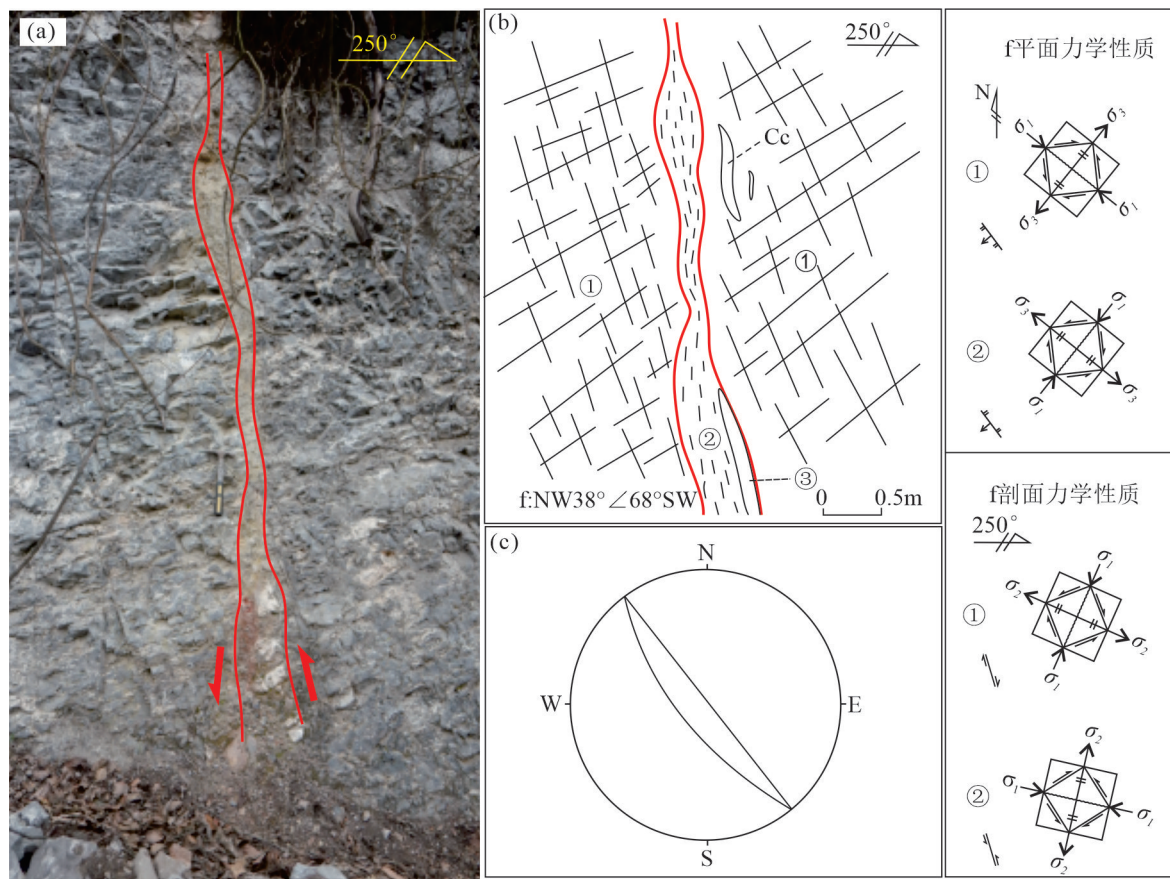


图7 乐开铅锌矿床LK918点断裂剖面照片和素描图

a, b—NW向断裂野外照片及素描图; c—断裂吴式网下半球投影图

图b: ①—灰色细晶碎裂白云岩, 发育脉状、团块状方解石; ②—片理化断层泥; ③—梳状方解石

Fig.7 Profiles and photographs of fractures at point LK90 of the Lekai lead-zinc deposit

a, b—Photographs and sketches of NW trending faults; c—Projection map of the Wulff net about the fault

Fig.7b: ①—Gray fine grain cataclastic dolomite, with veins and clumpy calcite; ②—Schistose fault gouge; ③—Comb-shape calcite

其中NE构造带为主要的成矿构造体系,与川滇黔接壤区铅锌成矿构造体系一致,同时推测区内铅锌成矿作用发生于印支晚期—燕山早期(韩润生等, 2017, 2020; 王明志等, 2019)。

3.2 构造控矿规律

3.2.1 控矿构造型式

在滇东北矿集区,由于印支晚期—燕山早期小江深断裂的持续左行走滑作用(图1a),派生的构造应力场形成会泽—牛街等一系列由(压扭性)断裂构造和次级褶皱构造组成的NE向断褶构造带,并伴有与之直交的北西向张(扭)性断裂,因而形成左列式“多字型”控矿构造型式(图9)。其中,褶皱构造伴随断裂构造成生发展,它们是伴随成矿作用统一的构造应力场持续作用的产物(Han et al., 2007; 韩润生等, 2017)。

在毛坪—云炉河坝铅锌矿田内,NE向的放马坝断裂、毛坪断裂(区域上称为翻身村断裂)、洛泽河断裂与NW向龙街等断裂复合(图9),形成了典型的“多字型”构造(Han et al., 2007)和“入字型”构造,依次控制了放马坝、毛坪、云炉河坝和乐开等一系列铅锌矿床(胡彬和韩润生, 2003)。

在乐开矿区内,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号矿(化)体均产于洛泽河断褶构造的主断裂上盘的NE向层间压扭性断裂带中,呈大致平行且等间距分布特征(图1,图3),并与NW向断裂构成“多字型”控矿构造型式。

上述特征进一步揭示出NE构造带为矿集区、矿田及矿区的主要成矿构造体系,控制了从矿集区、矿田、矿床(矿体)的空间展布,反映了不同序次构造的分级控矿特征,也充分反映了“多字型”、“入字型”构造控矿规律在川滇黔接壤区的普遍性。

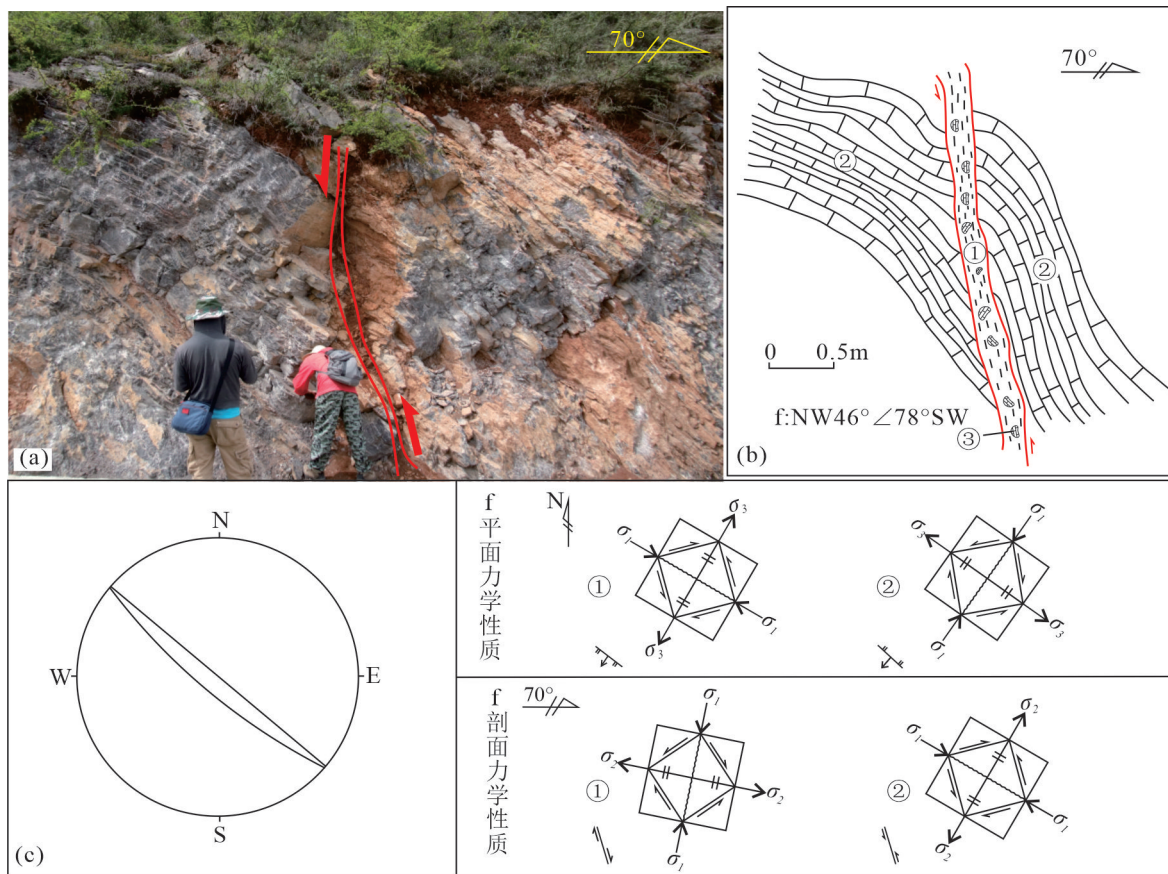


图8 乐开铅锌矿床LK133点断裂剖面素描图

a、b—NW向断裂野外照片及素描图; c—断裂吴式网下半球投影图

图b: ①—红褐色断层泥; ②—灰色细晶灰岩, 见脉状方解石; ③—灰色灰岩角砾, 具有一定磨圆度

Fig. 8 Profiles and photographs of fractures at point LK133 of the Lekai lead-zinc deposit

a, b—Photographs and sketches of NW-trending faults; c—Projection map of the Wulff net about the fault

Fig. 8b: ①—Reddish brown fault gouge; ②—Grey fine limestone with vein calcite; ③—Grey limestone breccia, with a certain degree of roundness

3.2.2 构造分级控矿规律

从控矿构造型式分析可以看出,不同等级、不同序次的构造形迹对成矿所起作用也不尽相同,决定了矿集区、矿田、矿床和矿体的分布规律(孙家聰和韩润生, 2016),其规律主要表现在:

(1)区域内,滇东北地区8条NE向断褶带控制了滇东北矿集区的空间分布(韩润生等, 2014),而会泽—牛街断褶带上的放马坝、毛坪、洛泽河NE向断褶构造控制了毛坪—云炉河坝铅锌矿田(图9,韩润生等, 2017)。

(2)会泽—牛街断褶带内的NE向洛泽河断裂为一条多期活动的断裂带(图9),控制了乐开铅锌矿床(区)的空间分布和构造演化。

(3)乐开矿区的主断裂上盘的次级NE向层间

压扭性断裂带控制了矿体(图1c),而次级断裂和节理裂隙带则控制矿脉(图3)。

4 构造地球化学研究

4.1 样品采集与测试

基于矿区构造控矿规律,通过系统地构造地球化学填图,样品采集原则上按线距100 m,点距50~100 m,样量500 g左右,在构造较发育地段附近加密采集矿化断裂构造岩(白云质碎裂岩、碎粒岩、碎粉岩等)样品,在断裂不发育地段采集白云质矿化蚀变岩及含方解石脉的碎裂白云岩样品。采集的构造地球化学样品652件,经过加工缩分处理至200目。样品分析在西北有色地研院测试中心(具有国家测试甲级资质认证)采用ICP-MS法进行。按照

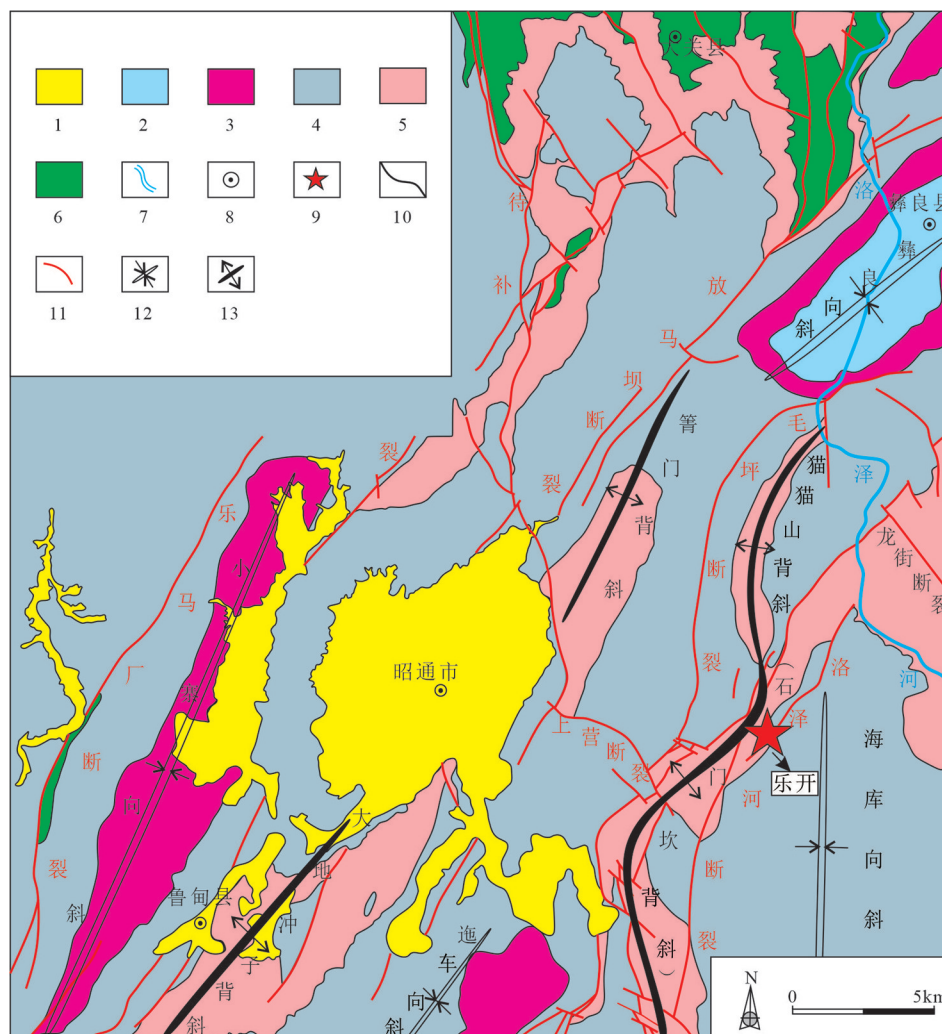


图9 乐开铅锌矿床所在的区域构造地质简图

1—第四系至古近系; 2—侏罗系; 3—三叠系; 4—石炭系至二叠系; 5—泥盆系; 6—志留系至奥陶系; 7—河流; 8—城镇; 9—乐开矿区(床); 10—地层界线; 11—断裂; 12—向斜; 13—背斜

Fig.9 Structure outline map in the Lekai area of the Lekai lead-zinc deposit

1—Quaternary to Paleogene strata; 2—Jurassic strata; 3—Triassic strata; 4—Carboniferous to Permian strata; 5—Devonian strata; 6—Silurian to Ordovician strata; 7—River; 8—Cities and towns; 9—Lekai deposit; 10—Stratigraphic boundary; 11—Fault; 12—Syncline; 13—Anticline

样品总数的3%送测密码样,检测数据的准确性,主要指示元素的平均误差小于5%,分析方法、仪器均达到精度要求。

4.2 元素组合分析

在特定的地质作用过程中,某些具有相似地球化学性质的元素具有共同的地球化学行为和相似的迁移富集规律,从而形成一定的元素组合,也反映一定的地球化学过程(韩润生等, 2001)。因子分析得到的因子得分的高低及矿化元素含量,可以用来圈定构造地球化学异常(徐振邦和姜元仁, 1994; Han et al., 2015),并进一步归纳和提炼元素组

合的地质意义,结合其特征来剖析成矿作用过程,剖析成矿过程中元素迁移和富集的规律等。因此,采用元素组合异常来提取深部的热液矿化信息,并依据构造异常梯度的变化规律推测矿化的空间展布特征和隐伏矿体产状。根据成矿地质条件和元素测试精度要求,选择 Al_2O_3 、 TFe 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 MnO 、 TiO_2 、 Ba 、 Sr 、 Cu 、 Zn 、 Cr 、 Ni 、 V 、 Li 、 Be 、 Sc 、 Co 、 Ga 、 Ge 、 Rb 、 Zr 、 Nb 、 Cd 、 In 、 Sn 、 Cs 、 ΣREE 、 Hf 、 Ta 、 W 、 Pb 、 Bi 、 Th 、 As 、 Sb 、 Hg 等38个元素或氧化物,并通过R型因子分析,得到方差极大旋转矩阵,按照累计方差贡献率达到74.7%提取因子数,将矩

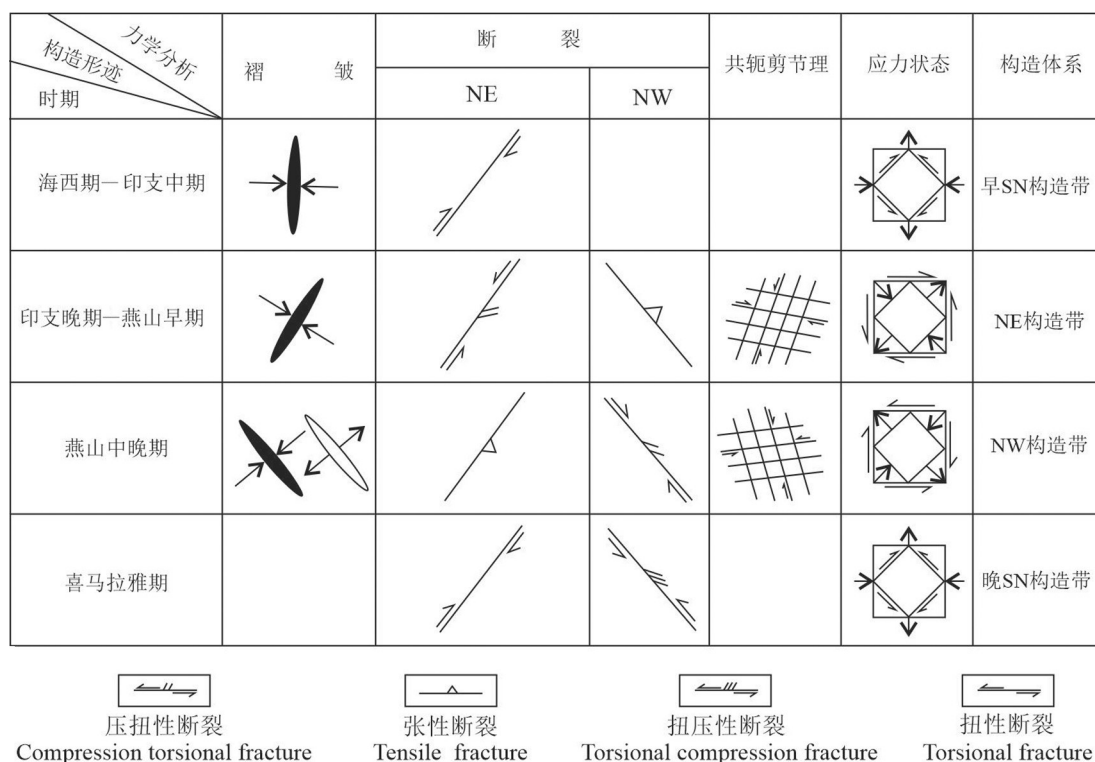


图10 乐开铅锌矿区构造体系生成发展及其演化图解

Fig.10 Maps showing tectonic system and evolution of the Lekai Zinc-lead mining area

阵中每列荷载大于0.5的元素做关联成员,累计提取8个因子(表1): F_1 因子:Th、Cs、Nb、Li、Rb、Hf、REE、Be、TiO₂、Ga、Zr、Ta、Co、Ba、Ge、Sc、Bi; F_2 :Zn、Pb、Cd; F_3 :In、Sn、Ni、Cu; F_4 :—CaO、—Sr; F_5 :K₂O、Al₂O₃、TFE; F_6 :—MgO; F_7 :Sb、As、Hg; F_8 :V、Ni、Cr。

通过前人对元素地球化学特征、共生组合特征的研究(刘英俊等,1984;邵跃,1997),结合乐开铅锌矿床成矿地质条件,认为 F_1 因子主要代表地层的主微量元素组合; F_2 因子代表中温矿化元素组合; F_3 因子代表中高温成矿元素组合; F_4 因子代表方解石化元素组合; F_6 因子代表白云石化元素组合; F_7 因子代表低温成矿元素组合; F_8 因子可能代表了含煤碎屑岩的元素组合; F_8 地质意义待查。

4.3 构造地球化学异常讨论

Han et al.(2015)指出,矿床构造地球化学特征可以用因子得分等值线图来描述,因子得分的高低实际指示了取样点的矿化强弱程度,因子得分的空间分布规律相当于矿床内矿化空间分布规律。因此,现将 F_2 、 F_3 和 F_7 三个因子异常的得分等值线图与地质图叠合,绘制构造地球化学异常-地质图(图11)。

4.3.1 构造地球化学异常特征

F_2 因子(Zn、Pb、Cd)异常(近矿晕元素组合异常)主要由A1~A12共计12个异常区组成; F_3 因子(In、Sn、Ni、Cu)异常(尾矿晕元素组合异常)主要由B1~B6共计6个异常区组成; F_7 因子(As、Sb、Hg)异常(前缘晕元素组合异常)主要由C1~C11等11个异常区组成。 F_2 、 F_3 和 F_7 因子的元素组合异常总体走向呈近NE向,且向SE方向递减。其中,近矿晕异常中心基本位于NE向主断裂的上盘,局部位于NE、NW向断裂交汇地段。

4.3.2 构造地球化学异常解释

(1)异常分布特征指示矿化中心。矿区内已有4处老硐揭露了浅部铅锌矿(化)体,与A1、A7、A9和A10的矿化元素组合异常重合,即表明矿化异常高值区是矿体原生晕的集中反映,也表明区内各矿体应为同一成矿作用的产物。同时,A3-B3-C5、A7-C8等2个不同异常叠加区与这4个异常区中心大致呈等间距、斜列分布,指示该区存在6个次级矿化中心。这些均是找矿预测的重要依据,指示了这6个异常区为找矿的重点靶区。

表1 乐开铅锌矿床构造岩因子分析方差极大旋转因子载荷矩阵
Table.1 Varimax rotation factor load matrix for tectonites in Lekai lead-zinc deposit

元素/ 因子	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈	元素/ 因子	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇	F ₈
Al ₂ O ₃	0.459	-0.018	0.156	0.053	0.789	0.105	0.140	0.211	Ge	0.658	0.417	-0.142	0.342	0.097	0.100	0.135	-0.108
TFe	0.315	0.317	0.135	0.337	0.556	0.031	0.384	0.222	Rb	0.838	0.106	0.210	-0.126	0.274	0.008	0.047	0.285
CaO	-0.341	-0.049	0.008	-0.777	-0.147	-0.204	-0.206	-0.067	Zr	0.706	0.000	0.134	0.243	0.223	0.483	0.011	0.232
MgO	-0.255	0.010	-0.062	-0.118	-0.363	-0.714	0.079	-0.015	Nb	0.858	0.035	-0.114	0.331	0.082	0.011	0.079	0.099
K ₂ O	0.475	-0.073	0.107	-0.129	0.796	0.074	0.051	0.097	Cd	0.000	0.798	-0.009	-0.054	-0.010	-0.029	0.193	0.067
Na ₂ O	0.255	0.236	0.040	0.015	0.497	0.068	0.047	0.237	In	0.101	0.139	0.832	0.024	0.101	0.012	0.097	0.192
MnO	0.026	0.237	-0.015	0.117	0.176	-0.488	0.179	0.134	Sn	-0.005	-0.090	0.778	-0.016	0.030	0.009	-0.009	0.067
TiO ₂	0.757	0.057	0.227	0.052	0.330	0.274	0.060	0.352	Cs	0.862	0.121	-0.060	-0.099	0.288	-0.142	0.080	-0.014
Ba	0.662	0.074	0.155	0.016	0.272	0.141	0.092	0.392	REE	0.783	0.075	0.205	-0.011	0.199	0.210	0.031	0.236
Sr	0.046	-0.119	0.064	-0.646	0.252	0.436	-0.193	-0.004	Hf	0.831	0.032	0.189	0.192	0.204	0.219	0.072	0.266
Cu	0.338	0.150	0.503	-0.070	0.066	0.162	0.200	0.181	Ta	0.695	-0.002	0.114	0.132	0.062	-0.021	0.076	0.215
Zn	0.161	0.877	0.083	0.069	0.097	-0.129	0.251	0.111	W	0.216	-0.066	0.035	0.025	0.044	-0.091	0.031	0.338
Cr	0.482	0.151	0.274	0.298	0.193	0.188	0.184	0.568	Pb	0.084	0.823	0.095	0.122	0.055	-0.055	0.250	0.017
Ni	0.137	0.177	0.543	-0.028	0.255	-0.015	0.127	0.681	Bi	0.565	-0.004	0.118	0.097	0.029	-0.022	0.177	0.090
V	0.206	0.293	0.362	0.009	0.223	0.046	0.242	0.690	Th	0.926	0.059	0.074	0.059	0.202	0.071	0.035	0.104
Li	0.842	0.066	-0.028	0.001	0.151	0.080	0.027	-0.113	As	0.080	0.182	0.125	0.144	0.127	-0.093	0.774	0.248
Be	0.760	0.053	-0.221	-0.034	-0.076	0.062	-0.075	-0.373	Sb	0.046	0.278	0.014	0.043	0.047	-0.097	0.797	0.044
Sc	0.579	0.163	0.067	-0.046	0.345	-0.156	0.091	0.469	Hg	0.130	0.273	0.087	0.122	0.038	-0.049	0.726	0.007
Co	0.678	0.050	0.073	0.008	0.131	-0.069	0.045	0.337	Expl.Var	11.034	2.965	2.554	1.727	3.022	1.615	2.480	2.992
Ga	0.748	0.107	0.230	0.066	0.252	0.060	0.038	0.409	Prp.Totl	0.290	0.078	0.067	0.045	0.080	0.042	0.065	0.079

注:表中TFe为全铁,Expl.Var为方差解释率,Prp.Totl为总方差贡献率。

(2)异常特征指示成矿流体流向。近矿晕、前缘晕异常与尾晕异常相邻或重叠,从整体来看,尾晕异常分布在近矿晕、前缘晕异常SW侧,指示成矿流体自SW向NE运移,与滇东北矿集区毛坪铅锌矿床成矿流体流向一致(韩润生等,2017)。

(3)异常特征指示隐伏矿体大致产状。Han et al.(2007)在会泽铅锌矿深部及外围找矿中,指出了深部矿体产状的判别方法。从A1、A7、A9和A10异常特征来看,异常走向大致呈NE-SW向,而异常梯度值自NW向SE逐渐降低,指示深部矿体走向呈NE-SW向,且向SE方向倾斜,这与老硐中揭露的矿体产状基本一致。而A3、A8异常特征与这4个异常基本一致,推断A3、A8两个异常区深部的隐伏矿体产状为走向呈NE向,倾向为SE向。

(4)异常展布特征可揭示构造控矿规律。近矿晕、尾晕、前缘晕异常总体呈NE向展布,反映了NE向构造的控矿规律。近矿晕异常中,NW向断裂明显将异常区分隔(A2与A3,A9与A10),但局部也位于高值异常中心(A8、A11),部分并发育矿化的现

象,从而解释了在成矿期NW向断裂起配矿之作用,而在晚期主要错断矿体,这与前文对构造解析结果相吻合。

5 深部找矿预测

5.1 找矿标志

根据构造控矿规律和构造地球化学特征,归纳主要找矿标志如下:

(1)岩性标志:矿体主要赋存于NE向主断裂上盘背斜的上泥盆统望城坡组(D₃w)蚀变白云岩中,表明铅锌成矿作用严格受岩性控制。

(2)构造标志:矿床严格受NE向主断裂与NW向断裂组成的“多字型”、“入字型”构造控制;主断裂上盘的褶皱翼部的NE向层间断裂带控制矿体产状。因此,NE向主断裂构造及其上盘次级背斜翼部的层间压扭性断裂带是主要的找矿标志。

(3)构造地球化学异常标志:根据不同元素组合的构造地球化学异常,在F₂、F₇两个因子异常(中、低温成矿元素组合异常)的浓集中心的叠加——相

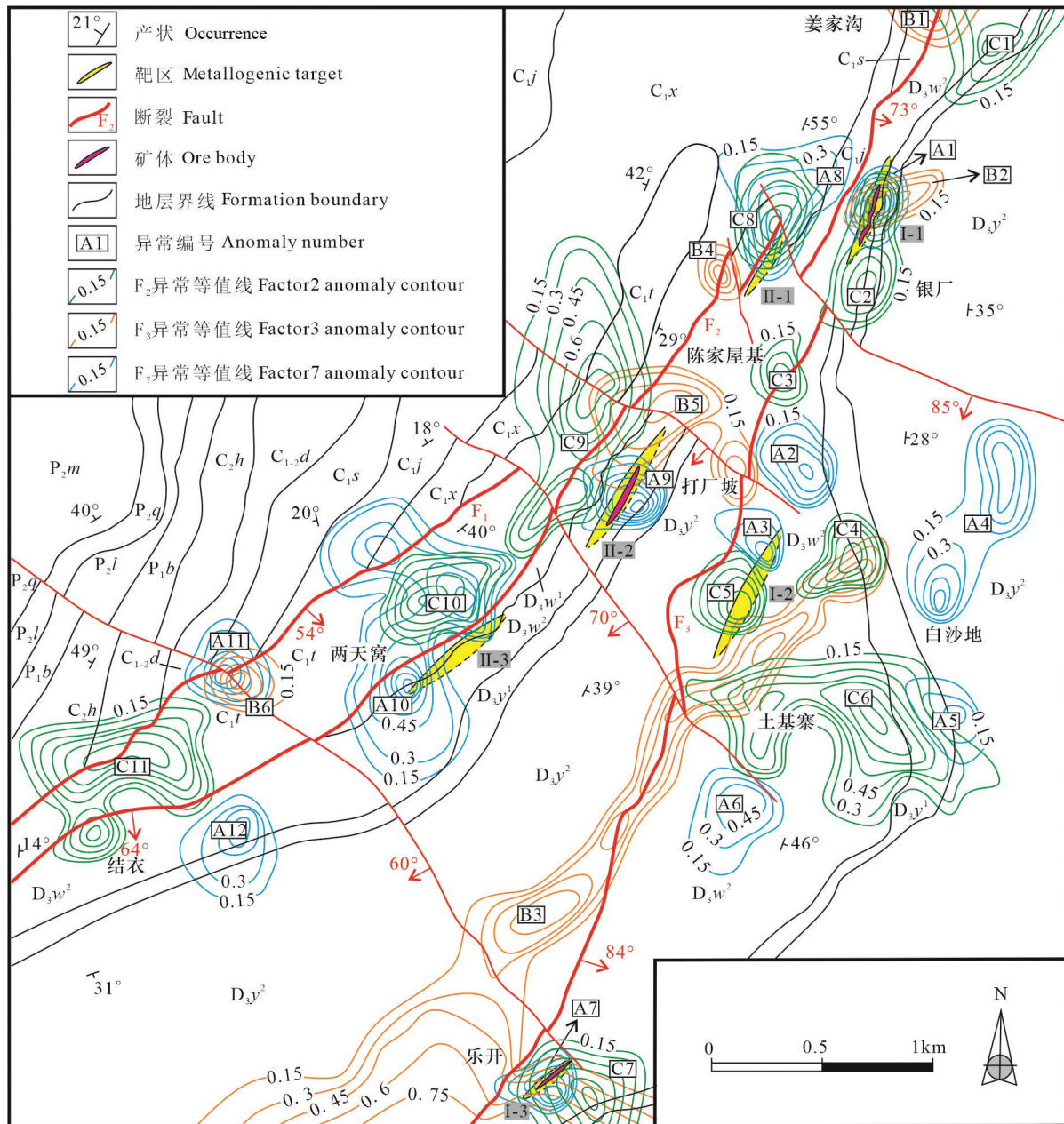


图11 乐开铅锌矿床构造地球化学异常地质图

Fig.11 Tectono-geochemical anomalies and geological map of the Lekai lead-zinc deposit

邻部位均可作为找矿预测提供依据。

(4)热液蚀变标志:本区围岩蚀变主要表现为热液成矿特点的中—强铁锰白云石化、黄铁矿化和方解石化等。因此,在不同矿化蚀变的叠合部位为找矿的有利地段。

5.2 找矿预测

(1)浅部矿体之深部定位靶区

I-1、I-3、II-2、II-3四个靶区均位于已发现的

浅部矿体SE侧,从构造地球化学异常特征来看,(Zn-Pb-Cd)近矿晕异常、(As-Sb-Hg)前缘晕异常与(In-Sn-Ni-Cu)尾晕异常在此均发生重叠,异常浓集中心大多位于矿体的SE侧,且异常梯度向SE方向增强,预测深部隐伏矿体走向NE,向SE方向陡倾斜,由此圈定了4个靶区,推断深部存在已知矿体的平行矿体。在I-1、II-2内通过钻探工程初步验证,在这两个地段发育强烈的方解石化、白云石化

等热液蚀变,发现厚度达 16 m 含铅锌黄铁矿矿体和铅锌矿化体,其产状与推断一致。

(2) 热液蚀变组合和构造地球化学异常叠合区

通过矿区构造解析,确立了乐开铅锌矿床主要受“多字型”、“入字型”构造控矿型式控制(图 11)。据此推断矿体在平面上应具有“雁列”式、“等间距”分布等特点,故认为 I-2、II-1 两个地段具有较大的找矿前景。

在 I-2、II-1 两个地段, Zn-Pb-Cd、In-Sn-Ni-Cu、Sb-As-Hg 3 个元素组合异常明显,异常走向呈近 NE 向,异常梯度向 SE 方向减弱,与已知矿体的产状基本一致。这两个地段存在较强铅锌矿化和白云石化、方解石化、黄铁矿化等蚀变(图 11)。因此,推断这两个地段的岩性、构造的有利部位有隐伏矿(化)体赋存。

综上所述,该矿区构造控矿特征明显,其深部有良好的找矿前景,并圈定了 6 个定位找矿靶区: I-1(银厂)、I-2(土基寨北)、I-3(乐开)深部、II-1(陈家屋基北)、II-2(打厂坡)深部和 II-3(两天窝)深部(图 11)。

6 结 论

(1) 矿床构造精细解析厘定出乐开铅锌矿区构造体系为:早 SN 构造带→NE 构造带→NW 构造带→晚 SN 构造带,分别对应海西期—印支早中期→印支晚期—燕山早期→燕山中晚期→喜马拉雅期。推测成矿期为印支晚期—燕山早期。NE 向断裂—褶皱构造与 NW 向断裂组成了矿床的“多字型”、“入字型”控矿构造型式。

(2) 不同元素组合异常分布特征可指示矿化中心;指示成矿流体在平面上自 SW 向 NE 运移;依据构造地球化学异常梯度变化特征,推断深部矿体的产状特征。结合矿区构造控矿规律及“多字型”、“入字型”控矿构造型式,圈定了矿区深部 6 个定位找矿靶区。

致谢:在野外工作和撰稿过程中得到了西南能矿有限公司技术人员和昆明理工大学刘飞博士、王明志博士的无私帮助,论文审稿过程中审稿人提出了宝贵的修改意见,谨致谢忱!

References

Cheng Chen, Han Runsheng, Wang Lei, Xiao Xianguo, He Zhiwei, Li Bo, Zhou Xuanling. 2019. The generation, development and ore-

controlling of structures of the Fulaichang lead-zinc deposit, northeastern Guizhou[J]. Journal of Geomechanics, 25(1): 90-104 (in Chinese with English abstract).

Cheng Penglin, Xiong Wei, Zhou Gao, He Zhiwei. 2015. A preliminary study on the origins of ore-forming fluids and their migration directions for Pb-Zn Deposits in NW Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 35(4): 509-514(in Chinese with English abstract).

Han Runsheng, Liu Congqiang, Ma Deyun, Ma Gensheng, Hu Bin. 2001. Fault tectono-geochemical features and ore-forming prognosis of orientation in Tongchang ore-field, Tongchang, Shaanxi[J]. Geology-Geochemistry, 29(3): 158-163(in Chinese with English abstract).

Han Runsheng. 2003. Preliminary discussion on research contents and methods of tectono-metallogenic dynamics and concealed ore orientation prognosis[J]. Geology and Exploration, 39(1): 5-9(in Chinese with English abstract).

Han Runsheng. 2005. Orefield/deposit tectono-geochemical method for the localization and prognosis of concealed orebodies[J]. Geology and Exploration, 24(10/11): 978-984(in Chinese with English abstract).

Han Runsheng, Liu Congqiang, Huang Zhilong, Chen Jin, Ma Deyun, Lei Li, Ma Gensheng. 2007. Geological features and origin of the Huize carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag) district, Yunnan, South China[J]. Ore Geology Reviews, 31: 360-383.

Han Runsheng, Hu Yuzhao, Wang Xuekun, Hou Baohong, Huang Zhilong, Chen Jin, Wang Feng, Wu Peng, Li Bo, Wang Hongjiang, Dong Ying, Lei Li. 2012. Mineralization model of rich Ge-Ag-bearing Zn-Pb polymetallic deposit concentrated district in Northeastern Yunnan, China[J]. Acta Geologica Sinica, 86(2): 280-294(in Chinese with English abstract).

Han Runsheng. 2013. Main study progress for ten years of tectono-geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(2): 198-203(in Chinese with English abstract).

Han Runsheng, Wang Feng, Hu Yuzhao, Wang Xuekun, Ren Tao, Qiu Wenlong, Zhong Kanghui. 2014. Metallogenic tectonic dynamics and chronology constrains on the Huize-type (HZT) germanium-rich silver-zinc-lead deposits[J]. Geotectonica et Metallogenia, 38(4): 758-771(in Chinese with English abstract).

Han Runsheng, Chen Jin, Wang Feng, Wang Xuekun, Li Yuan. 2015. Analysis of metal-element association halos within fault zones for the exploration of concealed ore-bodies—A case study of the Qilinchang Zn-Pb-(Ag-Ge) deposit in the Huize mine district, northeastern Yunnan, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 159(11): 62-78.

Han Runsheng, Zhang Yan, Wang Feng, Wu Peng, Qiu Wenlong, Li Wenyao. 2017. Metallogenic Mechanism and Concealed Ore Orientation Prognosis of Rich Ge-Ag-bearing Zn-Pb Polymetallic Deposit Concentrated District in Northeastern

- Yunnan[M]. Beijing: Science Press, 125–196(in Chinese).
- Han Runsheng, Wu Peng, Wang Feng, Zhou Gaoming, Li Wenyao, Qiu Wenlong. 2019. “Four Steps Type” ore– prospecting method for deeply concealed hydrothermal ore deposits—A case study of the Maoping Zn– Pb (Ag– Ge) deposit in southwestern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(2): 246– 257(in Chinese with English abstract).
- Han Runsheng, Wang Mingzhi, Jin Zhongguo, Li Bo, Wang Ziyong. 2020. Ore– controlling mechanism of NE– trending ore– forming structural system at Zn– Pb polymetallic ore concentration area in northwestern Guizhou[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 850– 868 (in Chinese with English abstract).
- Hu Bin, Han Runsheng. 2003. The ore–controlling structure and ore– prospecting direction of Maoping lead– zinc deposit[J]. *Yunnan Geology*, 22(3): 295–303(in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo. 2008. Research on the Ore– controlling Factors, Metallogenic Regularity an Prediction of Lead– Zinc Ore District in Northwest, Guizhou[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1–109(in Chinese).
- Liu Hechang. 1995. Tectonic ore– control in Yunnan– Sichuan – Guizhou lead– zinc mining areas[J]. *Yunnan Geology*, 14(3): 173– 189(in Chinese with English abstract).
- Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin, Wang Henian, Chu Tongqing, Zhang Jinrong. 1984. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1–548(in Chinese).
- Lü Guxian, Sun Yan, Liu Deliang, Wu Xueyi, Liu Ruixun. 2011. Tectono– geochemistry: A review[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35(4): 479–494(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui, Lu Songnian, Den Jinfu, Feng Yimin, Zhang Kexin, Zhang Zhiyong, Wang Fangguo, Xing Guangfu, Hao Guojie, Feng Yanfang. 2009. Subdivision of tectonic units in China[J]. *Geology in China*, 36(1): 1–28(in Chinese with English abstract).
- Qin Shourong, Liu Aimin. 1998. A discussion on the Himalayan tectonic movement in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 15(2): 105– 114(in Chinese with English abstract).
- Qin Shourong, Zhang Mingfa, Gong Mei, Kuang Zhong. 2009. Indosinian movement in Guizhou[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 29(2): 100– 103(in Chinese with English abstract).
- Shao Yue. 1997. *Rock Measurements (Primary Halo Method) in the Hydrothermal Deposits Prospecting*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–62(in Chinese).
- Song Danhui, Han Runsheng, Wang Feng, Wang Mingzhi, Zhou Wei, Luo Da. 2021. Structural ore– controlling mechanism and its implications for deep prospecting of Qingshan lead– zinc deposit in northwest Guizhou, China[J]. *Geology in China*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210104.1853.006.html> (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiacong, Han Runsheng. 2016. *Theory and Method of Ore– field Geomechanics*[M]. Beijing: Science Press, 1–356(in Chinese).
- Tu Guangchi. 1984. Tectonics and geochemistry[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 8(1): 1–5(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingzhi, Han Runsheng, Zhou Wei, Song Danhui, Luo Da, Zhou Jianfei, Wu Ruilin. 2019. Ore– forming structure analysis of the Liangyan Lead– zinc mining area in northwestern Guizhou deposit concentration district, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(2): 187–197(in Chinese with English abstract).
- Wu Kaibin, Jiang Kaiyuan, Huang Wenjun, Yue Lianhong, Zhang Deming. 2019. Tectonic formation features and its evolution in Nayong– Shuicheng area of northwest Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 36(2): 165–172(in Chinese with English abstract).
- Xiao Xianguo, Huang Zhilong, Zhou Jiaxi, Jin Zhongguo, Li Xiaobiao, Zhang Lunwei. 2011. Several problems involved in genetic studies on the Pb– Zn deposits, northwest Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 419–424.
- Xu Yaming, Liao Guixinag, Liao Liping. 2009. Geological and geochemical characteristics of multi– elements and prospecting criteria in northwestern Guizhou Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(5): 818– 823(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhengbang, Lou Yuanren. 1994. *Foundation of Mathematical Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1– 62(in Chinese).
- Yu Weilai, Fan Liangwu. 2007. Geological characteristics of typical lead– zinc deposits and pondering on ore prospecting in northwestern Guizhou Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(3/4): 461–465.

附中文参考文献

- 成晨, 韩润生, 王雷, 肖宪国, 何志威, 李波, 周喧翎. 2019. 黔西北福来厂铅锌矿床构造成生发展及其控矿作用[J]. *地质力学学报*, 25(1): 90–104.
- 程鹏林, 熊伟, 周高, 何志威. 2015. 黔西北地区铅锌矿床成矿流体起源与运移方向初探[J]. *矿物学报*, 35(4): 509–514.
- 韩润生, 刘丛强, 马德云, 马更生, 胡彬. 2001. 陕西铜厂地区断裂构造地球化学及定位成矿预测[J]. *地质地球化学*, 29(3): 158–163.
- 韩润生. 2003. 初论构造成矿动力学及其隐伏矿定位预测研究内容和方法[J]. *地质与勘探*, 39(1): 5–9.
- 韩润生. 2005. 隐伏矿定位预测的矿田(床)构造地球化学方法[J]. *地质通报*, 24(10/11): 978–984.
- 韩润生, 胡煜昭, 王学琨, Hou Baohong, 黄智龙, 陈进, 王峰, 吴鹏, 李波, 王洪江, 董英, 雷丽. 2012. 滇东北富锗银铅锌多金属矿集区矿床模型[J]. *地质学报*, 86(2): 280–294.
- 韩润生. 2013. 构造地球化学十年主要进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 32(2): 198–203.
- 韩润生, 王峰, 胡煜昭, 王学琨, 任涛, 邱文龙, 钟康惠. 2014. 会泽型(HZT)富锗银铅锌矿床成矿构造动力学研究及年代学约束[J]. 大

- 地构造与成矿学, 38(4): 758–771.
- 韩润生, 张艳, 王峰, 吴鹏, 邱文龙, 李文尧. 2017. 滇东北矿集区富锕铅锌矿床成矿机制与隐伏矿定位预测[M]. 北京: 科学出版社, 125–197.
- 韩润生, 吴鹏, 王峰, 周高明, 李文尧, 邱文龙. 2019. 论热液矿床深部大比例尺“四步式”找矿方法——以川滇黔接壤区毛坪富锕铅锌矿为例[J]. 大地构造与成矿学, 43(2): 246–257.
- 韩润生, 王明志, 金中国, 李波, 王子勇. 2020. 黔西北铅锌多金属矿集区成矿构造体系及其控矿机制[J]. 地质学报, 94(3): 850–868.
- 胡彬, 韩润生. 2003. 毛坪铅锌矿构造控矿及找矿方向[J]. 云南地质, 22(3): 295–303.
- 金中国. 2008. 黔西北地区铅锌矿控矿因素、成矿规律与找矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1–109.
- 柳贺昌. 1995. 滇、川、黔铅锌成矿区的构造控矿[J]. 云南地质, 14(3): 173–189.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 王鹤年, 储同庆, 张景荣. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1–548.
- 吕古贤, 孙岩, 刘德良, 吴学益, 刘瑞珣. 2011. 构造地球化学的回顾与展望[J]. 大地构造与成矿学, 35(4): 479–494.
- 秦守荣, 刘爱民. 1998. 论贵州喜山期的构造运动[J]. 贵州地质, 15(2): 105–114.
- 秦守荣, 张明发, 龚梅, 况忠. 2009. 贵州的印支运动[J]. 沉积与特提斯地质, 29(2): 100–103.
- 邵跃. 1997. 热液矿床岩石测量(原生晕法)找矿[M]. 北京: 地质出版社, 1–62.
- 宋丹辉, 韩润生, 王峰, 王明志, 周威, 罗达. 2021. 黔西北青山铅锌矿床构造控矿机理及其对深部找矿的启示[J]. 中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20210104.1853.006.html>.
- 孙家骢, 韩润生. 2016. 矿田地质力学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1–356.
- 涂光炽. 1984. 构造与地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 8(1): 1–5.
- 王明志, 韩润生, 周威, 宋丹辉, 罗达, 周剑飞, 吴睿林. 2019. 黔西北矿集区亮岩铅锌矿区成矿构造解析[J]. 地质力学学报, 25(2): 187–197.
- 吴开彬, 蒋开源, 黄文俊, 跃连红, 张德明. 2019. 黔西北纳雍—水城一带构造变形特征及其演化[J]. 贵州地质, 36(2): 165–172.
- 肖宪国, 黄智龙, 周家喜, 金中国, 李晓彪, 张伦尉. 2011. 黔西北铅锌矿床成因研究中的几个问题[J]. 矿物学报, 31(3): 419–424.
- 许亚明, 廖桂香, 廖莉萍. 2009. 黔西北地区多元素地球化学特征与找矿标志[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(5): 818–823.
- 徐振邦, 娄元仁. 1994. 数学地质基础[M]. 北京: 地质出版社, 1–226.
- 余未来, 范良伍. 2007. 黔西北地区典型铅锌矿床地质特征分析及找矿思路[J]. 矿物学报, 27(3/4): 461–465.