

doi: 10.12029/gc20200828002

宋丹辉, 韩润生, 王峰, 王明志, 何治, 周威, 罗达. 2024. 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, 51(2): 399–425.

Song Danhui, Han Runsheng, Wang Feng, Wang Mingzhi, He Zhi, Zhou Wei, Luo Da. 2024. Structural ore-controlling mechanism of the Qingshan lead-zinc deposit in northwestern Guizhou, China and its implications for deep prospecting[J]. Geology in China, 51(2): 399–425(in Chinese with English abstract).

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

宋丹辉^{1,2}, 韩润生^{1,2}, 王峰³, 王明志^{1,2}, 何治⁴, 周威^{1,2}, 罗达^{1,2}

(1. 昆明理工大学国土资源学院, 云南 昆明 650093; 2. 有色金属矿产地质调查中心 西南地质调查所, 云南 昆明 650093; 3. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 655011; 4. 贵州红桥矿业集团有限公司, 贵州 六盘水 553000)

摘要:【研究目的】青山铅锌矿床地处扬子地块西南缘的黔西北矿集区威宁—水城成矿亚带中段, 严格受构造控制, 资源潜力巨大。基于前期资料综合分析及野外地质调研, 发现矿区构造成生发展过程和构造控矿机理不清、深部找矿勘查方向不明等问题制约了找矿突破。【研究方法】本文应用矿田地质力学理论和方法, 通过大比例尺构造剖面精测、不同方向控矿构造力学性质鉴定与不同期次、序次构造筛分, 结合区域构造应力场变化特征, 揭示了构造控矿机理。【研究结果】自印支期以来, 该区的主压应力方向主要历经了北东—南西向→北西—南东向→北东—南西向→近东西向的转变过程, 依次形成了早北西构造带、北东构造带、晚北西构造带、南北构造带(构造体系)。通过成矿构造解析及其与成矿关系讨论, 厘定了北东构造带为该矿区的成矿构造体系, 揭示了构造分级控矿规律: 北西向威宁—水城断裂、威水背斜为矿区的一级控矿构造, 控制了威宁—水城矿化带或矿田的展布; 威宁—水城断裂扭动作用派生的北西向断裂 F_1 、 F_2 , 控制了矿床(矿体群)的分布, 为矿区的二级控矿构造; F_1 、 F_2 断裂间的层间断裂破碎带, 直接控制了矿体的形态和产状, 为三级控矿构造; 矿体两侧的节理裂隙带控制矿脉, 为四级控矿构造。【结论】青山铅锌矿床构造分级控矿规律明显, 主要受四个等级的控矿构造控制, 并形成了与其相对应的 4 种矿化样式。

关键词: 控矿作用机理; 成矿构造体系; 构造控矿模式; 矿产勘查启示; 青山铅锌矿床; 黔西北; 矿产勘查工程

创新点: 本文系统划分了矿区内控矿构造等级及矿化样式, 厘定控矿构造型式, 揭示了构造控矿机理, 据此构建了构造控矿模式, 并预测发现青山副井深部 6、7 中段的隐伏矿体。该研究为矿床成矿规律研究和找矿勘查指明了方向, 也为黔西北铅锌矿集区深部及外围找矿提供了重要启示。

中图分类号: P618.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0399-27

Structural ore-controlling mechanism of the Qingshan lead-zinc deposit in northwestern Guizhou, China and its implications for deep prospecting

SONG Danhui^{1,2}, HAN Runsheng^{1,2}, WANG Feng³, WANG Mingzhi^{1,2}, HE Zhi⁴, ZHOU Wei^{1,2}, LUO Da^{1,2}

收稿日期: 2020-08-28; 改回日期: 2021-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572060)、云岭学者资助项目(2014)、云南省矿产资源预测评价工程实验室(2010)及云南省地质过程与矿产资源省创新团队项目(2012)联合资助。

作者简介: 宋丹辉, 男, 1995 年生, 硕士生, 地质工程专业; E-mail: 806798929@qq.com。

通讯作者: 韩润生, 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事构造成矿动力学及隐伏矿产预测、矿床学研究; E-mail: 554670042@qq.com。

(1. *Kunming University of Science and Technology, College of Land and Resources Engineering, Kunming 650093, Yunnan, China*; 2. *Southwest Institute of Geological Survey, Geological Survey Center for Non-ferrous Mineral Resources, Kunming 650093, Yunnan, China*; 3. *Yunnan Chihong Zinc and Germanium Co., Ltd., Qujing 655011, Yunnan, China*; 4. *Guizhou Hongqiao Mining Group Co. LTD, Liupanshui 553000, Guizhou, China*)

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

[Objective] The Qingshan medium-size Pb-Zn deposit is located in the middle of the Weining-Shuicheng metallogenic sub-belt in the southwest margin of the Yangzi Block. The ore-body of the Qingshan deposit is strict controlled by structure and the resource potential is huge. **[Methods]** Based on the theory and method of orefield geomechanics, this research has revealed the mechanism of structural ore control by the fine survey of large-scale structural profile, the identification of mechanical properties of typical ore-controlling structures in different directions and the screening of structures in different periods and orders, combined with the characteristics of regional tectonic stress field. **[Results]** The results show that the principal compressive stress direction of the mining area since the Indosinian had changed from NE-SW-trending to NW-SE-trending to NE-SW-trending to near EW-trending, sequentially forming tectonic systems of the early NW tectonic belt, the NE tectonic belt, the late NW tectonic belt and the SN tectonic belt in turn. By the analysis of ore-controlling structure and the discussion of its relationship with mineralization, the metallogenic structural system of the north-east tectonic belt has been determined, and the hierarchical ore-controlling regularity of structure is revealed, it is, the northwest-trending Weining-Shuicheng fault and Weining-Shuicheng anticline are the first-grade ore-controlling structures, which control the distribution of the Weining-Shuicheng metallogenic sub-belt or orefield; The NW-trending faults (F_1 and F_2) derived from the Weining-Shuicheng fault, control the distribution of the deposit or orebody group, and are the second-grade ore-controlling structures in the mining area; The interlayer fracture zones between F_1 and F_2 faults directly control the feature and attitude of orebodies, which is the third-grade ore-controlling structure in the mining area; The joint fissures on the sides of orebodies control the ore-veins, which is the fourth-grade ore-controlling structure. **[Conclusions]** The regularities of structural classification control are obvious for the Qingshan Pb-Zn deposit, which is mainly controlled by the ore-controlling structures of four grades, and has formed the four types of mineralization styles.

Key words: metallogenic tectonic system; ore-controlling mechanism; model of tectonic ore control; mineral exploration implication; Qingshan lead-zinc deposit; northwestern Guizhou Province; mineral exploration engineering

Highlights: This paper systematically divides the ore-controlling structure grades and mineralization patterns, reveals the structural ore-controlling mechanism, constructs the structural ore-controlling model, and predicts the discovery of concealed orebodies in the levels of No.6 and No.7 of the Qingshan Auxiliary shaft. This study points out the research direction of metallogenic regularities and the prospecting prediction of ore deposit, and also provides important implications for the deep and peripheral prospecting of lead-zinc orebodies in the ore concentration area of northwestern Guizhou.

About the first author: SONG Danhui, male, born in 1995, master candidate, major in geological engineering; E-mail: 806798929@qq.com.

About the corresponding author: HAN Runsheng, male, born in 1964, professor, supervisor of doctor candidates, engaged in research of the dynamics of tectonic ore-forming processes and prognosis of concealed deposit; E-mail: 554670042@qq.com.

Fund support: Supported by National natural Science Foundation Project (No.41572060), Projects for Yunling Scholars (2014), Yunnan Engineering Laboratory of Mineral Resources Prediction and Evaluation (YM Lab) (2010) and Geological Process and Mineral Resources Innovation Team (2012).

1 引 言

黔西北矿集区是扬子地块西南缘、川—滇—黔多金属成矿区的重要组成部分,地处南北向小江断裂带、北西向紫云—垭都断裂带及北东向弥勒—师

宗断裂带组成三角区内东侧,成矿地质条件优越,具有良好的找矿前景。截至目前,区内已探明和发现的矿床(点)100余处(金中国等,2008;胡晓燕等,2013;朱路艳等,2016),除猪拱塘超大型铅锌矿床和9个中型铅锌矿床外,其他为小型矿床、矿点和

矿化点, 这些矿床均受层间断裂或低角度断裂控制(张德明等, 2014), 主要赋矿于石炭系—二叠系的碳酸盐岩中。众多专家学者研究了矿床成因、矿床类型、控矿因素等方面, 提出了岩浆—热液(谢家荣, 1963)、沉积(张位及, 1984)或沉积—改造(廖文, 1984; 陈士杰, 1986; 柳贺昌, 1996)、MVT 型(王奖臻等, 2002; 张长青等, 2005, 2009)等多种矿床成因观点。钱建平(2001)、顾尚义(2007)、肖宪国等(2011)认为成矿流体具有多来源特征; 黄智龙等(2011)、胡瑞忠等(2020)认为扬子克拉通前寒武纪基底(含寒武纪)富含低温成矿元素, 深循环流体浸取基底岩石中的成矿元素发生了大面积低温成矿; 陈大(1999)、刘幼平(2002)、金中国(2008)、罗卫等(2010)、成晨等(2019)指出区内铅锌矿床(点)均集中沿构造带展布, 构造是最主要的控矿因素。近些年来, 韩润生等(2012, 2019)研究发现川滇黔成矿区内铅锌成矿作用与断褶构造系统休戚相关, 提出了陆内构造控矿—流体“贯入”成矿论(韩润生等, 2006, 2010, 2014, 2019; Han et al., 2010, 2015), 认为川滇黔铅锌多金属成矿区为印支期扬子陆块与印支陆块发生碰撞造山作用的产物, 区域构造应力向扬子陆块内传导, 在黔西北矿集区形成北西向斜走滑—断褶带, 成矿流体沿断裂带及其下盘背斜的层间断裂带中发生“贯入”成矿作用, 并总结了区内典型铅锌矿床的成矿结构面类型及主要矿化样式(韩润生等, 2019)。因此, 该区的找矿方向为从层位找矿转变为构造找矿提供了理论依据。

青山铅锌矿床是黔西北矿集区威宁—水城成矿亚带的典型代表之一, 明显受北西向构造控制, 形成于印支期(金中国, 2008), 与川—滇—黔成矿区其他铅锌矿床形成时代具有一致性(韩润生等, 2014)。虽然前人在该矿床开展了控矿因素、矿床地球化学研究及地球物理勘查等(欧锦秀, 1996; 陈大, 1999; 陈大和曾德红, 2000; 钱建平, 2001; 顾尚义, 2007; 金中国和黄智龙, 2009), 为深入研究奠定了基础。但是, 其成矿构造体系、构造控矿机理研究明显薄弱, 矿区构造成生发展过程不清、构造控矿规律不明, 成矿构造体系是北东构造带还是北西构造带还存在争议? 这些重要问题制约了对该矿床找矿方向的研判。因此, 本文在前人研究的基础上, 应用矿田地质力学理论与方法(孙家骢和韩润

生, 2016), 开展青山铅锌矿床构造解析, 通过矿区内不同级别断裂的几何学、运动学特征研究及力学性质系统鉴定, 厘定了矿区成矿构造体系, 揭示了构造控矿机理, 进一步构建了构造控矿模式, 为深部找矿预测和初步验证提供了理论依据, 并深化黔西北矿集区构造控矿作用研究成果。

2 区域地质概况

青山铅锌矿床位于黔西北矿集区威宁—水城铅锌成矿亚带中部, 带内出露地层有石炭系、二叠系、三叠系, 第四系零星分布(图 1a)。石炭系出露全, 分布广、沉积厚度大, 底部为含煤碎屑沉积, 向上为一套浅海相沉积的碳酸盐岩, 多沿威水背斜核部地带出露; 二叠系以滨—浅海相含煤碎屑岩、海相碳酸盐岩及峨眉山玄武岩为主。中下三叠统以海陆交互相碎屑岩夹碳酸盐岩为主, 上三叠统在该区不发育, 出露少量陆相碎屑岩(贵州省地质矿产局, 1987)。

区域构造以紧密褶皱和断层发育为特征(图 1b), 褶皱轴向与主断层走向一致。褶皱主要有威水背斜、水杉背斜、偏坡寨向斜。背斜南西翼地层产状较陡(倾角大于 60°), 北东翼地层相对平缓(倾角 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$), 为不对称褶皱。矿床主要产于背斜轴部及其南西翼。本区褶皱显示出强烈的挤压变形特征, 表现在褶皱翼部可见大量的层间劈理、层面擦痕、压溶缝合线和构造透镜体, 轴部附近褶皱复杂。带内规模较大的纵断层有烂坝断层、威水断层、观邓断层, 其走向 $NW50^{\circ}\sim NW80^{\circ}$, 倾向 NE 或 SW, 倾角 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$, 为一组多期活动断层, 控制了威水成矿亚带的南北矿化范围。此外, 常见发育相对较晚的北东向、近南北向横断层, 破矿作用明显。

区内岩浆活动强烈, 区域喷出岩最早见于太古宙(柳贺昌等, 1996)。而古生代至新生代岩浆活动中, 最大规模的岩浆活动为海西晚期峨眉山玄武岩。此外, 区内还出露辉绿岩脉, 其规模较小, 相对集中产出在威宁、水城附近(钱建平, 2001)。

在威水成矿亚带分布的矿床主要沿北西向构造带展布, 已探明有上石桥、杉树林、青山 3 个中型矿床, 并发现小型矿床、矿点 28 处, 主要为产于碳酸盐岩中的陡脉状、似层状铅锌矿床, 具有良好的找矿前景。

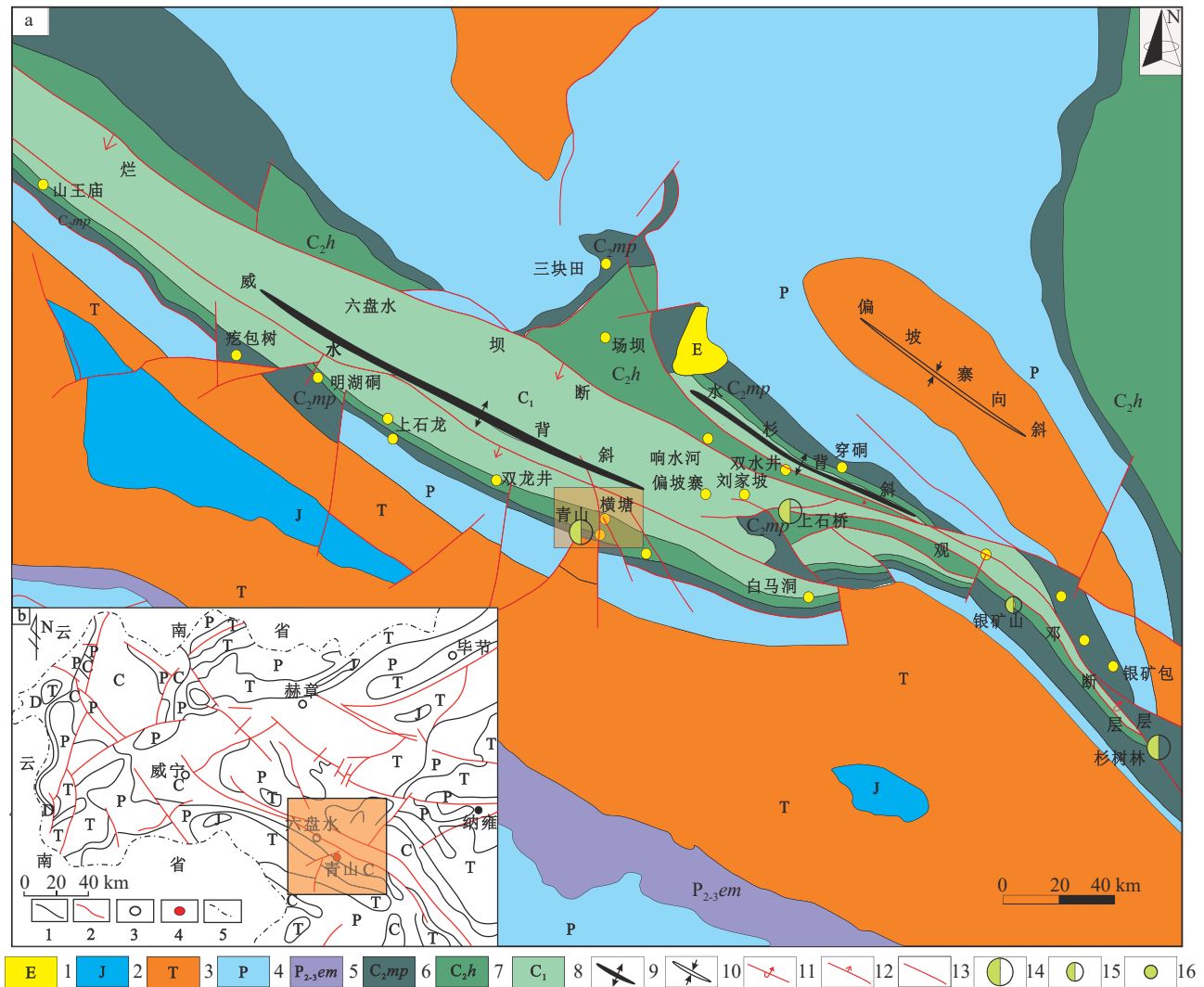


图1 黔西北地质构造略图(a, 据金中国, 2008 修改; b, 据汪新伟等, 2013 修改)

a: 1—古近纪; 2—侏罗系; 3—三叠系; 4—二叠系; 5—峨眉山玄武岩; 6—上石炭统马平组; 7—上石炭统黄龙组; 8—下石炭统; 9—背斜; 10—向斜; 11—倒转背斜; 12—具倾向断层; 13—断层; 14—中型铅锌矿床; 15—小型铅锌矿床; 16—铅锌矿化点; b: 1—地层界线; 2—断层; 3—城市; 4—研究区矿床位置; 5—省界

Fig.1 Sketch map of geological structure in northwest Guizhou (a, modified from Jin Zhongguo, 2008; b, modified from Wang Xinwei et al., 2013)

a: 1—Paleogene; 2—Jurassic; 3—Triassic; 4—Permian; 5—Emeishan basalt; 6—Upper Carboniferous Maping Formation; 7—Upper Carboniferous Huanglong Formation; 8—Lower Carboniferous; 9—Anticline; 10—Syncline; 11—Inversion anticline; 12—Dip fault; 13—Fault; 14—Medium-scale lead-zinc deposit; 15—Small lead-zinc deposits; 16—Lead-zinc mineralization point; b: 1—Stratigraphic boundary; 2—Fault; 3—City; 4—The location of the deposit in the study area; 5—Provincial boundary

3 矿床地质概况

该矿床位于威宁—水城背斜南西翼, 主要出露地层(图2)为下石炭统摆佐组(C_1b)白云质灰岩, 上石炭统黄龙组(C_2h)灰岩, 上石炭统(C_2mp)马平组灰岩, 中二叠统梁山组(P_2l)泥质砂岩、碳质页岩和劣质煤, 中二叠统阳新组一阶(P_2yl)泥灰岩。矿体主要产于马平组、黄龙组及马平组与梁山组交界部

位, 受构造控制明显。矿区褶皱和断裂发育, 具多期活动的特点。威水背斜为一紧密长轴褶皱, 轴向北西, 是矿区主要褶皱构造。矿区断裂构造主要为北西向、北东向两组, 见少数南北向断裂(图2)。因构造活动影响, 北西向层间断裂、破碎带及北东向节理裂隙发育, 为含矿热液运移和充填的有利场所。矿区内仅出露有两处二叠纪辉绿岩脉, 对矿体无明显控制作用(钱建平, 2001)。

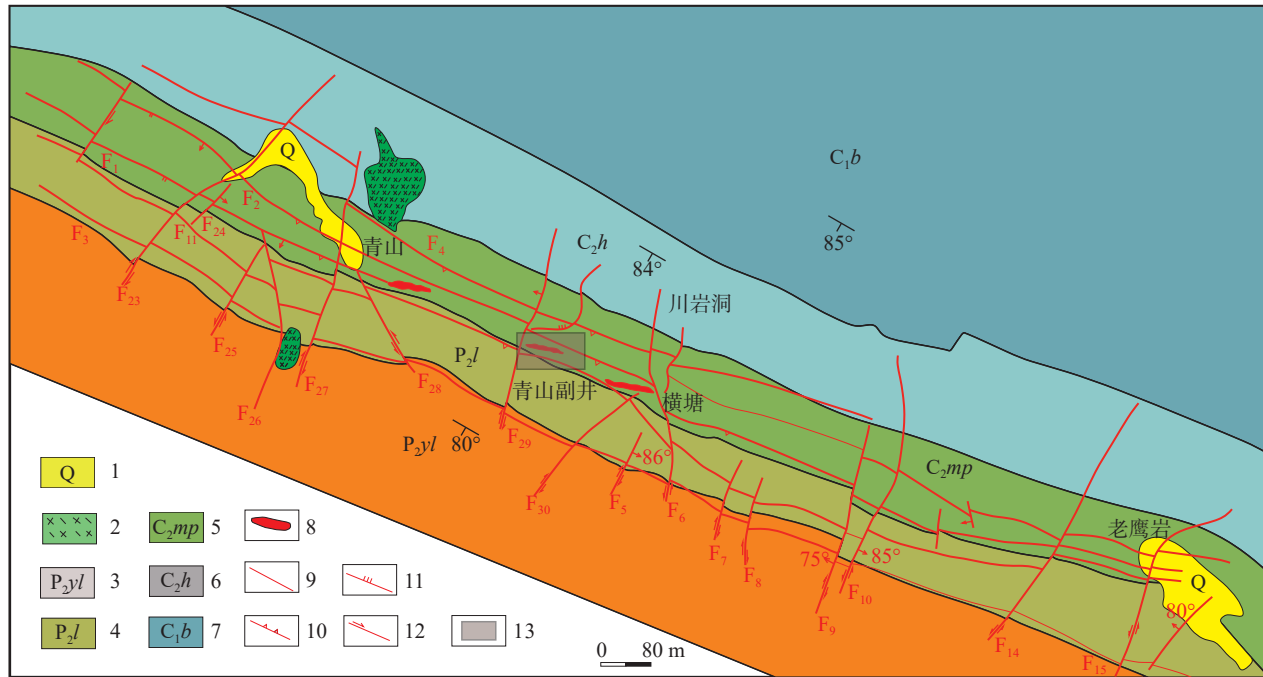


图 2 黔西北青山铅锌矿床地质简图

1—第四系; 2—辉绿岩脉; 3—中二叠统阳新组一阶; 4—中二叠统梁山组; 5—上石炭统马平组; 6—上石炭统黄龙组; 7—下石炭统摆佐组; 8—矿体; 9—实测断层; 10—张性断层; 11—压性断层; 12—扭性断层; 13—主要研究矿段

Fig.2 Geological sketch map of the Qingshan lead-zinc deposit

1-Quaternary; 2-Diabase dykes; 3-The first stage of Middle Permian Yangxin Formation; 4-Middle Permian Liangshan Formation; 5-Upper Carboniferous Maping Formation; 6-Upper Carboniferous Huanglong Formation; 7-Lower Carboniferous Baizuo Formation; 8-Ore body; 9-Measured fault; 10-Tensional fault; 11-Compressive fault; 12-Torsional fault; 13-The main research ore section

在青山矿区,矿体在空间上呈规律性展布,4个矿段的矿体出露高程分别为:青山矿段 1970 m、青山副井 1860 m、横塘矿段在 1870 m 出现黄铁矿体,老鹰岩矿段 1500 m 左右,4个矿段的矿体从西向东埋深逐渐加大,具有台阶式分布特征。局部上,以青山副井为例,矿体主要位于 1789 m 水平、1764 m 水平、1742 m 水平,走向在 NW47°~NW70°,倾向南西,向南东侧伏(图 3),主矿体延伸方向与地层、北西向断裂一致,其延长大于延深,在空间分布上具斜落的特点(图 3a)。矿体多呈囊状、块状、脉状产出,发育于 F_1 、 F_2 断裂下盘,均受北西向陡倾的 F_1 、 F_2 断裂控制。矿石平均品位 Pb 7.72%、Zn 32.62%。该矿床铅锌金属储量达 30 万 t 以上,具中型矿床规模。近年来,在 F_2 断裂旁侧发现似层状富厚铅锌矿体,在老鹰岩矿段的钻孔 1500 m 处见到矿体,铅锌品位大于 30%。这些特征预示该矿床有望达大型规模。

该矿床的矿石矿物由方铅矿、闪锌矿、黄铁矿组成。脉石矿物主要为方解石、重晶石及少量白云

石。矿石主要具块状、星点状和角砾状构造,次为浸染状、细脉状、条带状构造;具自形—半自形、交代残余等结构。围岩蚀变特征明显,蚀变带较窄,仅见黄铁矿化、方解石化,均沿北西向 F_1 、 F_2 及其次级层间断裂带发育,控制了热液蚀变的空间形态,水平方向上表现出一定的分带特征:从矿体中心到围岩,依次呈现出强铅锌矿化、黄铁矿化、方解石化结晶灰岩带→黄铁矿化、方解石化结晶灰岩带→弱方解石化灰岩带的分带现象(图 3),受成矿后构造作用影响,在 1789 m、1764 m 水平的部分矿体被外来泥质包裹。

根据矿物共生组合、矿石结构构造及矿脉穿插关系,提出了其矿物生成顺序:沉积成岩期黄铁矿受后期热液作用影响具有明显的次生加大现象,并与早世代闪锌矿呈共边结构(图 4a),同时早世代闪锌矿与方铅矿成共边结构(图 4b),说明它们同期形成;晚世代方铅矿和黄铁矿被早世代闪锌矿包裹,同时方铅矿与黄铁矿呈共边结构(图 4c、d),部分黄铁矿交代早世代闪锌矿(图 4e),说明它们形成时间

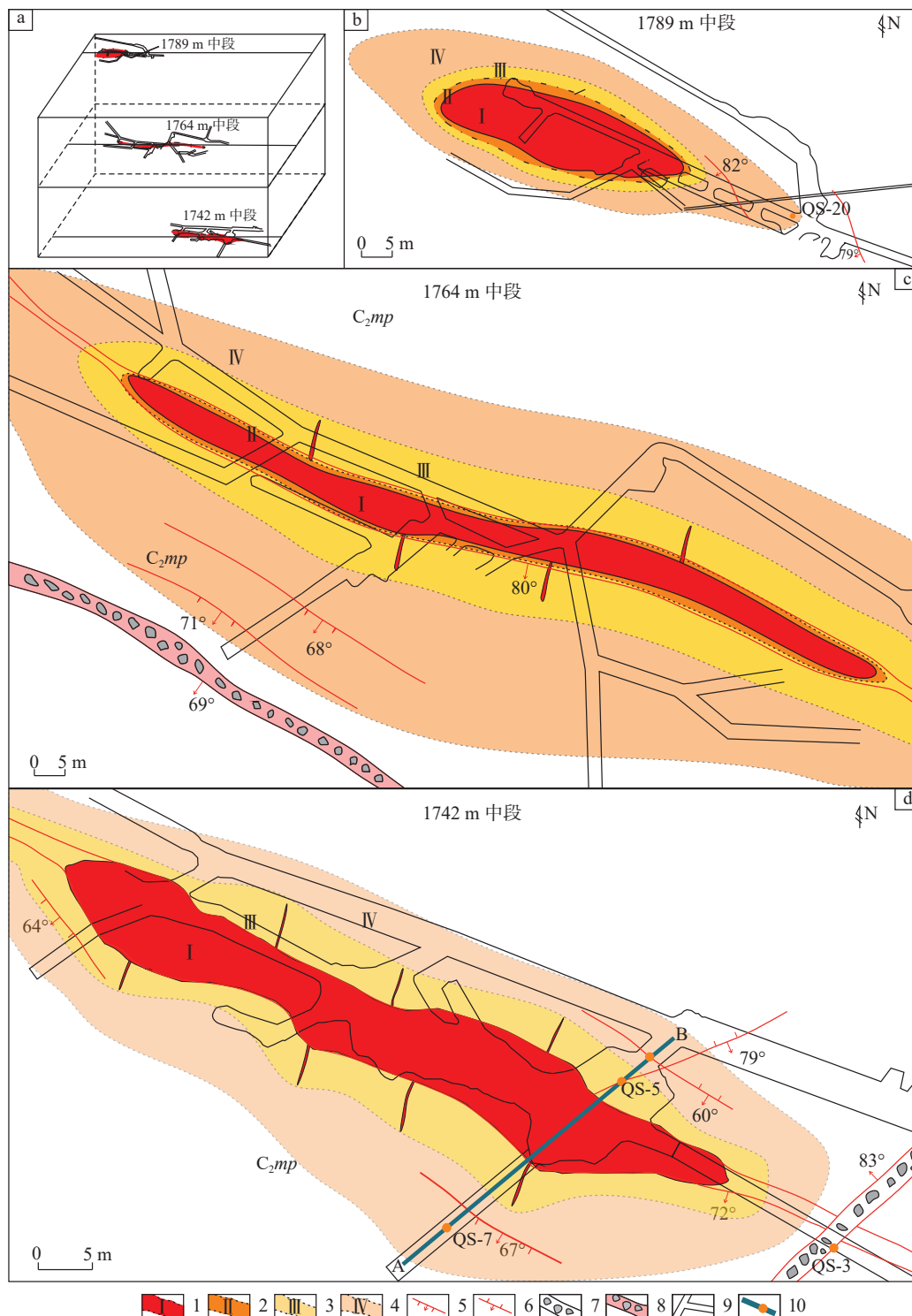


图3 青山铅锌矿床 1789 m、1764 m、1742 m 中段蚀变分带平面图

1—强铅锌黄铁矿化-方解石化灰岩带; 2—断层泥; 3—黄铁矿化-方解石化灰岩带; 4—弱方解石化灰岩带; 5—正断层; 6—逆断层; 7—断裂破碎带(带内为泥质胶结灰岩角砾); 8—断裂破碎带(带内为含铅锌矿化方解石胶结灰岩角砾); 9—巷道; 10—剖面位置及观测点

Fig.3 Alteration zoning plan of Qingshan lead-zinc deposit in middle 1789 m, 1764 m and 1742 m

1—Strong lead-zinc pyritization-calcitization limestone zone; 2—Fault gouge; 3—Pyritization-calcitization limestone zone; 4—Weak calcitization limestone zone; 5—Normal fault; 6—Reverse fault; 7—Fault fracture zone (The zone contains argillaceous cemented limestone breccia); 8—Fault fracture zone (The zone contains lead-zinc mineralized calcite cemented limestone breccia); 9—Roadway; 10—Profile position and observation point

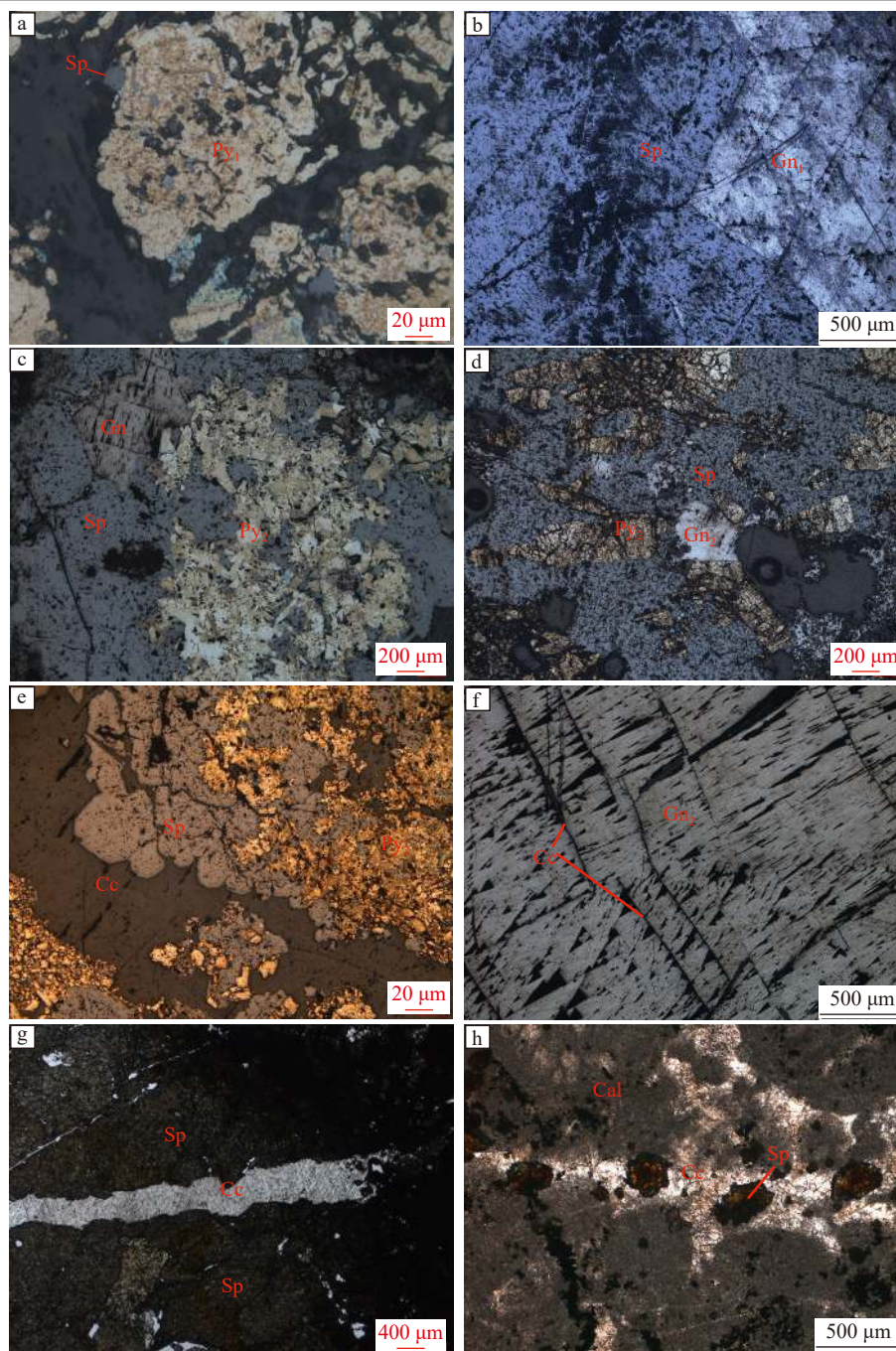


图 4 青山铅锌矿床不同成矿阶段矿物组合的典型照片

a—沉积期矿铁矿受后期热液作用具有明显的次生加大边, 与闪锌矿共生; b—闪锌矿与方铅矿呈共边结构; c—闪锌矿包裹方铅矿及黄铁矿; d—闪锌矿包裹黄铁矿及方铅矿, 黄铁矿与方铅矿呈共边结构; e—黄铁矿交代闪锌矿, 并被方解石脉切穿; f—方解石脉切穿方铅矿; g—方解石脉切穿闪锌矿; h—发育在方解石脉中的团块状闪锌矿; Sp—闪锌矿; Gn₁—第一阶段方铅矿; Gn₂—第二阶段方铅矿; Py₁—第一阶段黄铁矿; Py₂—第二阶段黄铁矿; Cc—方解石脉; Cal—结晶灰岩

Fig. 4 Typical photos of mineral assemblages in different metallogenic stages of the Qingshan lead-zinc deposit

a—The iron ore in the sedimentary period has obvious secondary enlarging edge due to late hydrothermal action and is associated with sphalerite; b—Sphalerite and galena have a common edge structure; c—Sphalerite contains galena and pyrite; d—Sphalerite contains pyrite and galena, pyrite and galena have a common edge structure; e—Pyrite metasomatizes sphalerite and is cut through by calcite veins; f—Calcite vein cuts through the galena ore; g—Calcite vein cut through the sphalerite ore; h—Clumped sphalerite developed in calcite veins; Sp—Sphalerite; Gn₁—The first stage of galena; Gn₂—The second stage of galena; Py₁—The first stage of pyrite; Py₂—The second stage of pyrite; Cc—Calcite vein; Cal—Crystalline limestone

相对较晚;方解石通常以细脉状切穿闪锌矿、方铅矿、浸染状黄铁矿(图 4f、g),粒装闪锌矿充填在方解石脉中(图 h),说明方解石形成时间相对较晚。根据这些特征将该矿床成矿期划为三个阶段(表 1): (I)闪锌矿-方铅矿-黄铁矿阶段(主成矿阶段),伴随强烈的黄铁矿化蚀变;(II)方铅矿-黄铁矿阶段;(III)方解石阶段,方解石大量生成并切穿早阶段矿物。

4 不同等级构造力学性质鉴定

地壳上的一切构造形迹是构造应力作用的结果,构造应力作用的遗迹必然保留在构造形迹中,构造力学性质鉴定是矿田地质力学研究的先行步骤,不同力学性质的构造具有不同的形态特征,构成不同形状的构造空间,从而对矿体的产状、延长、延深等空间分布,以及对矿石结构构造等具有不同程度的控制作用(韩润生等,2003)。因此,控矿构造力学性质的鉴定分析是掌握构造控矿机制和进行成矿预测的基础(孙家骢和韩润生,2016)。

青山矿区的构造活动强烈,发育不同类型的构造形迹,且具多期活动的特征。基于大比例尺构造剖面精测和典型构造解析,通过不同期次、不同方向、不同序次的典型构造形态、产状、方位及其相互空间关系解析,系统鉴定典型构造形迹的力学性质,在此基础上划分构造体系。

4.1 矿床高级别构造(一级构造)力学性质鉴定

在威宁—水城成矿亚带内,褶皱构造主要有威水背斜、偏坡寨背斜、水杉背斜,同属威宁—水城紧密褶皱构造带,长约 120 km,宽 15~20 km,褶皱紧密且不对称,褶皱在平面上大致呈右行雁列式排列(金中国,2008)(图 1a),其中威水背斜轴向北西,核部地层为上石炭统大铺组,两翼出露地层为石炭系至三叠系,北东翼地层倾角 30°~50°,南西翼地层陡立甚至倒转。褶皱显示出强烈挤压变形特征,表现为翼部大量层间劈理、层面擦痕、压融缝合线、复杂小褶皱和构造透镜体发育。带内褶皱排列方式及形态均显示受力方向为北东-南西向挤压。

威水断裂为矿区一级控矿构造,北西起于威宁孔家山,经艾家坪、山王庙至水城,延长 110 km,断层面倾向南西或北东,倾角 70°~80°,为一组多期活动断层,其断裂带内广泛发育角砾岩、碎裂岩、构造透镜体。QS-7 点为威水断裂带内,见一组北西向断裂(f_1 : NW30°/80°NE, f_5 : NW47°/73°NE, f_7 : NW56°/88°NE),和一组北东向断裂(f_3 : NE30°/48°NW; f_4 : NE40°/58°; f_6 : NE39°/48°SE)(图 5a)。 f_1 、 f_5 、 f_7 将 F 断裂带内分割成 3 个大致对称分布的构造-蚀变带:外带为方解石网脉带;内带为方解石脉角砾岩化带;核部为白云石化透镜体化带。 f_1 裂面呈缓波状,断裂上盘为方解石网脉带。带内为团块状及

表 1 青山铅锌矿床成矿阶段划分
Table 1 Classification of metallogenic stages of the Qingshan Pb-Zn deposit

矿物	热液成矿期		
	黄铁矿-闪锌矿方铅矿阶段	黄铁矿-方铅矿阶段	方解石阶段
黄铁矿			
闪锌矿			
方铅矿			
方解石			
典型组构	他形-自形晶粒状结构、共边结构、致密块状构造、角砾状构造等	他形-自形晶粒状结构、共边结构、交代结构、致密块状构造	细脉状、团块状构造
主要矿物组合	黄铁矿、闪锌矿、方铅矿	方铅矿、黄铁矿	方解石、黄铁矿及少量团块状闪锌矿

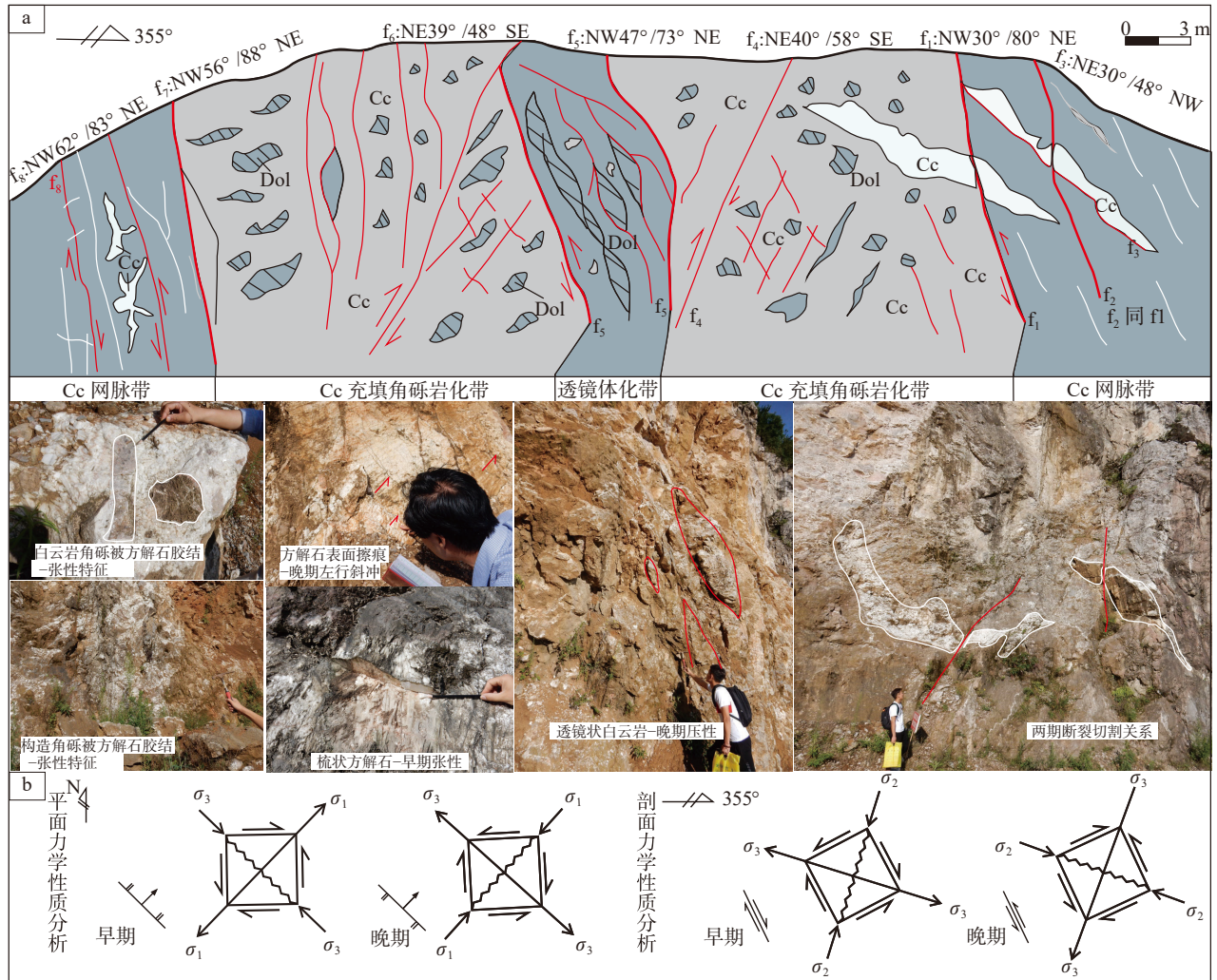


图 5 青山铅锌矿床 QS-7 点威水断裂剖面素描图(据韩润生等, 2020 修改; a、b 解释见正文)

Fig.5 Weishui fault profile sketch of QS-7 in the Qingshan lead-zinc deposit (modified from Han Runsheng et al., 2020; see the text for explanations a, b)

细脉状的方解石充填在碎裂白云岩内, 并被 f_1 切割, 根据方解石位移方向判断 f_1 为逆冲断层, 局部见梳状方解石脉, 反映出该断裂在成矿期的张性特征突出。 f_1 与 f_5 、 f_7 所夹部位方解石胶结白云岩角砾发育的斜冲擦痕以及 f_5 断裂带内分布的透镜体化方解石脉与蚀变白云岩角砾指示了该断裂在成矿后呈典型的压扭性和左行斜冲的运动学特征。

综合褶皱和断裂构造力学性质和构造层筛分, 可识别出一级构造(威水断裂、威水背斜)发生了 3 期构造活动: 成矿前在东北向挤压作用下形成了一系列轴向北西、右行雁列式排列的褶皱; 成矿期因褶皱南西翼地层陡倾, 在北西向主压应力和重力作用下, 威水断裂呈明显张性活动特征; 成矿后主

压应力方向转变为北东向(图 5b), 使带内构造角砾岩被挤压成定向排列的构造透镜体。

4.2 低级别断裂构造(二级及以下构造)力学性质鉴定

矿床内断裂构造主要由北西向、北东向和近南北向的断裂组成, 北西向断裂与地层走向较一致, 倾向南, 局部反倾。北东向断裂主要由一系列扭性、张扭性断层组成, 大致呈等间距分布, 并将北西向断裂错断。近南北向断裂在矿区发育较少, 主要具压性为主的力学性质。

4.2.1 北西向断裂

北西向断裂在矿区内最为发育, 为矿区内主要控矿断裂, 由一系列走向在 $NW30^\circ \sim NW80^\circ$ 的断裂

组成,带内碎裂岩、构造角砾岩、断层泥等较为发育,其裂面和部分构造角砾岩上发育不同方向和力学性质的擦痕、阶步,显示多期次构造活动的特征,此外断裂带内发育明显的黄铁矿化、方解石化及少量铅锌矿化现象。 F_2 断裂作为该矿床北西向控矿断裂的代表之一,产状为 $NW63^\circ\sim NW80^\circ$, 倾角 80° , 倾向 SW, 裂面呈缓波状, 裂带发育具有明显分带性的构造-蚀变带, 依次为黄铁矿化片理化带, 黄褐色褐铁矿化片理化带, 灰色灰质片理化带(图 6), 该断裂显示出两期构造复合的特点, 早期沿断裂带呈锯齿状分布铅锌矿化黄铁矿脉, 晚期在黄铁矿脉上叠加发育具水平擦痕的平直裂面和片理化黄铁矿破碎带, 该特征指示了该断裂经历了扭张性→右行扭压性力学性质的转变。

f_3 ($NW70^\circ/80^\circ SW$) 为一条赋矿层间断裂, 位于 F_1 、 F_2 断裂所夹持部位, 为 F_1 、 F_2 派生的次级断裂, 裂面呈缓波状, 裂带内主要为块状铅矿体充填, 为成矿热液富集沉淀的主要部位, 矿物组合为方解石+黄铁矿+大量铅锌矿, 方解石呈团块状, 黄铁矿呈团块状、脉状产出, 方铅矿、闪锌矿呈中—粗粒结构、交代结构、充填结构, 团块状构造产出。沿断裂

两侧发育明显的矿化蚀变带, 受断裂控制明显, 反映该断裂为成矿期构造, 对成矿具有控制作用。 f_1 ($NW60^\circ/60^\circ SW$) 位于赋矿断裂旁侧, 裂面舒缓波状, 具压性特征, 断裂宽 5~10 cm, 带内主要为黄黑色断层泥, 将充填在围岩裂隙内的方解石脉错断, 围岩内方解石脉呈缓波状, 宽 2~4 cm, 外侧充填红色断层泥, 脉内见细脉状及团块状闪锌矿(图 7a), 判断方解石脉为成矿期所形成。根据方解石脉错动方向判断 f_1 下盘上升表现为压扭性(图 7b), 为成矿后破矿构造。 f_3 断裂外侧密集发育北东向、北西向两组扭性裂隙(图 7c), 裂面平直, 北东向节理裂隙平行排列, 主要充填方解石脉、黄铁矿脉及少量团块状方铅矿、闪锌矿。远离矿体一侧, 裂隙较窄内侧充填方解石脉, 外侧为少量红色泥质。北西向裂隙呈缓波状, 带宽 1~3 cm/条, 带内主要充填红色泥质, 切割北东向裂隙, 具压扭性构造特征, 为破矿构造。通过以上分析, 认为该处至少存在两期构造活动, 早期主压应力方向为北西向, 形成北西向扭张性 F_2 断裂, 压扭性的赋矿层间断裂, 及次级的北东向裂隙群, 并控制成矿作用发生, 为成矿期构造, 晚期主压应力转变为北东向, 形成压性的北西向断

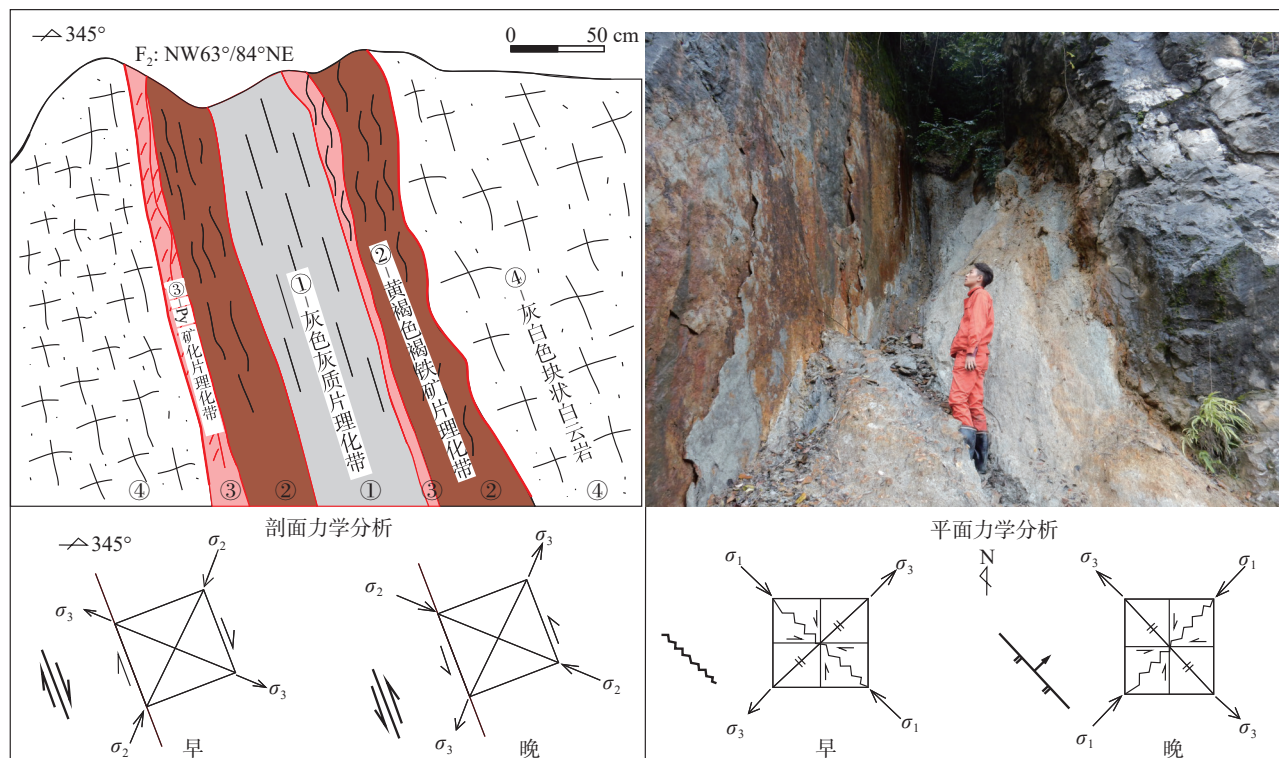


图 6 青山铅锌矿床 F_2 断裂剖面图素描图(据韩润生等, 2020 修改)

Fig.6 F_2 fault profile sketch of the Qingshan lead-zinc deposit (modified from Han Runsheng et al., 2020)

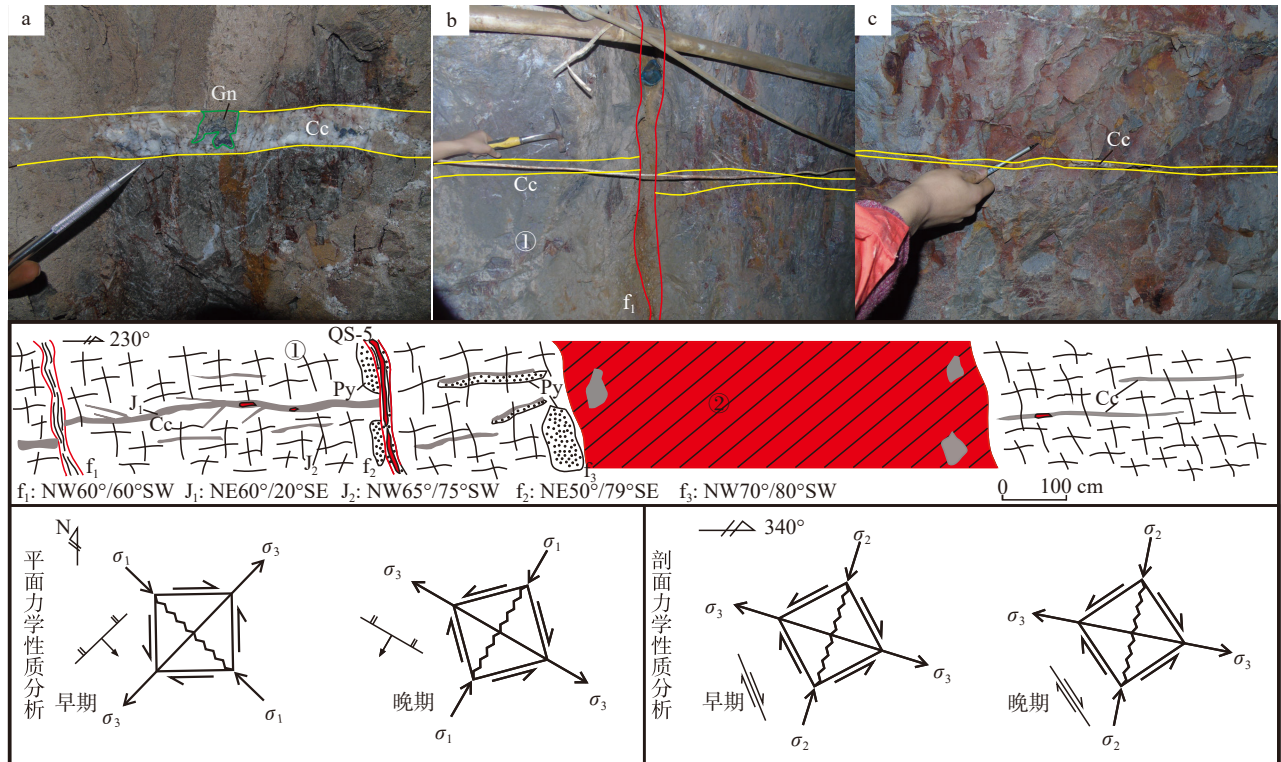


图 7 青山铅锌矿床 1742 m 中段剖面素描图(a~c 解释见正文)

a—成矿期方解石脉;b—断裂 f_1 及被错断方解石脉;c—含方解石脉碎裂灰岩;①—灰白色碎裂灰岩;②—含团块状方解石矿体

Fig.7 Sketch of 1742 m middle section in the Qingshan lead-zinc deposit (see the text for explanations a~c)

a—Calcite veins of metallogenic period; b— f_1 fault and misplaced calcite veins; c—Calcite vein-bearing cataclastic limestone; ①—Gray-white cataclastic limestone; ②—Ore bodies containing clumpy calcite

裂及裂隙对矿体产生破坏,为成矿后构造。

QS-4 点处为一组北西向层间断裂(f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 : NW70°/72°SW)(图 8),裂面形态舒缓波状,裂带宽 10~30 cm, f_1 为一条含矿断裂,裂带外侧为黄褐色断层泥,内侧为脉状含矿灰色泥质夹方解石细脉及少量灰岩角砾(图 8a),与断层泥接触面呈锯齿状。 f_2 、 f_3 、 f_4 裂带内为黑色碳质断层泥及方解石细脉,断层泥表面具有明显水平擦痕,指示断裂经历了一期右行运动(图 8b),该点处靠近梁山组,断层泥内碳质可能来自梁山组。 f_3 、 f_4 裂带内构造透镜体外侧被断层泥所包裹,其外形完整但内部含构造角砾,表示具有先张后压的特点(图 8c)。旁侧围岩主要为灰—灰白色灰岩,劈理化强烈发育两组裂隙,将岩石切割成菱形块状,主要充填方解石、红色和黑色断层泥,方解石脉较平直且被断裂及层间裂隙错动,方解石脉错动方向指示断裂上盘下降。据分析该点经历了 3 期构造活动,早期主压应力方向为北西向,产生北西向的扭张性裂面,方解石脉沿

断裂及裂隙充填,中期主压应力方向转变为北东向,使断裂力学性质转变为压性,充填断层泥与围岩在强度上有较大差异,因此在形态上更容易表现出舒缓波状的特征,晚期受到东西向挤压,断裂力学性质转变为扭性,发生左行错动,充填在断裂带内的断层泥产生水平方向擦痕。因此,结合矿床北西向断裂构造力学性质分析,北西向断裂经历了扭张性→压性—左行压扭性→右行扭性的转变。

4.2.2 北东向断裂

QS-5 点处为灰—灰白色黄铁铅锌矿化碎裂灰岩(图 7),见断裂 f_2 (NE50°/79°SW), f_2 为一条含矿断裂,裂面呈缓波状,具压性特征,带宽 5~8 cm,带内主要为粉末状黄铁矿和团块状方铅矿闪锌矿,为成矿期构造, f_2 旁侧 1 m 处为主矿体,走向北西,在矿体外侧分布大量的团块状方解石,且方解石较破碎,根据断裂与 f_2 空间展布关系判断 f_2 为断裂 f_3 旁侧构造,同属于成矿期构造,该期构造活动主压应力方向为北西向。

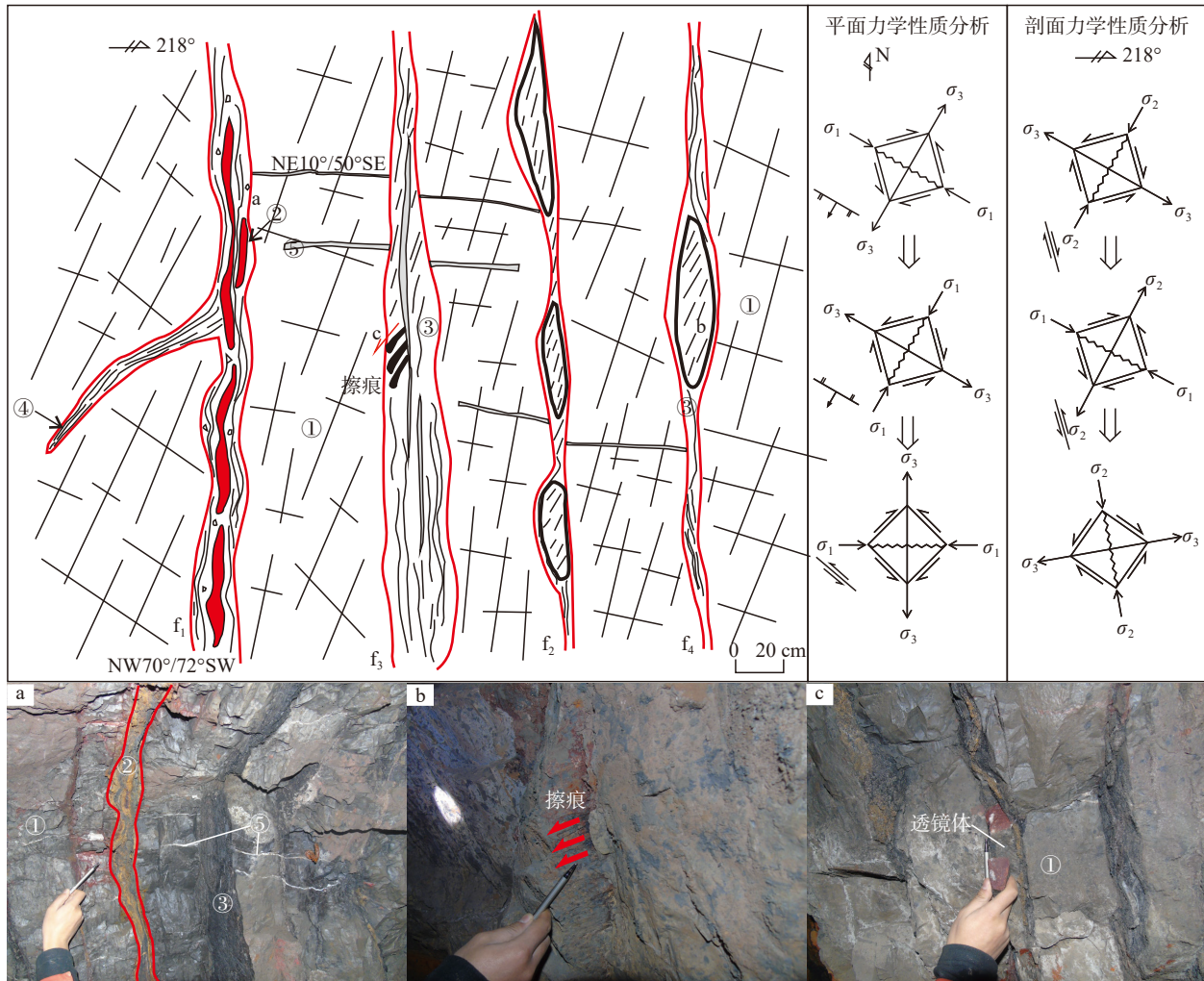


图8 青山铅锌矿床 QS-4 点断裂剖面素描图(a~c 解释见正文)

a—含矿断裂 f_1 ; b—断裂 f_3 内擦痕及其方向; c—断裂 f_4 内透镜体; ①—灰—灰白色碎裂灰岩; ②—细粉状矿脉; ③—黑色有机质断层泥; ④—红褐色断层泥; ⑤—方解石细脉

Fig.8 Fault profile sketch of QS-4 in the Qingshan lead-zinc deposit (see the text for explanations a~c)

a—Ore-bearing fault of f_1 ; b—Scratch and its direction of fracture f_3 ; c—Fault f_4 internal lens; ①—Grey-grey white cataclastic limestone; ②—Fine powdery ore vein; ③—Black organic matter fault gouge; ④—Red-brown fault gouge; ⑤—Calcite veins

QS-3 点处见断裂破碎带 F_1 (NE65°/65°SE) (图 9a), 裂面形态锯齿状, 具张性特征, 裂面上盘为灰白色碎裂灰岩, 方解石脉密集发育 (图 9b), 断裂下盘为破碎带, 带内主要为泥质胶结灰岩角砾, 部分角砾中含少量铅锌矿化及浸染状黄铁矿化, 胶结物从南东向北西呈黑色泥质—红色泥质的规律性变化, 黑色泥质胶结物中大角砾粒径 60~80 cm, 小角砾 5~8 cm, 红色泥质胶结物中角砾相对较大, 粒径 1~2 m。角砾中充填方解石细脉, 在破碎带发育有压扭性断裂 f_2 (NW5°/60°E), 裂面舒缓波状, 带宽 3~5 cm, 带内夹红泥及方解石脉 (图 9c), f_3 为

f_2 旁侧构造, 裂面呈缓波状, 产状 NW60°/80°SW, 带宽 3~5 cm, 带内含脉状黄铁及少量红色泥质, 指示 f_2 为右行压扭性断裂。另见一期方解石脉 (NE70°/55°SE) 在胶结物中并切穿角砾使角砾发生右行错动, 方解石脉较平直, 具扭性特征 (图 9d)。据分析该破碎带应受到两期构造应力作用, F_1 为在东北向挤压下形成的断裂破碎带, 为成矿后期破矿构造, 破碎带形成后在应力持续作用下, 由于泥质胶结物塑性较强, 后期在带内形成 f_2 、 f_3 这类压扭性构造, 晚期主压应力方向转变为东西向, 形成右行扭性的裂隙切穿角砾并充填方解石脉。

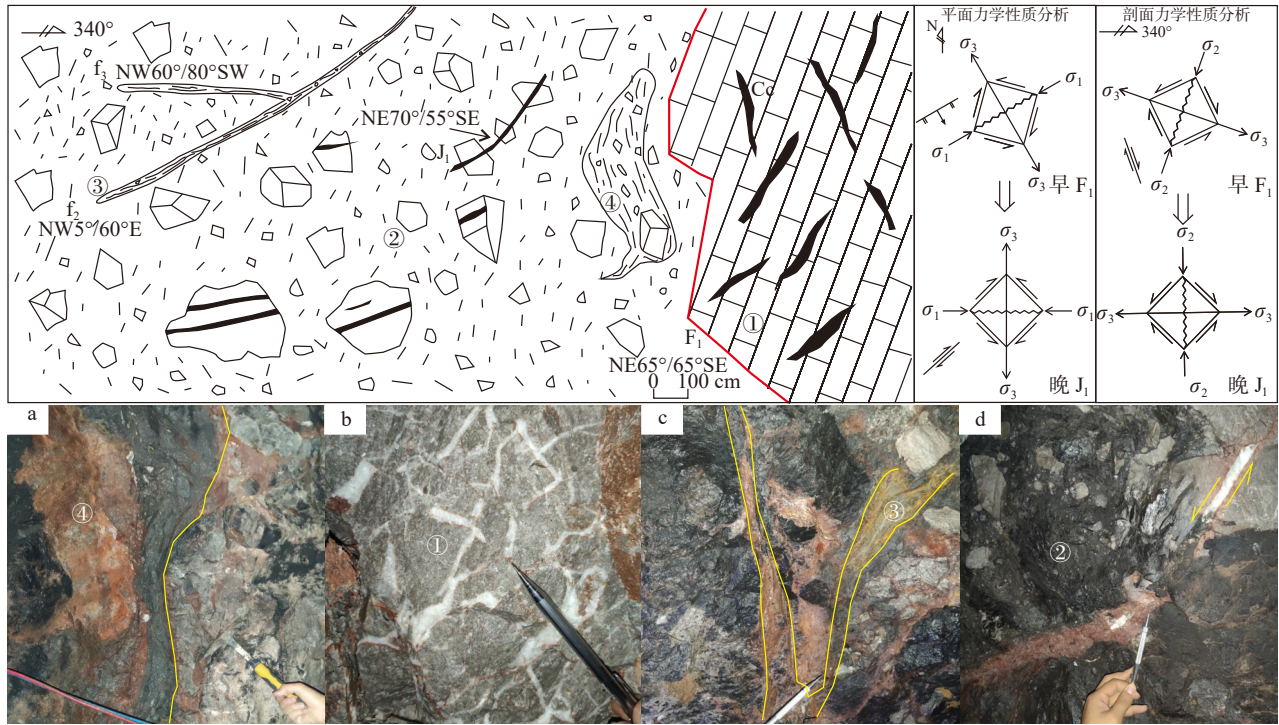


图 9 青山铅锌矿床 QS-3 点处破碎带、断裂剖面素描图(a~d 解释见正文)

a— F_1 ; b—破碎带旁侧碎裂灰岩; c—断裂破碎带内 f_2 、 f_3 断裂; d—成矿后方解石脉切穿角砾; ①—灰白色碎裂灰岩内含方解石细脉; ②—破碎带内黑色泥质胶结物; ③— f_2 断裂内含矿黄色断层泥; ④—红褐色泥质胶结物

Fig.9 Fracture zone and fault profile sketch of QS-3 in the Qingshan lead-zinc deposit(see the text for explanations a~d)

a— F_1 ; b—Cataclastic limestone beside the fracture zone; c—Fracture f_2 and f_3 in the fracture zone; d—Post-metallogenic calcite veins cut through breccia; ①—Gray-white cataclastic limestone contains calcite veins; ②—Black argillaceous cement in the fracture zone; ③—Fracture f_2 contains mineral yellow gouge; ④—Reddish-brown argillaceous cement

综合区内 NE 向断裂构造力学性质解析, 认为该组断裂经历了压性→张性→右行扭性的转变过程。

4.2.3 南北向断裂

QS-28 点、QS-29 点位于北西向破碎带内, 该破碎带主要由方解石胶结灰岩角砾带和泥质胶结灰岩角砾带组成, 方解石胶结灰岩角砾带内发育浸染状黄铁矿化及细脉状、浸染状铅锌矿化, 推断该北西向破碎带为成矿期构造作用的产物。QS-28 点处 f_1 (NS/46°E) 裂面较平直, 近裂面见两期擦痕, 逆冲擦痕叠加在水平方向擦痕之上, 表明断裂有过扭性向压性的转变(图 10)。QS-29 点处 f_3 (NE10°/60°SE), f_4 (NE28°/46°SE) 为一组共轭断裂, 裂面较平直, 带内主要为灰岩角砾挤压形成的构造透镜体, 角砾表面见星点状黄铁矿化, 具有一定磨圆度, 以红色泥质胶结为主, 同时见切穿角砾的方解石脉。通过吴氏网下半球投影, 断裂形成主压应力 σ_1 方向为 NE50°, 指示该点处断裂经受过北东向挤压作用。据构造特征分析该点具有两期构

造活动特征, 早期在北东向主压应力作用下, 形成南北向和北北东向右行扭性断裂将北西向破碎带破坏, 形成泥质胶结的灰岩角砾带, 后期主压应力方向转变为东西向, 使断裂上盘上升产生逆冲擦痕, 将裂带内构造角砾岩挤压成透镜状, 并发育有切穿角砾方解石脉, 断裂 f_1 、 f_3 、 f_4 力学性质转变为压性。综合区内南北向断裂构造力学性质解析, 认为该组断裂主要经历了右行扭性→压性的转变过程。

4.2.4 节理裂隙构造

在矿体与围岩接触部位及附近节理、裂隙构造发育, 岩石较破碎, 呈碎裂状, 形成节理裂隙带。矿体旁侧的节理、裂隙走向主要为北东向, 其次为北西向, 是含矿热液运移、充填的有利场所。

该矿床 QS-7 点处为矿体北东侧较完整的灰—灰白色灰岩(图 11a), 岩石表面见星点状黄铁矿化, 岩石内见两组节理密集发育, 9~10 条/m, 宽 1~3 cm, 内主要充填方解石脉, 次为黄铁矿、方铅矿。 J_1 (NE30°/44°NW)、 J_2 (NE16°/26°SE) 节理面呈平直

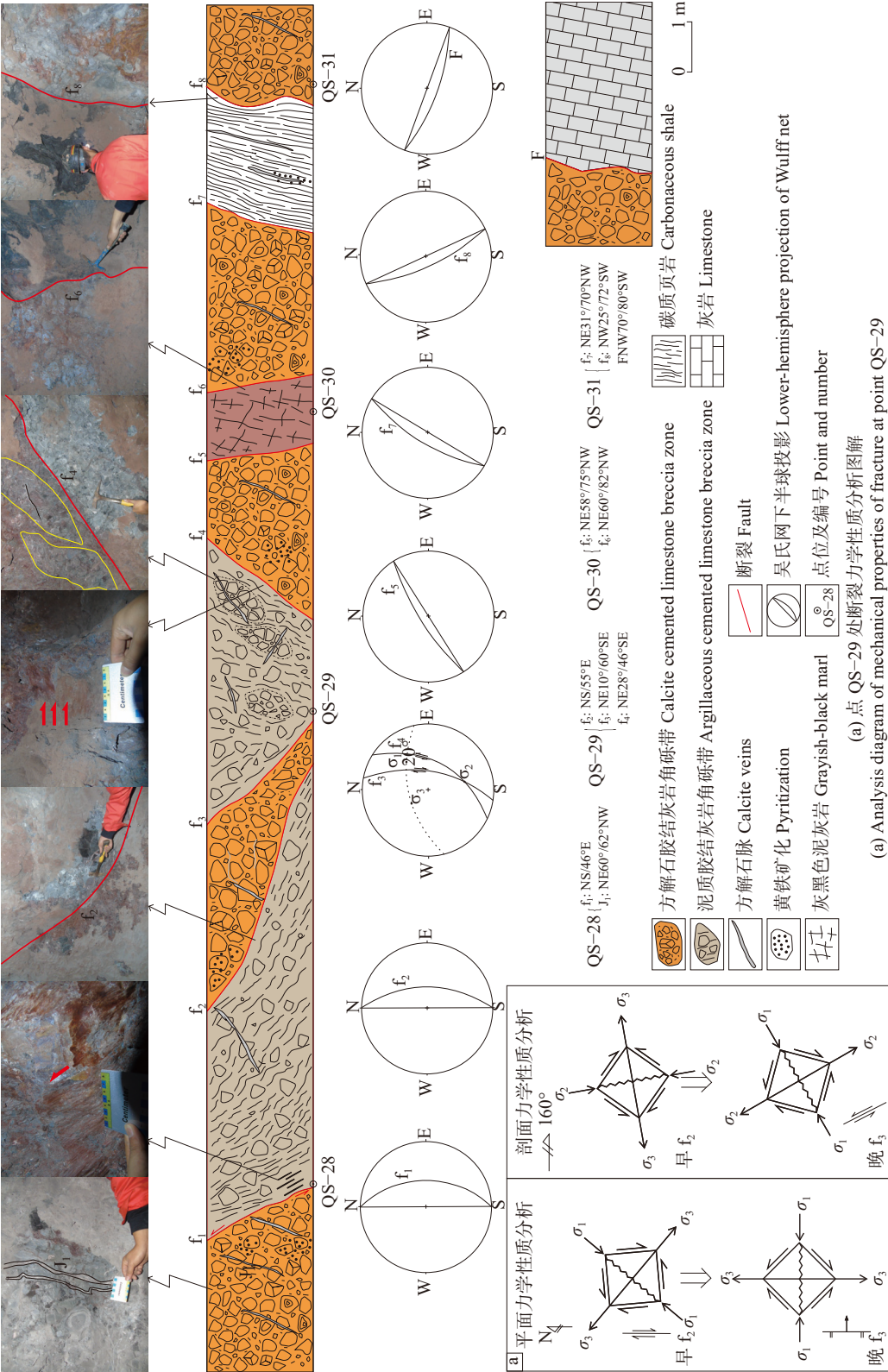


图 10 青山铅锌矿床二中段实测剖面图

Fig.10 Map of two middle part structural section in the Qingshan lead-zinc deposit

状、舒缓波状, 节理较为紧闭, 延伸稳定, 为一组共轭扭节理, 均具压扭性构造特征, 为成矿期节理。共轭节理吴氏网下半球投影(图 11b)显示形成的主压应力 σ_1 方向为 NW65°, 揭示该点经受近北西向

的挤压作用。

该矿床 QS-20 点处为灰—灰白色灰岩, 见两组节理密集发育, J_1 (NE50°/40°SE)、 J_2 (NW66°/40°SW)(图 12), 节理宽 1~3 cm, J_1 节理内主要充填方解石

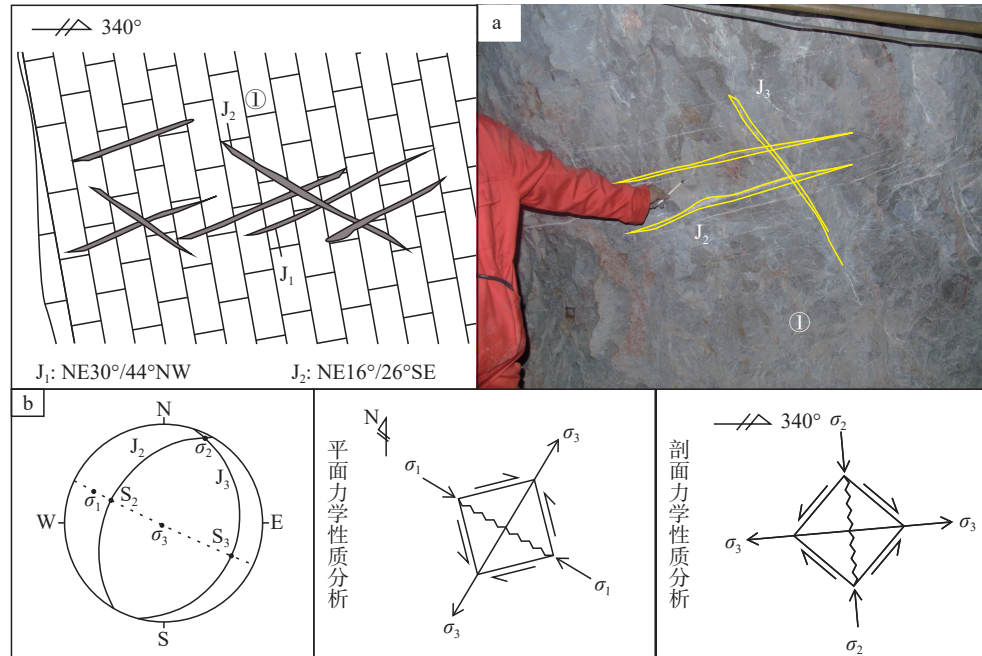


图 11 青山铅锌矿床 QS-7 点节理剖面素描图(a、b 解释见正文)

a—共轭方解石脉照片; b—共轭方解石脉吴氏网下半球投影图; ①—灰—灰白色灰岩

Fig.11 Joint profile sketch of QS-7 in the Qingshan lead-zinc deposit (see the text for explanations a, b)

a-Conjugate calcite veins photos; b-Lower hemispheric projection of conjugate calcite vein in wulff net; ①-Grey-gray white limestone



图 12 青山铅锌矿床 QS-20 点节理平面素描图

1—方解石脉; 2—充填红色泥质节理; 3—团块状矿石; 4—节理

Fig.12 Joint profile sketch of QS-20 in the Qingshan lead-zinc deposit

1-Calcite vein; 2-Fill with red argillaceous joints; 3-Lump ore; 4-Joint

脉,脉内含少量团块状铅锌矿,外侧见红色泥质,具扭压性构造特征,为成矿期节理, J_2 节理内充填红色泥质,具压扭性构造特征,为成矿后破矿构造,将 J_1 错断。该点处的节理构造是区域构造作用的复合结果,成矿期在NW向主压应力作用下形成以压扭性为主的节理 J_1 ,成矿后受到北东向主压应力作用, J_1 由右行扭性转变为左行扭性,形成新节理 J_2 并将 J_1 右行错动。

综上所述,矿区断裂、节理裂隙构造发育,多期活动明显,不同方向的断裂力学性质不同,经历了力学性质的转变过程:1)北西向断裂,经历了扭张性→压性-左行压扭性→左行扭性的转变;2)北东向断裂,经历了压性→张性→右行扭性的转变过程;3)南北向断裂主要经历了右行扭性→压性的转变过程。不同构造形迹力学性质的转变和构造控矿作用特征指示成矿期构造作用的主压应力方向为北西向,成矿后构造作用的主压应力方向依次为北东向和近东西向。

5 讨论

5.1 矿区构造组合与控矿构造体系

构造形迹是否归属于同一构造体系,其基本前提是确定这些构造形迹之间是否存在成生联系(韩润生,2003)。同一构造体系的构造成分在构造形态、构造方位、力学性质和变形规模及强度等方面可以有所不同,但他们必须在同一地质时期通过一定方式的外力作用下,由同一构造应力场所形成的一个变形整体(韩润生,2003)。

通过对矿区内不同级别、不同方向复合断裂和褶皱构造结构面的力学性质分析和配套筛分,综合印支期以来区域地质构造演化特征,将矿区构造划分为4种构造组合:早北西构造带、北东构造带、晚北西构造带、南北构造带(图13),矿区构造体系成生发展过程依次为:①早北西构造带;②北东构造带;③晚北西构造带;④南北构造带。这与韩润生等(2020)的结论一致。

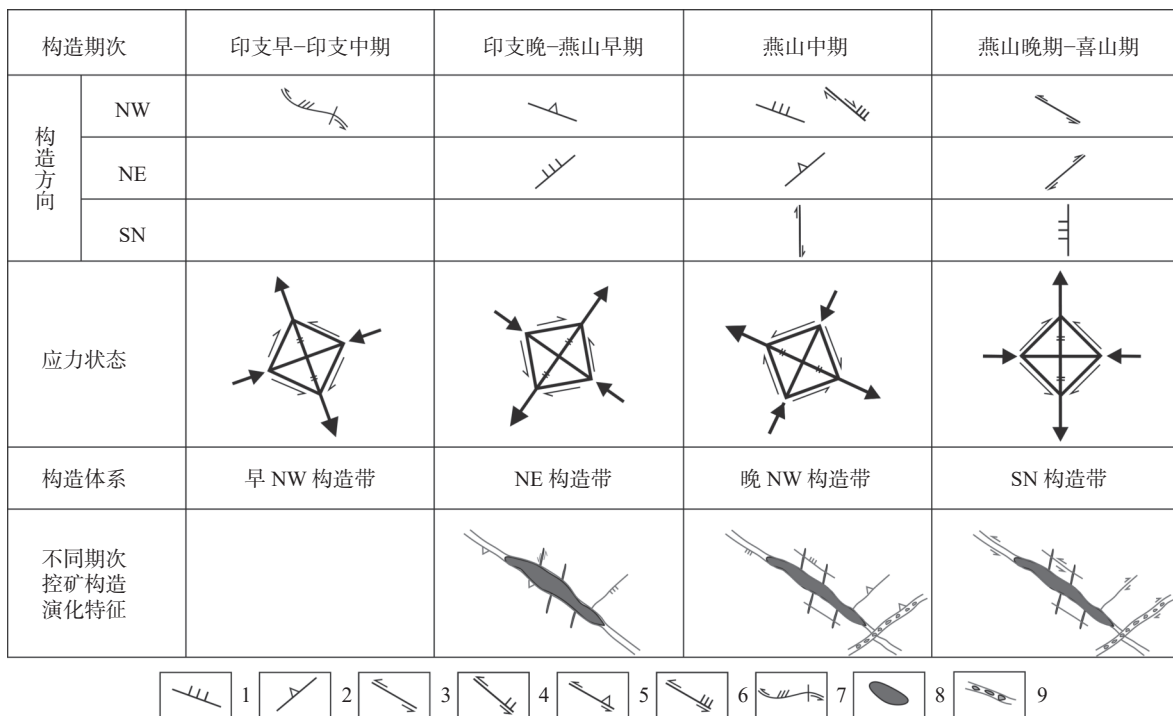


图 13 青山铅锌矿区构造行迹组合及构造体系示意图

1—压性断裂;2—张性断裂;3—扭性断裂;4—压扭性断裂;5—张扭性断裂;6—扭压性断裂;7—压扭性褶皱;8—矿体;9—断裂破碎带

Fig.13 Schematic diagram of tectonic trace assemblage and tectonic system in the Qingshan deposit

1-Tension fault; 2-Extensional fault; 3-Torsion fault; 4-Press-twist faults; 5-Transtensional fault; 6-Torsional compression fault; 7- Compression-torsional folds; 8-Ore body; 9-Fracture zone

5.1.1 早北西构造带

早北西构造带主要由北西向褶皱和断裂构成。区域性北西向威水背斜、偏颇寨背斜、水杉背斜和扭压性断裂组成了区域性早北西构造带,该带向南东延伸与右江裂谷—前陆盆地区的望漠北西向褶断带连成一个大型的北西向构造带,是一个变形强烈的应变带(贵州省地质矿产局,1987),从其平面展布来看,其主压应力方向应由北东向南西挤压。此时威水断裂指示主压应力方向为北东向,形成了形态紧密,北东翼地层平缓,南西翼地层陡倾的威水背斜,卷入地层有石炭系、二叠系、部分三叠系, T_3 与 T_{1+2} 地层之间存在假整合关系。同时,区内的大规模成矿主要发生在印支晚期—燕山早期,矿体形态主要成脉状、囊状似层状,并未被褶皱形态所改造,根据这些特征推测褶皱构造形成时限早于成矿期。综合认为,早北西构造带形成于印支期早—中期。

5.1.2 北东构造带

北东构造带主要由褶皱和断裂构造组成,区域性北东构造带由次级北西向褶皱、北西向右行斜落断裂带及北东向压性断裂构成,属于威宁—紫云—垭都断裂带的组成部分。北西向右行斜落断裂呈近平行排列,倾向南西,显示构造应力作用方向为北西—南东向挤压。

印支期川滇黔接壤区因扬子陆块与印支陆块的碰撞造山作用,导致古特提斯洋盆关闭,洋盆向扬子地块俯冲,南盘江—右江裂陷闭合,区域构造应力向扬子陆块内传导,使其间诸多微块体发生碰撞形成印支造山系西部的组成部分,在川—滇—黔成矿区形成空间分布具广泛性、类型具分区性和多样性的陆内构造系统(韩润生等,2019),在黔西北矿集区形成北西向斜落走滑—断褶带,于印支晚期开始进入第一次构造反转阶段。根据吴根耀等(2012)研究,黔西北地区构造反转的时间为 246 Ma 后,进入 T_3 ,该区转入北西向挤压的构造环境,区内北西向断裂力学性质由压扭性转变为张扭性。因山脉与盆地之间的重力差以及造山运动产生的构造应力的作用下导致流体开始迁移,此阶段为区内铅锌矿床提供了成矿的驱动力(刘成,2015)。韩润生等(2014)根据地质事实推断—构造变形筛分—构造古应力系统测量—同位素定年技术,认为川—滇—黔

成矿区的断褶构造形成时代与矿床成矿时代主体为印支晚期,部分矿床成矿时代可延至燕山早期。青山矿区周边的天桥铅锌矿床单颗粒硫化物 Rb-Sr 混合等时线年龄为 (191.9 ± 6.9) Ma (Zhou et al., 2013); 茂租铅锌矿床热液方解石 Sm-Nd 等时线年龄为 (196 ± 13) Ma (Zhou et al., 2013), 这些成矿年代均集中在印支晚期—燕山早期,且成矿期构造均是在北西—南东向构造应力作用下形成的,归属于北东构造带这一体系(韩润生等,2019)。因此,可以推断,青山铅锌矿床的形成与印支晚期的构造运动密切相关。在该期构造运动影响下,威宁—水城褶皱带南西翼由于地层陡倾,在北西向主压应力作用及重力驱动下,在矿区内形成北西向张(扭)性断裂,带内多发育方解石胶结的灰岩角砾,含少量黄铁铅锌矿化,为矿区内高级别控矿构造。同时,在该期构造应力作用下还形成了低序次的北西向压扭性层间断裂、破碎带和北东向压性断裂,节理裂隙构造,为主要的赋矿构造,带内为团块状、角砾状铅锌矿石,并沿断裂两侧发育明显的黄铁矿化、方解石化等围岩蚀变,均属北东构造带的组成部分。

5.1.3 晚北西构造带

北西构造带主要由压扭性断裂组成,区域性北西构造带主要由北东向的张性断裂和北西向的逆冲推覆断裂带组成。北东向断裂大致近平行排列,带内发育大量泥质胶结的构造角砾岩,存在岩层被揉皱拖拽的现象;北西向断裂在该期受到挤压作用,断裂上盘上升,使地表老地层覆盖于新地层之上,并使地层倾角变大,显示受力方向为北东—南西向。

与印支期相比,燕山运动的影响范围大,也最为普遍,表现强烈的一次地壳运动(金中国,2008)。区内的该期构造活动主要受特提斯域地质构造演化影响,与哀牢山造山带印支期—燕山期延迟推挤有关(韩润生等,2020),在燕山期进入陆内收缩阶段,开始第二次构造反转,在黔西北矿集区形成包括六盘水裂陷槽向南东延伸与右江裂谷—前陆盆地区的望漠北西向褶皱带连成一个大型的北西向断褶带,该特征指示了该期主压应力方向应为北东—南西向(韩润生等,2020),同时威—紫—罗伸展作用相对减弱,断裂带发生逆冲和左旋走滑运动(张荣强等,2009;汪新伟等,2010,2013),造成震旦系—

白垩系的地层变形,断裂活动使黔西北地区的地层在深大断裂两侧普遍直立或倒转(金中国,2008),在矿区内形成了张性为主的北东向断裂带,扭性为主的南北向断裂,带内为泥质胶结灰岩角砾,对矿体产生破坏作用,除产生新的构造形迹外,还将早期北西向断裂改造转变为压性,在带内挤压形成大量断层泥,北西向、北东向、南北向断裂共同构成矿床内的北西构造带。

5.1.4 南北构造带

南北构造带主要由南北向的压性断裂及北东向和北西向的扭性断裂组成。喜马拉雅运动代表了新近系与下伏地层之间角度不整合接触关系的构造事件,在该时期本区受太平洋板块和印度板块俯冲作用的影响,主要表现为区域性的抬升和断块活动(贵州省地质矿产局,1987),在贵州地区,喜山期褶皱轴向和逆冲断层走向大多呈北东、北北东向,扭性断裂以北北东向右行走滑为主,推测区域地应力作用方式主要是近东西向挤压(秦守荣和刘爱民,1998)。在此构造运动背景下,矿床内主压应力方向转变为近东西向,形成南北向压性断裂,同时在原来已产生的断裂上发生剪切平移叠加,使早期形成的北西向断裂发生左行错动,北东向断裂发生右行错动,构成了矿区内南北构造带。在该期区域内福来厂、亮岩等铅锌矿床成矿后构造活动较显著,形成右行扭性断层切断矿体(成晨等,2019;王明志等,2019)。

5.2 控矿构造型式

矿区内主要有如下3种控矿构造型式:

(1)“多”字型控矿构造型式:北西向垭都—蟒硐、威宁—水城断裂及北东向洛泽河—云炉河断裂组成了黔西北矿集区内“多”字型构造,控制了3个成矿亚带的“多”字型展布。青山铅锌矿床的构造是该“多”字型的组成部分,以北西向威宁—水城断裂为主干,北西西向扭张性构造为分支所组成。矿体沿一组北西向层间压扭性断裂带分布,并与北东向压扭性断裂构成“多字型”构造型式。这种构造型式表现为断裂对矿体在平面和剖面上等间距的控制特征,使矿体在空间上呈雁列式排布(图14a)。其形成机理是由于构造应力作用过程中不仅随着空间位置变化,而且也随时间变化。根据一定强度的弹性波在均匀介质(岩石)中的传播速度相等的原

理,压缩波、引张波在岩石传播过程中相互作用,造成了断裂与矿体在平面和剖面上等间距分布(韩润生等,2006)。

(2)阶梯状控矿构造型式:矿体受北西向层间压扭性断裂控制(图14b),导致四个矿段的矿体出露高度从西向东埋深逐渐加大,在剖面上呈现阶梯状的构造型式。构造控矿理论和找矿实践均证明,它是该矿床的独特的一种控矿构造型式,其形成是因构造应力作用造成矿体侧伏的结果。

(3)“入”字型控矿构造型式:叠瓦状的 F_1 、 F_2 断裂为威宁—水城断裂分支构造,与威宁—水城主干断裂上盘组成入字型构造(图14c),矿床即赋存于分支构造之中。从矿体尺度看,受北西向层间断裂扭动影响,在层间断裂旁侧密集发育一系列定向排列的北东向扭压性节理,北西向赋矿层间断裂与旁侧分支节理构造构成入字型构造型式,节理内充填脉状矿体。

5.3 成矿构造体系

通过对矿区含矿断裂力学性质的鉴定,可以看出不同方向断裂在成矿期的力学性质不同,而且在

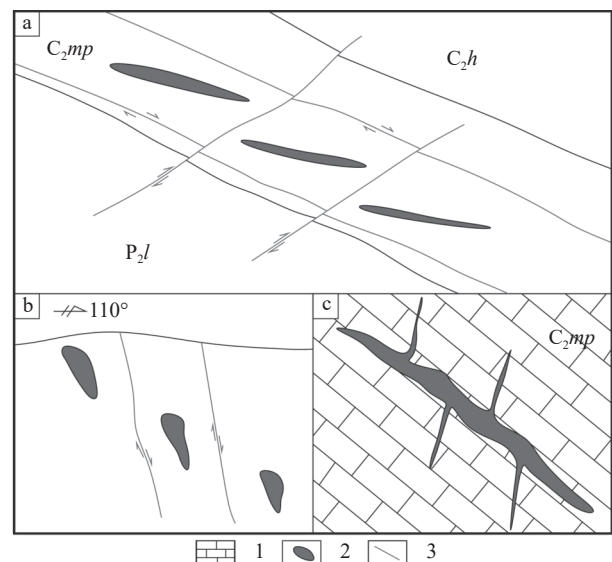


图14 青山铅锌矿床构造控矿型式示意图(a~c解释见正文)
1—灰岩;2—矿体;3—断层; P_2l —中二叠统梁山组; C_{2mp} —上石炭统马平组; C_{2h} —上石炭统黄龙岗组

Fig.14 Schematic diagram of structural ore-controlling type in the Qingshan deposit (see the text for explanations a~c)
1—Limestone; 2—Ore body; 3—Fault; P_2l —Middle Permian Liangshan Formation; C_{2mp} —Upper Carboniferous Maping Formation; C_{2h} —Upper Carboniferous Huanglong Formation

前期和后期归属于不同构造体系,但成矿期构造均是在北西-南东向构造应力作用下形成的,归属于北东构造带,即北东向构造带是该矿床的成矿构造体系,可从以下 3 个方面说明。

(1) 矿区内构造活动强烈,发育明显的不同等级构造,对成矿起到主导性控制作用(表 2)。研究认为,威水断裂、威水背斜为矿区的一级构造,共同控制着区内铅锌矿床沿背斜南西翼展布,形成了断裂-褶皱控制的条带状构造矿化样式(图 15a); 矿区内 F_1 、 F_2 右行斜落断裂为矿区二级构造,在深部与威水断裂有交汇趋势,直接控制着矿体群(段)的展布,形成了雁列式的构造矿化样式(图 15b),成矿结构面为扭张性和次级压扭性断裂; F_1 、 F_2 断裂间的次

级断裂和层间破碎带构成矿区三级构造,受 F_1 、 F_2 断裂限制,规模相对较小,延长数百米,控制单个矿体规模、形态和分布,形成了似层块状型矿化样式,成矿结构面为层间断裂。此外,在矿体旁侧密集发育的节理、裂隙构成了矿区四级构造,控制了单个矿脉的产出,形成了平行脉型矿化样式(图 3d),成矿结构面为扭性—压扭性裂隙面。因此,将成矿构造划分为矿集区构造、矿床构造、矿体构造和矿脉构造,分别控制形成了四种不同的矿化样式。

(2) F_1 、 F_2 断裂-北西向压扭性层间断裂和其中的矿体为同期构造-流体耦合成矿作用的产物,控制该构造体系的主压应力方向为北西-南东向,在其主压应力作用下,形成了多条同向斜落的扭张性

表 2 青山铅锌矿床构造等级划分及其控矿特征

Table 2 Structural classification and ore-controlling characteristics in the Qingshan lead-zinc deposit				
成矿构造等级	矿集区构造 (一级)	矿床构造 (二级)	矿体构造 (三级)	矿脉构造 (四级)
构造类型	威水断裂; 威水背斜	北西向右行 斜落断裂	断裂; 层间破碎带	节理; 裂隙
矿化样式	条带状	雁列式	似层状、块状型	平行脉型
主要特征	多条同向斜落走滑的扭 张性断裂控制了威宁 —水城成矿亚带呈 NW向延伸	NW向扭张性断裂与其上升盘的背斜 组成的断褶构造中发育铅锌矿体; 断 裂带中矿体呈雁列式分布, 并向同方 向倾斜	矿体呈块状产于层 间断裂中	产于块状矿体旁侧平行 排列的节理内
成矿结构面	张扭性断裂带	扭张性和次级压扭性断裂	层间断裂	扭性-压扭性裂隙

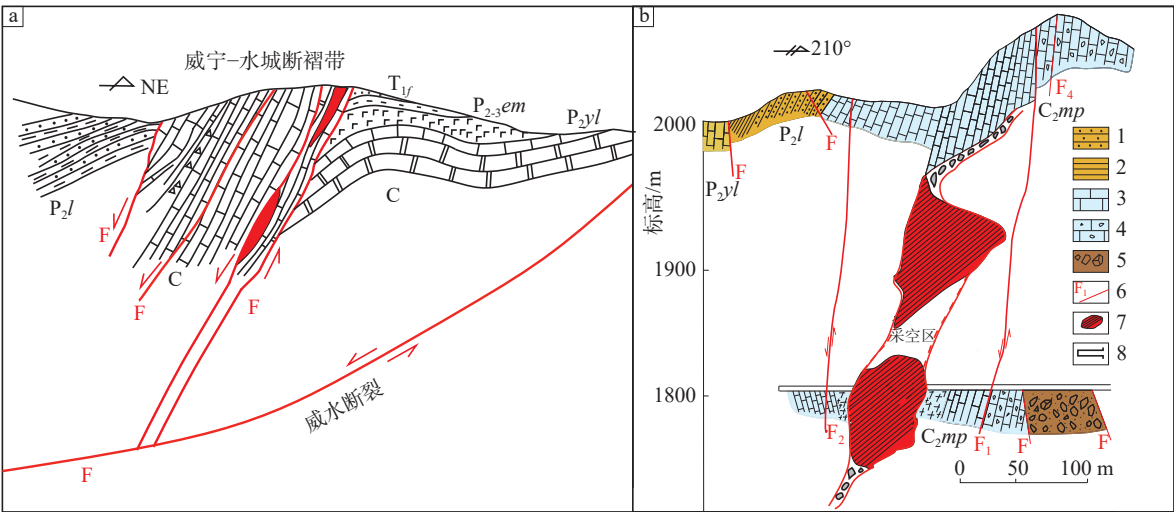


图 15 青山铅锌矿床矿化样式图(a, 据韩润生等, 2020 修改; b, 据钱建平, 2001 修改)
a: T_{1f} —下三叠统飞仙关组; $P_{2,3em}$ —峨眉山玄武岩; P_{2yl} —中二叠统阳新组一阶; P_2l —中二叠统梁山组; C—石炭系; b: 1—碎屑岩; 2—页岩; 3—灰岩; 4—角砾状灰岩; 5—角砾岩; 6—断裂; 7—矿体; 8—坑道
Fig.15 Mineralization pattern of the Qingshan lead-zinc deposit(a, modified from Han Runsheng et al., 2020; b, modified from Qian Jianping, 2001)
a: T_{1f} —Lower Triassic Feixianguan Formation; $P_{2,3em}$ —Emeishan basalts; P_{2yl} —The first stage of Middle Permian Yangxin Formation; P_2l —Middle Permian Liangshan Formation; C—Carboniferous; b: 1—Clastic rock; 2—Shale; 3—Limestone; 4—Brecciated limestone; 5—Breccia; 6—Fault; 7—Ore body; 8—Tunnel

断裂及其与上升盘背斜组成的叠瓦状构造,为成矿流体的运移提供了通道。由于地层陡倾,在应力作用和重力驱动下地层间滑动作用显著,于F₁、F₂断裂旁侧形成了多组北西向右行压扭性层间断裂及破碎带,为矿体就位提供了空间。断裂构造运动呈右行斜落方式,因此赋存的矿体呈雁列式展布,与断裂运动具有一致性。

(3)F₁、F₂断裂带内及旁侧发育强烈的方解石化、黄铁矿化及弱硅化等热液蚀变,反映成矿流体沿构造“贯入”和热液交代特点。矿区内北西向层间断裂构造岩Pb、Zn、Cu、等元素有明显的富集,Pb+Zn含量高于其他方向的断裂(表3)。同时通过对两个中段的微量元素含量对比,发现1742 m中段构造岩中的As、Mn、Sb等元素含量均要高于1826中段构造岩一个或两个数量级,断裂构造岩的物质组分主要有灰岩、灰质白云岩组成。As在岩石圈的上部亲硫性强于亲氧性,由于岩石中铁硫化物含量很低,所以整个岩石中的As含量还是很低(1×10⁻⁶左右)(牟保磊,1999),因此成矿流体不可能全部来源于地层,还来源于富硫的源区。而1742 m中段断裂构造岩中这些元素均高于1826 m中段,说明成矿流体从深部向上部硫化物逐渐减少,含硫量降低,指示成矿流体的运移方向是由深部向浅部运移。根据矿区内方解石包裹体盐度变化反映,青山矿床从深部至浅部,从中心到边部盐度降低,也暗示成矿流体是从深部向浅部运移(毛健全等,1997;

金中国,2008)。进一步说明矿区内北西向断裂为热液运移通道和矿体赋存空间。

5.4 构造控矿机理

5.4.1 构造分级控矿机理

该矿床构造活动强烈,具有多期复合叠加特征,矿床的形成是区域北西-南东向构造应力作用下使威水背斜右行扭动产生的F₁、F₂断裂作用的结果(图16),形成北东向成矿构造体系。高次序构造形迹发生了力学性质转化形成了不同序次、不同规模、不同级别构造,并对成矿起着主导性控制作用,为成矿流体的运移和矿体定位提供了有利的动力条件、运移通道和空间,总体表现为以下四个方面:

(1)区域构造控制矿床集中区和成矿带分布:小江断裂带、昭通—曲靖隐伏断裂带、垭都—紫云断裂带为长期活动的区域性断裂带,控制了川滇黔铅锌银多金属成矿区分布,铅锌矿床(点)都集中分布在3条深切基地断裂所限制的区域内(韩润生等,2001;董家龙,2008)。其中,北西向的威宁—水城断裂带、垭都—蟒硐断裂控制黔西北矿集区两个成矿亚带的分布及断裂上下盘沉积岩相的变化。在印支晚期—燕山早期,受古特提斯洋盆关闭,在印支陆块向扬子陆块碰撞的影响下,威水断裂发生右行走滑作用,主要表现为张扭性,其南西侧派生的次级扭张性断裂,与威水断裂呈交汇趋势,也指示断裂的右行运动学特征。

表 3 青山铅锌矿床断裂构造岩微量元素含量 (10 ⁻⁶)									
Table 3 Trace element content of faulted tectonic rocks in the Qingshan lead-zinc deposit (10 ⁻⁶)									
序号	样号	中段编号	Ag	As	Cd	Cu	Pb	Sb	Zn
1	QS-253	(1)	0.24	4.50	2.86	2.40	98.00	1.18	383.00
2	QS-255	(1)	0.09	7.70	4.64	3.40	92.60	2.25	537.00
3	QS-260	(1)	0.07	5.90	1.62	2.70	138.50	1.51	449.00
4	QS-268	(1)	0.04	1.70	0.47	4.70	21.60	1.82	48.00
5	QS-52	(2)	5.32	177.00	20.90	11.80	1020.00	75.10	5750.00
6	QS-53	(2)	5.15	81.50	2.41	6.30	344.00	20.40	458.00
7	QS-56	(2)	22.00	64.60	33.10	4.00	3450.00	95.60	8610.00
8	QS-60	(2)	0.22	11.70	1.66	1.70	230.00	1.78	656.00
9	QS-66-1	(2)	0.04	1.10	0.62	2.10	51.40	0.21	187.00
10	QS-71	(2)	0.25	5.60	2.28	1.50	199.00	11.20	441.00
11	QS-72	(2)	0.18	6.40	1.73	1.50	151.00	4.99	391.00
12	QS-80-2	(2)	0.08	23.0	6.41	1.80	211.00	19.40	264.00
13	QS-83	(2)	0.10	339.00	10.55	2.70	714.00	173.50	2940.00
14	QS-86	(2)	2.82	82.50	35.10	3.10	3460.00	24.30	3200.00
15	QS-87	(2)	0.07	1.30	3.26	1.50	66.60	0.68	159.00

注: (1)为1826 m中段样品; (2)为1743 m中段样品。测试单位: 广州澳实分析测试中心,测试数据误差在5%以内。

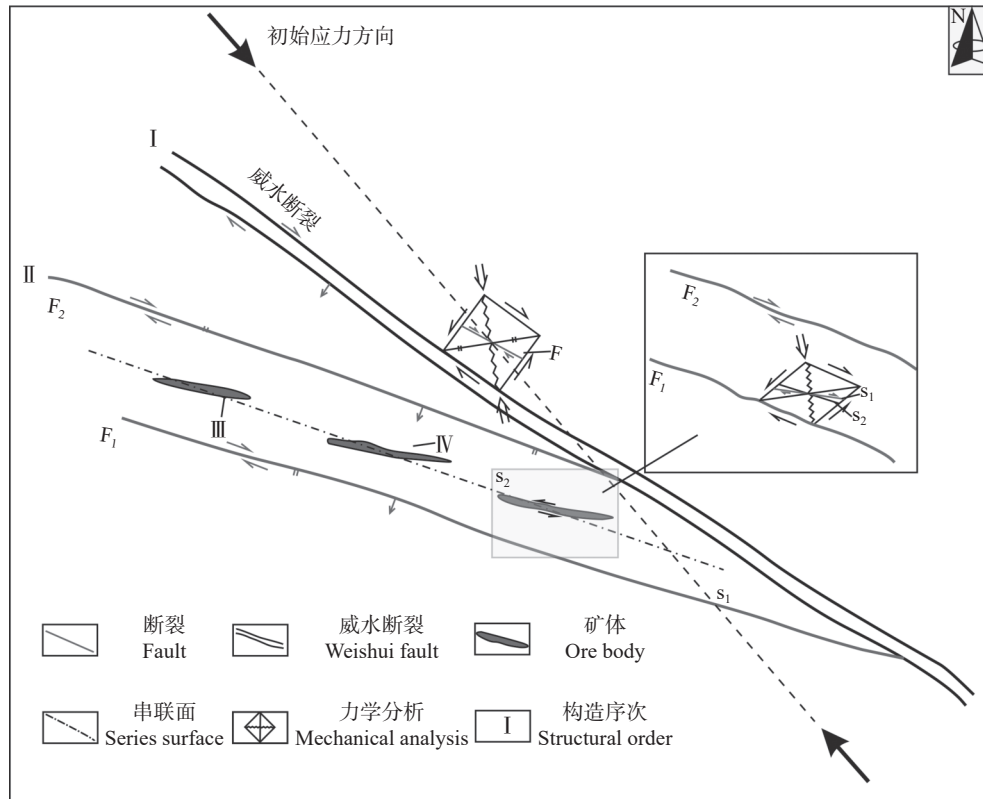


图 16 成矿期构造分级控矿特征与序次转换应力场分析图解

Fig.16 Diagram of tectonic classification ore-controlling characteristics and sequential transformation stress field during metallogenic period

(2) 矿区近外围的威水断裂和威水背斜控制矿化带或矿田: 它们为矿区的一级构造, 在威水断裂及威水背斜的南西侧控制了青山、杉树林等一系列矿床及矿化点分布, 与威水断裂及威水背斜的空间展布具有一致性。

(3) 矿区内北西向 F_1 、 F_2 断裂控制矿床(矿体群): F_1 、 F_2 为矿区内二级控矿构造, 总体向南西倾, 在南东受到北西向威水断裂限制, 为威水断裂右行扭动作用下派生的次级断裂, 在深部与威水断裂有交汇趋势, 该断裂在平面和剖面上较平直, 裂带内发育黄铁矿化、方解石化及灰岩角砾, 表现为扭张性断裂的特点。由于地层陡倾, 在应力作用和重力驱动下断裂运动方向表现为右行斜落。矿体均产在 F_1 、 F_2 断裂下盘, 平距在 300~400 m, 夹持与 F_1 、 F_2 断裂之间, 矿体无论是延长还是延深均与断裂产状方向较一致, 且矿体在平面和剖面上的分布都具有雁列式排列的特点, 且向南东侧伏。

(4) F_1 、 F_2 断裂间发育的层间断裂、破碎带控制矿体: F_1 、 F_2 断裂间发育的层间断裂、破碎带为矿区

内三级控矿构造, 控制着矿体的产出、形态及产状, 这些构造均分布在 F_1 、 F_2 断裂北东侧, 受 F_1 、 F_2 断裂限制, 规模较小, 一般延长数百米。根据矿体在平面上的展布可知其串联面走向北西, 与 F_1 、 F_2 断裂近乎平行, 赋矿层间断裂沿串联面呈雁列式排列, 在平面上成追踪状, 剖面上陡倾, 与串联面呈小角度相交。受 F_1 、 F_2 断裂右行扭动的影响, 形成北西向压扭性层间断裂, 其中为囊状、块状矿体充填, 热液蚀变弱。

(5) 次级节理、裂隙带控制矿脉: 发育在矿体外侧的次级节理裂隙带为四级控矿构造, 控制单个矿脉产出, 这些构造均分布在矿体边缘的碎裂带内, 密集发育, 走向北东, 延伸稳定, 为层间断裂扭动派生的次级构造, 节理面较平直, 其内主要充填方解石、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿, 具压扭性特征, 其形成机制是由于在水平压力的持续作用下地层弯曲幅度不断加大, 由于岩层之间变形不均匀而产生相对扭动, 诱导出剪切应力场, 从而在主矿体旁侧形成两组压扭性为主的共轭节理, 成矿流体沿节理面

运移沉淀形成了主矿体旁的细脉状矿体。

综上所述,在青山铅锌矿区,北西向威水断裂右行扭动派生出北西向扭张性 F_1 、 F_2 断裂,北西向 F_1 、 F_2 右行扭动派生出北西向压扭性的次级层间断裂,次级层间断裂发生扭动派生出具扭性的裂隙群,形成了序次和级别相对的各级序断裂,对矿床、矿体群、矿体、矿脉具有明显的挨次控制关系,均受北东向构造带控制。

5.4.2 构造控矿模式

基于上述分析,在印支晚期,川滇黔成矿区因扬子陆块与印支陆块的碰撞造山作用,导致中越交

界的八布—Phu-Ngu 洋、越北香葩岛—海南屯昌一带洋盆在内的古特提斯洋关闭及南盘江—右江裂陷闭合。区域构造应力向扬子陆块内传导,在黔西北矿集区形成北西向斜落走滑—断褶带(韩润生等, 2019),从而在矿区内发育一系列北西向左行斜落断裂带(威水断裂),此构造背景为成矿流体向上运移和汇聚提供了通道和沉淀场所,发生成矿作用。

基于以上分析,建立青山铅锌矿床构造控矿模式(图 17):印支早—中期(成矿前)受特提斯构造域印支造山运动对本区的影响,褶皱发育,使威水断

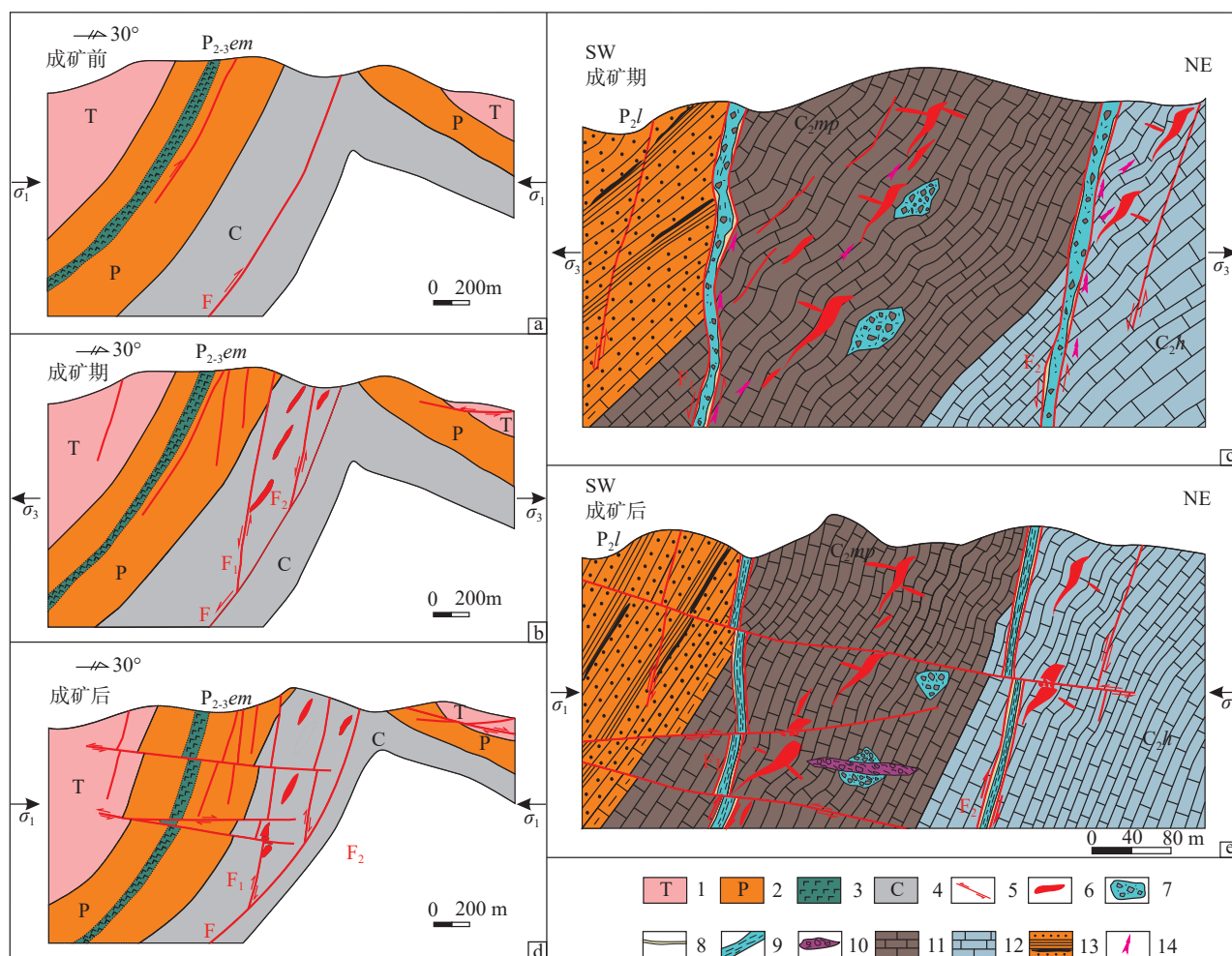


图 17 青山铅锌矿床构造控矿模式图 (a-e 解释见正文)

1—三叠系; 2—二叠系; 3—峨眉山玄武岩; 4—石炭系; 5—断裂; 6—矿体; 7—方解石胶结灰岩角砾; 8—黄铁矿化带; 9—灰岩片理化带; 10—泥质胶结灰岩角砾; 11—上石炭统马平组灰岩; 12—上石炭统黄龙组灰岩; 13—中二叠统梁山组碎屑岩; 14—流体运移方向

Fig.17 Tectonic-controlling model of the Qingshan lead-zinc deposit (see the text for explanations a-e)

1-Triassic; 2-Permian; 3-Emeishan basalts; 4-Carboniferous; 5-Fault; 6-Ore body; 7-Calcite cemented limestone breccia; 8-Pyritization zone; 9-Zonation of limestone flakes; 11-Upper Carboniferous Maping Formation limestone; 12-Upper Carboniferous Huanglong Formation limestone; 13-Middle Permian Liangshan Formation clastic rocks; 14-Fluid migration direction

裂南西侧地层陡倾, 北东侧地层缓倾, 形成斜歪褶皱(图 17a); 印支晚期—燕山早期(成矿期)主要受到北西向主压应力作用, 使得威水背斜南西翼地层发生侧向层间滑脱(图 17b), 成矿流体在构造驱动力下沿断裂 F_1 、 F_2 下盘向上运移, “贯入”于派生的北西向压扭性层间断裂及破碎带中充填—交代形成这种延长大于延深囊状、块状矿体, 并沿断裂两侧发育明显的蚀变带(图 17c)。在矿体旁侧发育了一系列扭性为主节理裂隙构造, 成矿流体沿裂隙沉淀形成细脉状矿体。显然北东构造带为青山铅锌矿床的成矿构造体系, 为矿床成矿的主导性构造体系。总体认为, 该矿床铅锌成矿作用是印支晚期陆块碰撞导致古特提斯洋关闭的成矿响应的产物; 在燕山中—晚期(成矿后), 在北东向主压应力作用下, 在矿区内形成一系列的北东向破碎带破坏了矿体的连续性(图 17d、e), 而对于浅部矿体因地下暗河的存在, 使大量的泥质沉积物挤入矿体与围岩的接触面附近, 在一定程度上对矿体起到了保护作用; 在喜山期, 在区域性走滑断裂的影响下, 矿区内北西向断裂发生了小范围的扭动, 使赋存于裂隙中细脉状矿体发生错动, 但该期构造运动在矿区内活动并不强烈, 对矿床整体定位影响较小。

5.5 构造解析对深部找矿勘查的启示

通过分析矿床中矿体的形成和分布与构造体

系的内在联系, 总结构造体系在空间和时间两方面不同级别构造对矿体的控制作用, 认为该矿床主要受北西向扭张性断裂及上升盘背斜组成的叠瓦状构造控制, 矿体分布与断裂运动方向密切相关, 成斜列式分布, 在整体与局部上均具有等间距、等深距分布之特点, 依此指出找矿方向, 提出 3 个找矿靶区(图 18)。

(1) 青山副井深部 I-1 靶区: 根据青山副井 1789 m、1764 m、1742 m 中段已出露的矿体发现, 矿体受北西向层间断裂控制, 倾向南西, 倾角 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$, 向南东侧伏, 具有其走向延长大于延深的特点, 三个矿体平距在 20~30 m, 深距在 20 m 左右, 依据矿体分布特点及构造控矿规律, 认为找矿预测地段为 1742 中段南东向深部(I-1)。通过坑探工程验证, 在 6、7 中段发现隐伏矿体。

(2) 横塘矿段 I-2 靶区: 该区内发育强烈的方解石化、黄铁矿化, 且位于 F_1 断裂与北西向层间断裂交汇部位, 根据矿体西高东低的分布特点及构造控矿规律, 认为其深部具有较大找矿潜力, 有待工程验证。

(3) 老鹰岩矿段 I-3 靶区: 该区位于横塘矿段南东侧, 及 F_1 断裂与北西向层间断裂交汇部位, 根据矿体等间距、等深距的分布规律, 认为由北西向南东方向矿体埋深加大, 且向 F_1 断裂靠近, 经前期钻

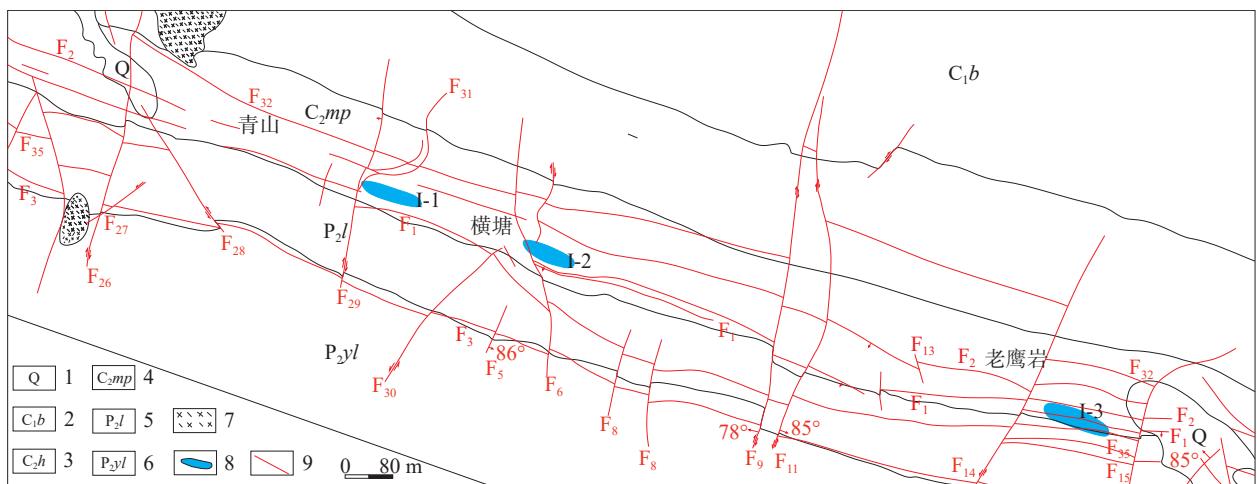


图 18 青山铅锌矿床靶区预测图

1—第四系; 2—下石炭统摆佐组; 3—上石炭统黄龙组; 4—上石炭统马平组; 5—中二叠统梁山组; 6—中二叠统阳新组一阶; 7—辉绿岩; 8—预测靶区; 9—实测断层

Fig.18 Prediction target area of the Qingshan lead-zinc deposit

1—Quaternary; 2—Lower Carboniferous Baizuo Formation; 3—Upper Carboniferous Huanglong Formation; 4—Upper Carboniferous Mapping Formation; 5—Middle Permian Liangshan Formation; 6—The first stage of Middle Permian Yangxin Formation; 7—Diabase; 8—Prediction target area; 9—Measured fault

孔验证在 1500 m 中段见到矿体, 显示出该矿段深部找矿潜力大。

6 结 论

(1) 青山铅锌矿区发育 3 种构造组合, 代表 4 种不同的构造体系, 反映了印支期以来该区经历四期构造成生发展过程。其中, 北东构造带为铅锌成矿构造体系。

(2) 构造分级控矿规律明显: 威宁—水城断裂和威水背斜为矿区内一级控矿构造, 控制了铅锌矿化带或矿田的展布; F_1 、 F_2 断裂为矿床的二级控矿构造, 控制着矿床(矿体群)的展布; F_1 、 F_2 断裂剪切作用派生出的层间压扭性断裂为矿床的三级控矿构造, 控制矿体呈雁列式展布; 节理裂隙带为矿床的四级控矿构造, 控制矿脉分布。它们分别控制了四种不同的矿化样式。

(3) 综合构造控矿机理分析, 构建了矿床构造控矿模式。据此, 提出找矿方向: ①矿区南东侧 F_1 、 F_2 断裂围限地段深部, 即下横塘矿段、老鹰岩矿段深部。② F_1 、 F_2 断裂具有相同的运动学特征, 推测 F_2 下盘(矿区北部)还存在另外一条铅锌矿化带, 与 F_1 断裂下盘的矿体具有相同的分布特征, 可作为今后深部勘查的方向。

致谢: 感谢贵州红桥矿业有限公司技术人员和昆明理工大学王学焜教授在野外工作和论文编写过程中的无私帮助, 谨致谢忱! 同时衷心感谢各位专家和编辑在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见。

References

- Chen Da. 1999. Geological feature and controls on Qingshan Pb-Zn deposit in Shuicheng Country, Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 16(1): 35-39 (in Chinese with English abstract).
- Chen Da, Zeng Dehong. 2000. Characteristics of Ore-controlling Faults and Prospecting Evaluation in Qingshan-Hengtang lead-zinc deposits in Shuicheng, Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 17(1): 46-51 (in Chinese with English abstract).
- Chen Shijie. 1986. Research on the genesis of lead-zinc ore-deposits in Western Guizhou and Northeastern Yunnan[J]. *Guizhou Geology*, (3): 3-14 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Dong Jialong. 2008. Study on Metallogenic Regularity and Ore-prospecting of Pb-Zn Deposit in northwest Guizhou Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 23-26(in Chinese).
- Gu Shangyi. 2007. Study on the sulfur isotopic compositions of lead-zinc deposits in northwestern Guizhou Province[J]. *Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition)*, 36(1): 8-11. (in Chinese with English abstract)
- Han R S, Chen J, Wang F, Wang X K, Li Y. 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 R S, Wang L, Ma D Y, Gu X C, Fan Z G. 2010. “Giant pressure shadow” structure and ore-finding method of tectonic stress field in the Tongchang Cu-Au polymetallic orefield, Shaanxi, China: II. Dynamics of tectonic ore-forming processes and prognosis of concealed ores[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 29(4): 455-463.
- Han Runsheng, Chen Ji, Hang Zhilong, Ma Deyun, Xue Chuandong, Li Yuan, Zou Haijun, Li Bo, Hu Yuzhao, Ma Gengsheng, Huang Deyong, Wang Xuekun. 2006. Tectonic-Metallogenic Dynamics and Location Prediction of Concealed Ore Deposits—A Case Study of the Huize Superlarge Lead-Zinc (Ag, Ge) Deposit in Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 1-170(in Chinese).
- Han Runsheng, Chen Jin, Li Yuan, Ma Deyun, Zhao Deshun, Ma Gengsheng. 2001. Ore-controlling tectonics and prognosis of concealed ores in Huize Pb-Zn deposit, Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 265-269 (in Chinese with English abstract)
- Han Runsheng, Hun Yuzhao, Wang Xuekun, Hang Zhilong, Chen Jin, Wang Feng, Wu Peng, Li Bo, Wang Hongjiang, Dong Yin, 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, Ma Deyun, Liu Congqiang. 2003. Tectonic Mineralization Dynamics of Shaanxi Copper Plant Ore Field [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 3-10 (in Chinese).
- Han Runsheng, Wang Feng, Zhao Gaoshan, Wang Jin, Zhou Xueming, Wang Xuekun. 2010. New progress in deep prospecting of the Zhaotong Maoping lead-zinc deposit in the ore-gathering area of northeast Yunnan[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(3): 275 (in Chinese).
- Han Runsheng, Wang Mingzhi, Jin Zhongguo. 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).
- Han Runsheng, Zhang Yan, Wang Feng, Li Wenyao. 2019. Metallogenic Mechanism of Germanium-rich Pb-Zn Deposit and Optimization of Ore-prospecting Target Area in the Ore-gathering Area of Northeast Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 125-126 (in Chinese).
- 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. 2003. Preliminary discussion on research contents and methods of tectono-metallogenic dynamics and concealed ore orientation prognosis[J]. *Geology and Prospecting*, (1): 7-11 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Chen Wei, Bi Xianwu, Fu Shangling, Yin Runsheng, Xiao Jiafei. 2020. Control of the Precambrian basement on the formation of the Mesozoic largescale low-temperature mineralization in the Yangtze Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 137-150 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xiaoyan, Cai Guosheng, Su Wenchao, Zeng Daoguo, Wang Die. 2013. Characteristics of ore forming fluid in sphalerite of Saojiwan lead-zinc deposit in the northwest of Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(3): 302-307 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhilong, Hu Ruizhong, Su Wenchao, Wen Hanjie, Liu Yan, Fu Yazhou. 2011. A study on the large-scale low-temperature metallogenic domain in Southwestern China—Significance, history and new progress[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 309-314 (in Chinese with English abstract).
- Jin Zhongguo. 2008. The Metallogenic Regularity and Prospecting Forecast of Lead-Zinc Ore in Northwestern Guizhou[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 56-60 (in Chinese).
- Jin Zhongguo, Huang Zhilong. 2009. Lead-zinc mineralization characteristics and exploration potential of the Yadu-Mangdong fault belt in Northwestern Guizhou[J]. *Geology and Exploration*, 45(2): 20-26 (in Chinese with English abstract).
- Liao Wen. 1984. Discussion on the isotopic composition and metallogenic model of Sulfur and lead in lead-zinc areas in eastern Yunnan and Western Guizhou Provinces[J]. *Geology and Exploration*, (1): 2-8 (in Chinese with English abstract).
- Liu Cheng. 2015. Tectonic Evolution and its Controlling on the Mineralization for MVT Pb-Zn Deposits in Western Marginal Area of Yangtze Plate[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 35-45 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hechang. 1996. The metallogenic model of Yunnan, Sichuan and Guizhou lead-zinc metallogenic areas[J]. *Yunnan Geology*, 15(1): 41-51 (in Chinese with English abstract).
- Liu Youping. 2002. Preliminary study on the metallogenic regulation and the prospecting model for the Pb-Zn deposits in the areas of Southwest Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, (3): 30-35 (in Chinese with English abstract).
- Luo Wei, Kong Ling, Jin Zhongguo, Dai Tegen. 2010. Study of ore-controlling structure and mineralization process of the lead-zinc deposits in the Northwest Guizhou[J]. *Mineral Resources and Geology*, 24(1): 35-43 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jianquan, Zhang Qihou, Gu Shangyi. 1997. The geological characteristics and tectonic evolution of Shuicheng fault subsidence[J]. *Journal of Guizhou University of Technology*, (2): 4-9 (in Chinese with English abstract).
- Mou Baolei. 1999. *Element Geochemistry*[M]. Beijing: Peking University Press (in Chinese).
- Ou Jinxiu. 1996. Geological characteristics and ore-control geological conditions of Qingshan Lead-Zinc deposit, Guizhou[J]. *Journal of Guilin Institute of Technology*, (3): 277-282 (in Chinese with English abstract).
- Qian Jianping. 2001. Tectono-dynamic mineralization in Weining-Shuicheng Pb-Zn ore belt, Northwestern Guizhou[J]. *Geology-Geochemistry*, 29(3): 134-139 (in Chinese with English abstract).
- Qin Shourong, Liu Aimin. 1998. A discussion on the Limalayan tectonic movement in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 15(2): 105-114 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jiacong, Han Runsheng. 2016. *Theory and Method of Field Geomechanics*[M]. Beijing: Science Press, 86-100 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiangzhen, Li Changyang, Li Zeqing, Li Baohua, Li Zhouwen. 2002. The comparison of Mississippi Valley-Type lead-zinc deposits in southwest of China and in mid-continent of United States[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 21(2): 127-132 (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).
- Wang Xinwei, Guo Tonglou, Wo Yujin, Zhou Yan, Wu Lizhi, Zhang Rongqiang, Li Shuangjian. 2013. Characteristics of deep structural segmentation and transformation of the Yaziluo fault zone[J]. *Oil & Gas Geology*, 34(2): 220-228 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinwei, Wo Yujin, Zhou Yan, Zhang Rongqiang, Li Shuangjian. 2010. The kinematics of the fold-thrust zones in the western Yangtze Area[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(3): 200-212 (in Chinese with English abstract).
- Wu Genyao, Wang Weifeng, Chi Hongxing. 2012. Basin evolution and later reformation of marine sediments in southern Guizhou Depression and neighboring areas[J]. *Journal of Palaeogeography*, 14(4): 507-521 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xianguo, Huang Zhilong, Zhou Jiaxi, Jin Zhongguo, Li Xiaobiao,

- Zhang Weilun. 2011. Several problems involved in genetic studies on the Pb-Zn deposits, Northwest Guizhou Province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3): 419-424 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jiarong. 1963. General theory of Mineral deposits in China[M]. Beijing: Academic Publishing House, 112-121(in Chinese).
- Zhang Changqing, Mao Jingwen, Wu Suoping, Li Houmin, Liu Feng, Guo Baojian, Gao Derong. 2005. Distribution, characteristics and genesis of Mississippi Valley-Type lead-zinc deposits in Sichuan-Yunnan-Guizhou area[J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 336-348 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changqing, Yu Jinjie, Mao Jingwen, Rui Zongyao. 2009. Advances in the study of Mississippi Valley-type deposits[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 195-210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Deming, He Lianglun, Zeng Guangqian, Yang Kunguang, Dai Chuangu, Zhang Hui. 2014. Superimposed deformation and its controlling effect on Pb-Zn deposits of Guanziyao region in West Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 31(4): 241-251 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Rongqiang, Zhou Yan, Wang Xinwei, Li Shuangjian, Li Song. 2009. Structural features and tectonic evolution of the Wei-Zi-Luo fault zone in southwest Guizhou Province[J]. *Journal of Geomechanics*, 15(2): 178-189 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Weiji. 1984. On the sedimentary genesis and metallogenic regularity of the Pb-Zn deposit in northeast Yunnan[J]. *Geology and Exploration*, (7): 11-16 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J X, Huang Z L, Lü Z C, Zhu X K, Gao J G, Mirnejad H. 2014. Geology, isotope geochemistry and ore genesis of the shanshulin carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 63: 209-225.
- Zhou J, Huang Z, Yan Z. 2013. The origin of the Maozu carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China: Constrained by C-O-S-Pb isotopic compositions and Sm-Nd isotopic age[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 39-47.
- Zhou J, Huang Z, Zhou M, Li X, Jin Z. 2013. Constraints of C-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 77-92.
- Zhu Luyan, Su Wenchao, Shen Nengping, Cai Jiali, Zhang Zhengwei, Zhaozhai, Xie Peng. 2016. Fluid inclusion and sulfur isotopic studies of lead-zinc deposits, northwestern Guizhou, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3431-3440 (in Chinese with English abstract).
- 陈士杰. 1986. 黔西滇东北铅锌矿成因探讨[J]. *贵州地质*, (3): 3-14.
- 成晨, 韩润生, 王雷, 肖宪国, 何志威, 李波, 周暄翎. 2019. 黔西北福来厂铅锌矿床构造生成发展及其控矿作用[J]. *地质力学学报*, 25(1): 90-104.
- 董家龙. 2008. 黔西北地区铅锌矿床成矿规律与找矿研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 23-26.
- 顾尚义. 2007. 黔西北地区铅锌矿硫同位素特征研究[J]. *贵州工业大学学报 (自然科学版)*, 36(1): 11-14.
- 贵州省地质矿产局. 1987. 中华人民共和国地质矿产部地质专报: (一) 区域地质 (第 7 号), 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 731-742.
- 韩润生. 2003. 初论构造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*, (1): 7-11.
- 韩润生, 陈进, 黄智龙, 马德云, 薛传东, 李元, 邹海俊, 李勃, 胡煜昭, 马更生, 黄德镛, 王学焜. 2006. 构造矿动力学及隐伏矿定位预测——以云南会泽超大型铅锌 (银、锗) 矿床为例[M]. 北京: 科学出版社, 1-170.
- 韩润生, 陈进, 李元, 马德云, 赵德顺, 马更生. 2001. 云南会泽铅锌矿床构造控矿规律及其隐伏矿预测[J]. *矿物学报*, 21(2): 265-269.
- 韩润生, 胡煜昭, 王学焜, 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, 马德云, 刘丛强. 2003. 陕西铜厂矿田构造矿动力学[M]. 昆明: 云南科技出版社, 3-10.
- 韩润生, 王峰, 胡煜昭, 王学焜, 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, 王峰, 赵高山, 王进, 周高明, 王学焜. 2010. 滇北东矿集区昭通毛坪铅锌矿床深部找矿新进展[J]. *地学前缘*, 17(3): 275-275.
- 韩润生, 王明志, 金中国. 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.
- 韩润生, 张艳, 王峰, 吴鹏, 邱文龙, 李文尧. 2019. 滇东北矿集区富锗铅锌矿床成矿机制与找矿靶区优选[M]. 北京: 科学出版社, 125-126.
- 胡瑞忠, 陈伟, 毕献武, 胡瑞忠, 陈伟, 毕献武, 付山岭, 尹润生, 肖加飞. 2020. 扬子克拉通前寒武纪基底对中生代大面积低温成矿的制约[J]. *地学前缘*, 27(2): 137-150.
- 胡晓燕, 蔡国盛, 苏文超, 曾道国, 王蝶. 2013. 黔西北筲箕湾铅锌矿床闪锌矿中的成矿流体特征[J]. *矿物学报*, 33(3): 302-307.
- 黄智龙, 胡瑞忠, 苏文超, 温汉捷, 刘桑, 符亚洲. 2011. 西南大面积低温成矿域: 研究意义、历史及新进展[J]. *矿物学报*, 31(3): 309-314.
- 金中国. 2008. 黔西北地区铅锌矿控矿因素、成矿规律与找矿预测[M]. 北京: 冶金工业出版社: 56-60.
- 金中国, 黄智龙. 2009. 黔西北垭都-蟒洞断裂带铅锌成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. *地质与勘探*, 45(2): 20-26.
- 廖文. 1984. 滇东、黔西铅锌金属区硫、铅同位素组成特征与成矿模式探讨[J]. *地质与勘探*, (1): 2-8.
- 刘成. 2015. 扬子板块西缘大地构造演化对 MVT 铅锌矿形成的制约[D]. 成都: 成都理工大学, 35-45.

附中文参考文献

- 陈大. 1999. 水城青山铅锌矿床地质特征及控矿因素初探[J]. *贵州地质*, 16(1): 35-39.
- 陈大, 曾德红. 2000. 青山—横塘矿区铅锌矿床控矿断裂特征及找矿评价[J]. *贵州地质*, 17(1): 46-51.

- 刘幼平. 2002. 黔西北地区铅锌矿成矿规律及找矿模式初探[J]. 贵州地质, (3): 30-35.
- 柳贺昌. 1996. 滇、川、黔铅锌成矿区的成矿模式[J]. 云南地质, 15(1): 41-51.
- 罗卫, 孔令, 金中国, 戴塔根. 2010. 黔西北地区铅锌矿床控矿构造与成矿[J]. 矿产与地质, 24(1): 35-43.
- 毛健全, 张启厚, 顾尚义. 1997. 水城断陷的地质特征及构造演化[J]. 贵州工业大学学报, (2): 4-9.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社: 38-41.
- 欧锦秀. 1996. 贵州水城青山铅锌矿床的成矿地质特征[J]. 桂林工学院学报, (3): 277-282.
- 钱建平. 2001. 黔西北威宁-水城铅锌矿带动力成矿作用研究[J]. 地球与环境, 29(3): 134-139.
- 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.
- 孙家骢, 韩润生. 2016. 矿田地质学理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 86-100.
- 汪新伟, 郭彤楼, 沃玉进, 周雁, 吴莉芝, 张荣强, 李双建. 2013. 岷紫罗断裂带深部构造分段特征及构造变换作用[J]. 石油与天然气地质, 34(2): 220-228.
- 汪新伟, 沃玉进, 周雁, 张荣强, 李双建. 2010. 上扬子地区褶皱-冲断带的运动学特征[J]. 地学前缘, 17(3): 200-212.
- 王奖臻, 李朝阳, 李泽琴, 李葆华, 刘文周. 2002. 川、滇、黔交界地区密西西比河谷型铅锌矿床与美国同类矿床的对比[J]. 矿物岩石地球化学通报, 21(2): 127-132.
- 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.
- 吴根耀, 王伟锋, 迟洪星. 2012. 黔南坳陷及邻区盆地演化和海相沉积的后期改造[J]. 古地理学报, 14(4): 507-521.
- 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.
- 谢家荣. 1963. 中国矿床学总论[M]. 北京: 学术书刊出版社, 112-121.
- 张德明, 何良伦, 曾广乾, 杨坤光, 戴传固, 张慧. 2014. 黔西罐子窑地区叠加变形及其对铅锌矿床的控制作用[J]. 贵州地质, 31(4): 241-251.
- 张荣强, 周雁, 汪新伟, 李双建, 李松. 2009. 贵州西南部威-紫-罗断裂带构造特征及演化[J]. 地质力学学报, 15(2): 178-189.
- 张位及. 1984. 试论滇东北铅锌矿床的沉积成因和成矿规律[J]. 地质与勘探, (7): 11-16.
- 张长青, 毛景文, 吴锁平, 李厚民, 刘峰, 郭保健, 高德荣. 2005. 川滇黔地区 MVT 铅锌矿床分布、特征及成因[J]. 矿床地质, 24(3): 336-348.
- 张长青, 余金杰, 毛景文, 芮宗瑶. 2009. 密西西比型 (MVT) 铅锌矿床研究进展[J]. 矿床地质, 28(2): 195-210.
- 朱路艳, 苏文超, 沈能平, 董文斗, 蔡佳丽, 张正伟, 赵海, 谢鹏. 2016. 黔西北地区铅锌矿床流体包裹体与硫同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 32(11): 3431-3440.