

江苏溧水卧龙山锶矿床地质特征及找矿方向*

陈冬¹, 李鑫², 缪柏虎¹, 孙清钟¹, 蔡露明¹, 胡福培¹

(1 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 2 吉林省地质调查院, 吉林 长春 130021)

摘要 卧龙山锶矿床是江苏省溧水盆地内新发现的热液充填型锶矿床, 目前控制规模为中型。矿床地质特征研究表明, 卧龙山锶矿床矿体的赋存位置及产状均严格受 NW 向断裂构造的控制; 矿石自然类型以致密块状矿石为主, 矿石结构以自形板片状为主, 矿石构造以块状、角砾状和网脉状为主; 围岩蚀变表现为中低温热液蚀变特征, 且沿矿区 NW 向断裂呈线状分布。根据矿物的世代和穿插关系, 将锶矿化划分为天青石-黄铁矿阶段、天青石阶段和方解石-天青石阶段。查明了矿区 NW 向构造是主要控矿因素, 亦是主要找矿标志, 而 NE 向构造是破矿构造。提出了矿区 NW 向构造是区域主干断裂右行扭动所派生的次级断裂构造; 而 NE 向构造是区域主干断裂左行扭动所派生的次级断裂构造; 认为矿区锶矿化发生在主干断裂右行扭动之后, 左行扭动之前, 并赋存在右行扭动派生的 NW 向断裂构造中。因此, 溧水盆地锶矿勘查重点(找矿方向)应沿着开太-白马山主干断裂开展, 找寻其右行扭动派生的 NW 向构造。

关键词 地质学; 锶矿床; 地质特征; 控矿因素; 找矿方向; 溧水盆地

中图分类号: 618.78

文献标志码: A

Geological characteristics and prospecting direction of Wolongshan strontium deposit in Lishui area, Jiangsu Province

CHEN Dong¹, LI Xin², MIAO BoHu¹, SUN QingZhong¹, CAI LuMing¹ and HU FuPei¹

(1 Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, Jiangsu, China; 2 Geological Survey of Jilin Province, Changchun 130021, Jilin, China)

Abstract

The Wolongshan strontium deposit is a hydrothermal-filling type medium-sized strontium deposit recently discovered in the Lishui volcanic basin. The distribution and attitude of the orebodies are controlled by NW-striking faults. The main type of the ore is massive, the dominant texture is in euhedral-granular form, and the ore structure consists mainly of massive, brecciform and stockwork forms. The hydrothermal alteration is characterized by middle-low temperature alteration controlled by the NW-trending faults. The generation and penetrating relationship of minerals show that the ore-forming process of the Wolongshan deposit could be divided into three stages: celestite-pyrite, celestite and calcite-celestite stages. Detailed geological mapping confirms that the NW-trending structure is the main ore-bearing structure, and the NE-striking structure is the ore-breaking structure. The NW-striking fault was formed by the right twisting of the Kaitai-Baimashan fault, while the NE-striking fault was generated during the left twisting. Sr mineralization occurred after the right twisting of the Kaitai-Baimashan fault but before the left twisting, and was distributed in the NW-striking faults

* 本文获得国家自然科学基金项目(编号: 41102123)和中国地质调查局项目(编号: 12120114007101)联合资助

第一作者简介 陈冬, 男, 1984年生, 工程师, 主要从事矿产勘查工作。Email: chenlizhan1984@163.com

收稿日期 2015-05-27; 改回日期 2016-05-05。张绮玲编辑。

formed during the right twisting. This study suggests that the exploration of Sr deposit in the Lishui basin should be focused on the Kaitai-Baimashan fault, and the search for the right twisting derived NW-striking faults might be the prospecting direction in the future.

Key words: geology, strontium deposit, geological characteristics, ore-control factors, prospecting direction, Lishui basin

长江中下游成矿带位于扬子板块北缘,华北板块和秦岭造山带南侧,是中国最重要的陆内铁铜金多金属成矿带之一(毛景文等,2009;2012;周涛发等,2011),自西向东依次分布有鄂东、九瑞、安庆、庐枞、铜陵、宁芜和宁镇等 7 个大型矿集区(常印佛等,1991;翟裕生等,1992;周涛发等,2008;陈志洪等,2011;王丽娟等,2014)。溧水盆地位于长江中下游成矿带东段,毗邻宁芜和宁镇两大矿集区,但盆地内铁铜等矿产成矿作用较前者弱,目前仅发现小型铁矿床 4 处,小型铜及铜多金属矿床 3 处,小型金矿床 1 处(宗诚等,1986);而锑矿则是溧水盆地的优势矿产,现已发现大型锑矿床 1 处(爱景山,目前保有天青石基础储量 289.01 kt,平均品位 43.75%),中型锑矿床 1 处(卧龙山,目前已估算出天青石 333 资源量 163.24 kt,平均品位 41.77%),锑矿点 4 处(后方村、石坝桥、石坝、小东山)(潘万乾等,2013;陈冬等,2014b),且矿石质量好,经济价值高。由于卧龙山锑矿床是近几年来江苏省新发现的中型锑矿床,虽然较受重视,但其工作程度和研究程度均较低。溧水盆地是长江中下游成矿带中少有的盛产锑矿的火山岩盆地,截止目前,该盆地仍是成矿带中重要的锑矿产地。自 20 世纪 80 年代至今,虽然对溧水盆地进行了大规模的锑矿勘查和开采,但尚未系统开展过锑矿研究工作,仅有个别学者对锑矿床的勘查进行了少量的研究(刘振红等,1993;张福祯,1996),而对锑矿床的成矿规律及控矿因素等关键性问题却鲜有报道。

本文通过对溧水盆地内卧龙山中型锑矿床的地质特征的研究,查明了该类型锑矿的控矿因素,同时结合对溧水盆地构造演化、主干断裂及其次级断裂力学性质的分析,初步总结了溧水盆地锑矿成矿规律,为长江中下游成矿学研究提供了新的资料,并提出了锑矿找矿方向,为下一步找矿工作提供理论依据。

1 区域成矿地质背景

溧水火山岩盆地的演化始于晚三叠世的南象运动(宗诚等,1986),该地质事件结束了长江中下游地

区自古生代以来海侵-海退的历史,使其转变为板内构造变形及构造-岩浆活动的演化阶段(翟裕生等,1992;周涛发等,2008;2012)。

早-中侏罗世,溧水盆地西侧边界断裂已具雏形,但与其北东侧的宁芜盆地仍为一个整体,为一内陆湖盆地(宗诚等,1986),发育有象山群(宁芜盆地)和朱村组、陡山组(溧水盆地)等一套巨厚的泥质粉砂岩-粉砂岩-砂岩建造。晚侏罗世,受燕山 II 幕构造运动影响,溧水盆地内的主干断裂开始形成,破坏了早阶段的湖盆沉积环境,直至盆地西侧边界 NE 向方山-小丹阳断裂生成,将溧水和宁芜两盆地分割开来,溧水盆地的构造格架才基本形成(宗诚等,1986),但该时期盆地内火山-岩浆活动较弱,盆地内仅发育西横山组的一套砂岩-砂砾岩-砾岩建造。进入白垩纪后,溧水盆地开始进入强烈的火山-岩浆活动阶段(王丽娟等,2014;窦志娟,2015;张少琴等,2015),按时间先后顺序依次发育有龙王山旋回、大王山旋回、姚家边旋回和甲山旋回等 4 个火山-岩浆活动旋回,且以龙王山、大王山两个旋回的火山-岩浆活动最为强烈(图 1)。

同时,盆地内的火山-岩浆活动的空间分布也具有一定的规律性,即盆地西北部火山-岩浆活动较早,之后,沿 NW 向、近 SN 向火山-岩浆活动带逐渐向南东发展。如盆地西北至南东,各次火山岩年龄依次为:大铜山闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄(136.0 ± 3.4) Ma,大魏庄闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄(132.7 ± 2.7) Ma,老虎头闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄(130.5 ± 1.6) Ma,砚瓦桥石英闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄(129.4 ± 1.7) Ma,尖山黑云母粗安斑岩锆石 U-Pb 年龄(127.4 ± 1.8) Ma(王丽娟等,2014)。

早白垩世,溧水盆地受燕山 III、IV 幕运动影响,早阶段形成的主干断裂构造继续活动,和新生成的断裂构造自西向东控制了多条火山-岩浆活动带。这些受断裂构造控制的火山-岩浆活动带制约着溧水盆地内火山-岩浆活动的范围和内生金属、非金属矿产的空间分布。如横溪-大魏庄和地溪-十里牌 2 条火山-岩浆活动带制约着盆地西北部龙王山旋回

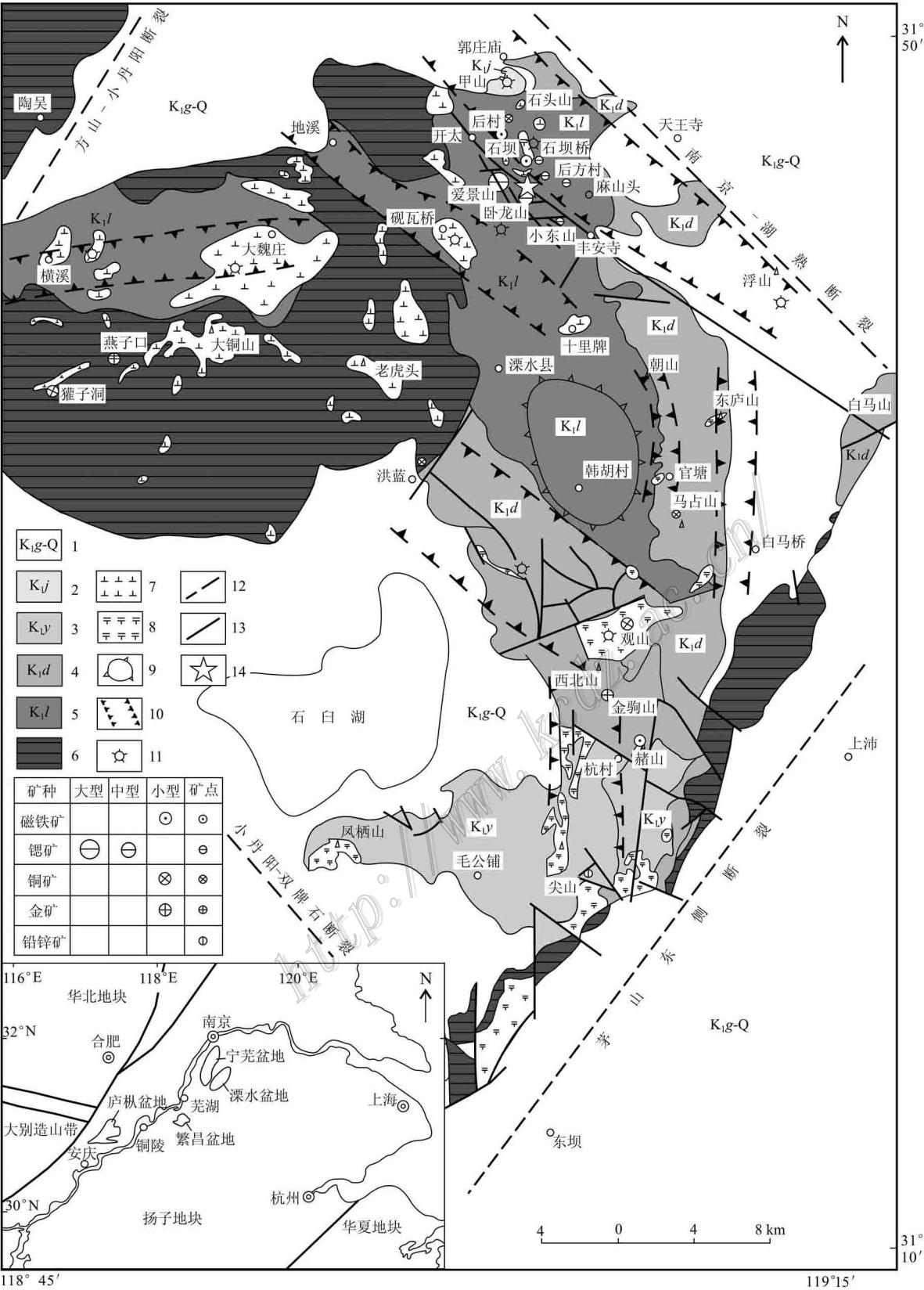


图 1 溧水盆地地质矿产简图(据宗诚等,1986 修编)

1—火山岩盖层; 2—甲山组流纹质火山岩及火山碎屑岩; 3—姚家边组粗安质-粗面质火山岩及火山碎屑岩; 4—大王山组粗安质火山

岩及火山碎屑岩; 5—龙王山组安山质火山岩及火山碎屑岩; 6—基底地层(粉砂岩、中-粗粒长石砂岩); 7—龙王山期侵入岩; 8—大王山期侵入岩; 9—火山穹窿; 10—火山-岩浆活动带及编号; 11—火山口; 12—盆地边界断裂; 13—断裂; 14—研究区

Fig. 1 Sketch map of geology and mineral resources in Lishui basin (modified after Zong et al., 1986)

1—Volcanic cap rocks; 2—Jiashan Formation rhyolitic volcanic rocks and rhyolitic pyroclastic rocks; 3—Yaojiabian Formation trachytic-trachy-andesitic volcanic rocks and trachytic-trachy-andesitic pyroclastic rocks; 4—Dawangshan Formation trachy-andesitic volcanic rocks and trachy-andesitic pyroclastic rocks; 5—Longwangshan Formation andesitic volcanic rocks and andesitic pyroclastic rocks; 6—Volcanic basement (siltstone, coarse-medium arkose); 7—Intrusive rock of Longwangshan stage; 8—Intrusive rock of Dawangshan stage; 9—Volcanic crater; 10—Rock-magma belt and its serial number; 11—Volcanic dome; 12—Fault of basin boundary; 13—Fault; 14—Study area

火山岩的分布范围, 郭庄庙-浮山火山-岩浆活动带不仅制约着盆地东北部龙王山旋回和甲山旋回火山岩的分布范围, 而且控制着石坝、后村 2 个磁铁矿床, 石头山铜矿点, 爱景山、卧龙山 2 个锆矿床和后方村、石坝桥、石坝、小东山 4 个锆矿点, 是溧水地区最重要的铁(铜)、锆矿成矿带。洪兰-观山火山-岩浆活动带不仅制约着大王山旋回火山岩的分布范围, 而且控制着观山铜(铅锌)矿床、金驹山金多金属矿床等。早白垩世晚期, 甲山旋回以后溧水盆地内火山-岩浆活动趋于平缓, 盆地内火山岩区开始发育一些隆起和凹陷, 并在凹陷区内沉积葛村组红层, 至燕山晚期, 隆起和凹陷进一步加速, 盆地西北部獐子洞、大魏庄等火山岩区快速隆起, 遭受剥蚀, 而盆地东北部天王寺、西南部石臼湖等地持续凹陷, 发育有上白垩统浦口组至古近系阜宁群等地层。喜马拉雅期溧水盆地内火山-岩浆活动微弱, 仅个别基底断裂复活, 在盆地内浮山、上沛两地零星出露新生代玄武岩。

溧水盆地内出露地层大致可以分为基底地层、火山岩地层和火山岩盖层 3 大类。基底地层为古生界下志留统高家边组—中生界上侏罗统西横山组, 是一套浅海至陆内湖盆相沉积岩。火山岩地层按火山-岩浆活动的先后次序依次发育下白垩统龙王山组、大王山组、姚家边组、甲山组, 各组之间为不整合接触关系。龙王山组不整合于基底地层之上, 岩性主要为一套安山质火山岩和火山碎屑岩, 大王山组岩性主要为一套粗安质火山岩和火山碎屑岩, 姚家边组岩性主要为一套粗安质-粗面质火山岩和火山碎屑岩, 甲山组岩性主要为一套流纹质火山岩和火山碎屑岩。火山岩盖层为下白垩统葛村组—古新统阜宁群, 是一套氧化环境下的陆相红盆沉积岩。溧水盆地内褶皱构造不发育, 以断裂构造为主, 主要发育 NE 向、NW 向、近 EW 向、近 SN 向 4 组, 其中又以 NE 向和 NW 向 2 组最为发育, 两者相互交错, 构成溧水盆地格子状的构造格局。NW 向和 NE 向断裂构造多切穿盆地基底, 控制着盆地内火山-岩浆活

动带, 也控制着盆地内内生金属、非金属矿产的分布。溧水盆地内次火山岩受火山-岩浆活动带和火山机构的控制, 按时间先后顺序依次发育闪长玢岩、辉石闪长玢岩、玄武玢岩→粗安斑岩、二长斑岩、花岗闪长斑岩→流纹斑岩、石英斑岩等岩石组合, 岩性总体自古至新, 由中基性向酸性演化, 其中, 龙王山旋回的闪长玢岩、辉石闪长玢岩控制着盆地内陆相火山岩型铁(铜)矿床的空间分布, 矿床多产于该期次火山岩的顶部或边部, 如石坝磁铁矿矿床、后村磁铁矿矿床。大王山旋回的粗安斑岩、二长斑岩则制约着盆地内的铜(铅锌)、金等矿产的分布, 矿床多产于次火山岩体附近的断裂破碎带中, 如金驹山金多金属矿床(陈冬等, 2014a)、观山铜铅矿床(梁业恒等, 2008; 2010a; 2010b)。

2 矿区地质特征

卧龙山锆矿区位于溧水盆地东北部郭庄庙-浮山铁(铜)、锆矿成矿带中段, 爱景山大型锆矿床南侧, 其成矿地质条件与爱景山矿床相似, 矿体赋存于龙王山旋回火山岩或火山碎屑岩中, 受矿区 NW 向张性断裂构造的控制, 与围岩界线清晰。矿区围岩蚀变强度弱、范围窄, 一般几十厘米至十几米, 且受矿区 NW 向断裂构造制约, 呈线状分布。蚀变类型较简单, 主要发育有绿泥石化、碳酸盐化、黄铁矿化、高岭土化、绢云母化等。据前人对其邻区爱景山锆矿床的研究, 成矿流体温度分别为 259℃(吴岩等, 1981)和 240~360℃(窦志娟, 2015), 初步认为其为中温热液充填型矿床。

2.1 地层

矿区出露地层由古到新依次为: 中侏罗统陡山组、下白垩统龙王山组、大王山组和第四系。

陡山组是矿区火山岩基底地层, 为一套内陆湖相砂岩建造。零星分布于卧龙山南坡, 地层倾向 300~310°, 倾角 55~65°。

龙王山组是矿区赋矿围岩, 据现有研究资料显

示该组火山碎屑岩是溧水地区锑矿矿源层(朱根林等,1990;刘振红,1990;黄志良等,1994;窦志娟,2015)。据岩性划分为上、下2个岩性段,下段主要出露在卧龙山北坡,勘探线2~7线的钻孔中也有揭露,岩性为一套安山质沉火山碎屑岩,局部地段相变为安山质火山碎屑岩。在该层底部与陡山组不整合接触面上见薄层凝灰质杂砾岩,为火山-岩浆活动初期产物。上段地层在矿区较发育,按其岩性可划分为上、中、下3个岩性层:下层主要出露于卧龙山-爱景山南段,勘探线0~7线的钻孔中也有揭露,岩性为辉石安山岩及辉石安山质火山碎屑岩;中层主要出露于卧龙山南坡,岩性以辉石安山岩、辉石安山质角砾熔岩及辉石安山质火山碎屑岩为主;上层出露于卧龙山顶,呈环状分布,岩性主要为安山质沉凝灰岩夹安山质沉角砾凝灰岩,具明显的韵律层理,沉积特征明显,该层与下伏地层整合接触,地表出露产状由环带四周向中心倾斜,倾角变化在 $30\sim 46^\circ$ 之间。

矿区内仅出露大王山组上段,位于卧龙山顶,岩性为一套中偏碱性熔结火山碎屑岩,以熔结凝灰岩-熔结角砾岩为主,局部相变为熔结含集块角砾岩,底部含有下伏龙王山组上段沉凝灰岩及正常火山碎屑岩角砾。该层倾向与下伏沉凝灰岩相似,倾角变化在 $18\sim 25^\circ$ 之间。

2.2 构造

矿区褶皱构造不发育,仅于卧龙山山顶见一条短轴向斜,对矿区次火山岩和矿脉影响较弱,而矿区断裂构造则较发育,是矿区控岩、控矿构造,不仅制约着矿区次火山岩脉的分布,而且控制或破坏矿体。矿区主要发育NW向和NE向2组断裂,NW向断裂形成时间较早,性质以张性为主,局部具压性特征,控制着矿区次火山岩脉和锑矿脉的分布及产出状态,是矿区的控岩和控矿断裂。断裂总体走向 $300\sim 340^\circ$,倾角 $60\sim 85^\circ$,共计11条,编号Fn1~Fn11,其中以Fn2断裂规模最大,控制着矿区12条矿脉中的9条,是矿区主要的控矿构造。

NE向断裂形成时间晚于NW向断裂,性质为右行正断层,亦显张性特征,多右行错断NW向断裂和锑矿体,是矿区的破矿构造,也是矿区的主要破矿因素。断裂总体走向 $35\sim 70^\circ$,倾角 $65\sim 85^\circ$,共计15条,编号F1~F15。

2.3 岩浆岩

矿区出露岩浆岩以次火山岩为主,岩性分别为

辉石闪长玢岩(安山玢岩)、(石英)粗安斑岩和霏细斑岩。辉石闪长玢岩(安山玢岩)是矿区分布最广的次火山岩,为龙王山旋回火山-岩浆活动产物,锆石U-Pb年龄 $(130.5\pm 1.6)\sim (136.0\pm 3.4)$ Ma(王丽娟等,2014;2015), $w(\text{Sr})$ 高,平均达 1000×10^{-6} (宗诚等,1986)和 4597×10^{-6} (张福祯,1997),部分学者认为辉石闪长玢岩是溧水地区锑矿的矿源岩(窦志娟,2015)。主要出露于爱景山南坡、卧龙山和孝山等地,多呈岩脉的形式产出,受矿区NW向断裂构造控制。

(石英)粗安斑岩为大王山旋回火山-岩浆活动产物,锆石U-Pb年龄 $(127.0\pm 1.9)\sim (127.4\pm 1.8)$ Ma(王丽娟等,2014), $w(\text{Sr})$ 低,平均 350×10^{-6} (宗诚等,1986),主要出露于卧龙山南坡,呈岩脉的形式产出,受矿区NW向断裂构造控制。

霏细斑岩在矿区分布范围较小,仅出露于卧龙山西坡NW向Fn8断裂构造上盘,呈陡立的岩墙状产出。目前暂无测年数据,据其酸性的岩性特征,初步认为是甲山旋回火山-岩浆活动产物。

3 矿体地质特征

3.1 矿体特征

矿区内共圈定出12条锑矿体,除Sr1号矿体北西段出露地表外,其余矿体均为隐伏矿体,主要分布于爱景山和卧龙山之间的凹地中,工业价值的锑矿体则集中产出于27线~3线之间。矿区内12条锑矿体均产出在NW向断裂破碎带中,形态呈细脉状、透镜状或不规则状(图3),总体走向 $320\sim 335^\circ$,倾向北东,倾角较陡 $65\sim 85^\circ$ (表1)。现以矿区规模最大的Sr1号矿体为例,详细介绍矿体的分布、形态、规模、产状、品位等特征。

Sr1号矿体赋存于27线~2线之间,矿体北西端翘起,出露地表,沿南东方向逐渐隐伏于地下,南东端最大埋藏深度约-310 m。矿体赋存在NW向Fn2断裂破碎带中,且其产状和规模均受Fn2断裂破碎带制约,其北西段被NE向F1、F2断裂构造右行错断,南东段被NE向F3断裂构造右行错断(图2),但右行错断距离不大。矿体平面形态呈狭长的脉状,剖面形态为上宽下窄的楔形,总体走向 $320\sim 335^\circ$,倾向北东,倾角具有上陡下缓的趋势,上部平均 $80\sim 85^\circ$,下部平均 $65\sim 70^\circ$ 。矿体走向延长约400 m,倾向延伸最大达310 m,最大真厚度5.98 m,最

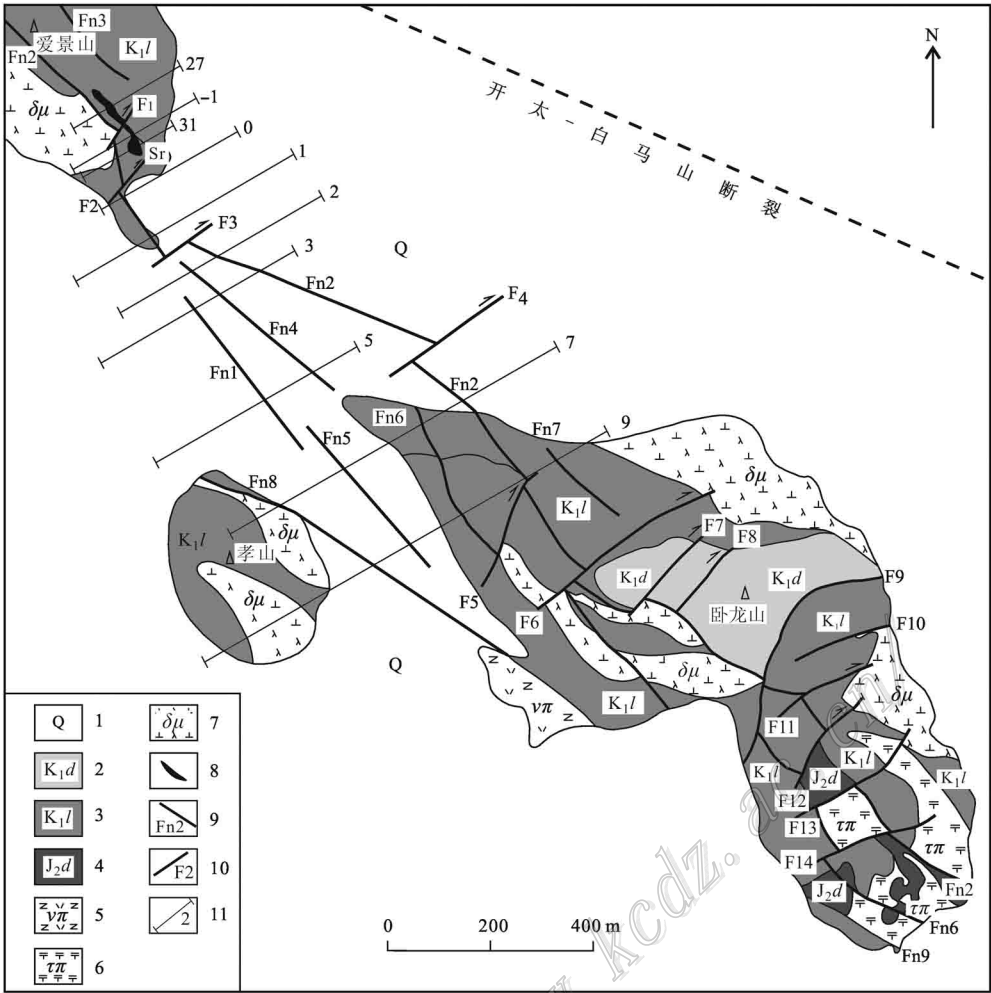


图 2 卧龙山锶矿区地质简图

1—第四系；2—大王山组；3—龙王山组；4—陡山组；5—霏细斑岩；6—石英粗安斑岩；7—闪长玢岩；8—矿体；9—NW 向构造及编号；10—NE 向构造及编号；11—勘探线及编号

Fig. 2 Sketch map of geology in Wolongshan Sr ore district

1—Quaternary; 2—Dawangshan Formation; 3—Longwangshan Formation; 4—Doushan Formation; 5—Felsophyre; 6—Quartz trachyandesite-porphryrite; 7—Dioritie-porphryrite; 8—Orebody; 9—NW-trending structure and its serial number; 10—NE-trending structure and its serial number; 11—Exploration line and its serial number

表 1 卧龙山矿床各矿体特征与 NW 向断裂特征对比表

Table 1 Contrast table of characteristics of various orebodies and NW-trending structures in the Wolongshan deposit

矿体 编号	产状			走向规模		天青石 平均品位/%	控矿断 裂编号	产状			走向规模	
	走向/°	倾向	倾角/°	长/m	最大真厚/m			走向/°	倾向	倾角/°	长/m	宽/m
Sr1	320~335	NE	65~85	>370	5.98	19.74~49.17	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14~57.5
Sr2	330	NE	75	≤90	1.49	16.28	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14~57.5
Sr3	330	NE	70	≤90	1.07	50.17	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14~57.5
Sr4	330	SW	85	≤100	3.23	62.65	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14~57.5
Sr5	330	NE	67~70	≤100	2.73	20.44~27.50	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14~57.5
Sr6	330	NE	70	≤100	2.40	28.78	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14~57.5
Sr7	330	NE	70	≤90	1.84	19.55	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14~57.5
Sr8	330	NE	70	≤90	1.11	18.66	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14~57.5
Sr9	330	NE	80~85	≤90	1.89	20.96	Fn4	330	NE	80	≥500	2.5~4.0
Sr10	330	NE	80	≤200	1.84	23.35	Fn5	322~335	NE	70~80	≥600	6~22
Sr11	320~335	NE	80	≤400	3.19	19.29	Fn2	320~335	NE	65~82	≥5000	14.0~57.5
Sr12	330	NE	65	≤200	1.39	17.69	Fn11	330	NE	65	≥200	6~13

注：控矿断裂性质均为张性、正断层。

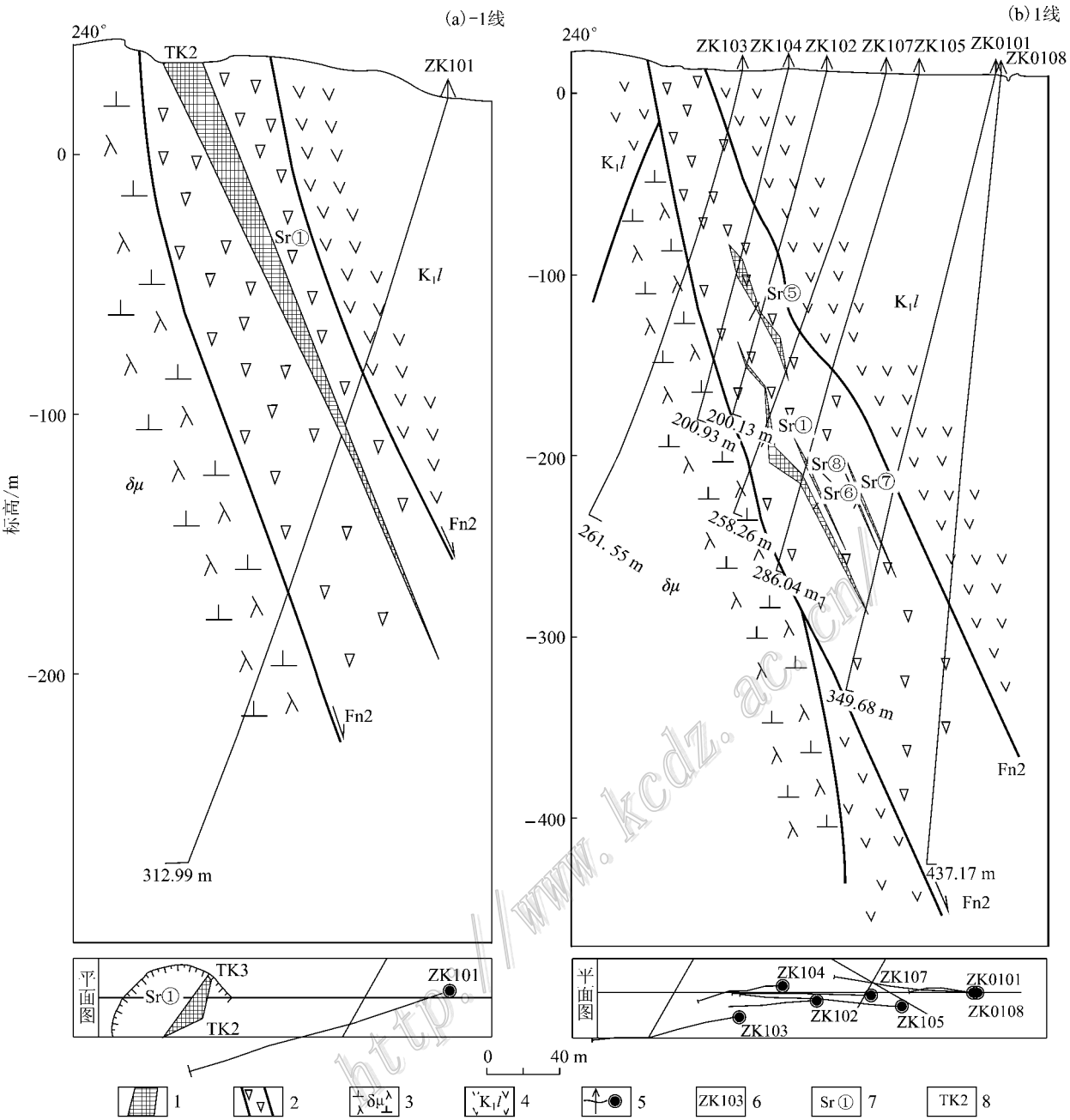


图 3 卧龙山矿区 -1 线(a)和 1 线(b)地质剖面简图

1—矿体；2—构造破碎带；3—闪长玢岩；4—龙王山组；5—钻孔；6—钻孔编号；7—矿体编号；8—探槽编号

Fig. 3 Sketch map of No. (1 (a) and No. 1 (b) geological section in Wolongshan mining area

1—Orebody; 2—Structural fractured belt; 3—Dioritie-porphryrite; 4—Longwangshan Formation; 5—Drill hole; 6—Serial number of drill hole; 7—Serial number of orebody; 8—Serial number of trench

小真厚度 1.07 m, 平均 2.37 m。矿体品位沿其走向和倾向变化不大, 总体表现为上富下贫的趋势。

3.2 矿化期次及矿化阶段

根据野外地质观查和镜下鉴定结果, 依据矿物的世代、穿插关系, 将卧龙山矿区锑矿化划分为热液

期和表生期 2 个成矿期。以热液成矿期为主, 同时又可将其划分为 3 个成矿阶段, 即天青石-黄铁矿阶段、天青石阶段和方解石-天青石阶段(图 4)。

(1) 热液成矿期

天青石-黄铁矿阶段 该阶段为热液成矿期的早

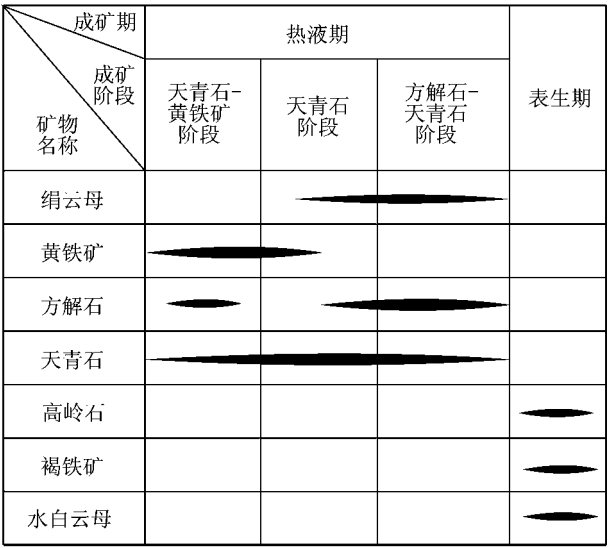


图 4 卧龙山矿床矿物生成顺序图

Fig. 4 Mineralization epoch and paragenesis map of the Wolongshan deposit

期阶段,主要形成黄铁矿和少量天青石(图 5a)。该阶段黄铁矿大量晶出,局部地段形成工业矿体;天青石少量或微量产出,晶形较好,多为颗粒较大的自形晶,粒径一般 10~40 mm。

天青石阶段 为热液成矿期的主成矿阶段,该阶段天青石大量晶出,由于结晶空间充足,多形成颗粒较大、自形程度高的板片状晶体,粒径一般 10~60 mm,个别达 60~80 mm。该阶段亦有少量黄铁矿,多为细粒结晶结构,充填于天青石晶体间,地表风化后可于锆矿石中见褐铁矿蜂窝(图 5b)。

方解石-天青石阶段 为热液成矿期的次要成矿阶段,该阶段除天青石外亦有方解石大量产出,形成方解石-天青石锆矿石(图 5c、d)。该阶段天青石与方解石呈共生关系,两种矿物边界清晰且平直,但该阶段天青石矿物粒径较天青石阶段小,一般 5~20 mm,晶形多为自形-半自形。

(2) 表生氧化淋滤期

地表及近地表条件下,主要生成高岭石、褐铁矿及水白云母等。局部天青石矿体的顶部遭受风化、剥蚀。

3.3 矿石特征

3.3.1 矿石类型及组构

矿石类型较简单,主要为致密块状锆矿石,局部见角砾状锆矿石和网脉状锆矿石,致密块状、角砾状矿石多为工业矿石,网脉状矿石则多为低品位矿石。矿石结构单一,主要为自形-半自形板片状结晶结

构,自形的天青石晶体颗粒较大,一般长 5~60 mm,厚 2~10 mm(图 6a、b)。矿石构造亦较简单,主要有块状构造,少量角砾状构造、网脉状构造(图 6c、d),局部地段见梳状构造。

3.3.2 矿石组分

(1) 矿物组分: 锆矿石矿物成分简单,矿石矿物主要为天青石;脉石矿物为黄铁矿、方解石、高岭石、绢云母等。将主要矿物特征描述如下:

天青石 锆矿石的主要矿石矿物。呈白色,少数略带淡蓝色;板片状(平行双面),少量为斜方单锥及斜方柱,玻璃光泽,硬度 3.5,(001)解理完好,性脆,镜下为无色,干涉色 I 级灰白,中正凸起,平行消光,二轴晶($+0.2V=45.5^\circ$)。矿石中天青石多呈自形板片状,粒径 10~60 mm 不等,少量半自形板状-他形粒状,粒径 1~5 mm。

黄铁矿 为锆矿化早阶段矿物,与天青石共生,含量不均匀,一般小于 10%,局部可达 60%~70%,构成黄铁矿矿体。锆矿石中黄铁矿呈灰黄-灰黑色,以他形粒状为主,粒径 0.1~0.3 mm,集合体呈脉状、团块状穿插或包裹围岩角砾。

方解石 锆矿石的主要脉石矿物,在矿区深部含量较高,局部可见纯方解石脉,地表及浅部矿体中少见。锆矿石中方解石呈白色,以自形-半自形菱面体为主,在结晶条件较好时易于与天青石区分,粒径一般 5~20 mm。集合体呈团块状、宽脉状与天青石共生,或以他形粒状充填于天青石晶体之间,在矿石中含量一般 10%~20%。

高岭石 锆矿石的次要脉石矿物,多产于角砾状、网脉状锆矿石中,受矿石中残留围岩碎块的影响,在矿石中的含量很不稳定,是矿石中残留围岩碎块的长石蚀变矿物。

(2) 化学组分: 锆矿石的化学组分主要为 SrO、BaO、CaO、SO₃、Fe₂O₃、S、SiO₂、Al₂O₃ 等,其平均质量分数分别为 38.01%、2.74%、2.03%、32.13%、7.05%、5.24%、7.48%、3.18%;稀有及贵金属元素含量甚微(表 2)。其中 SrO 为矿石的主要有益组分,BaO、CaO 为矿石的主要有害组分,其余化学组分对矿石质量影响不大。

4 控矿因素

4.1 岩浆岩与成矿关系

溧水盆地龙王山旋回的火山岩与大王山旋回、姚家边旋回、甲山旋回的火山岩相比,Sr、Ca 含量最

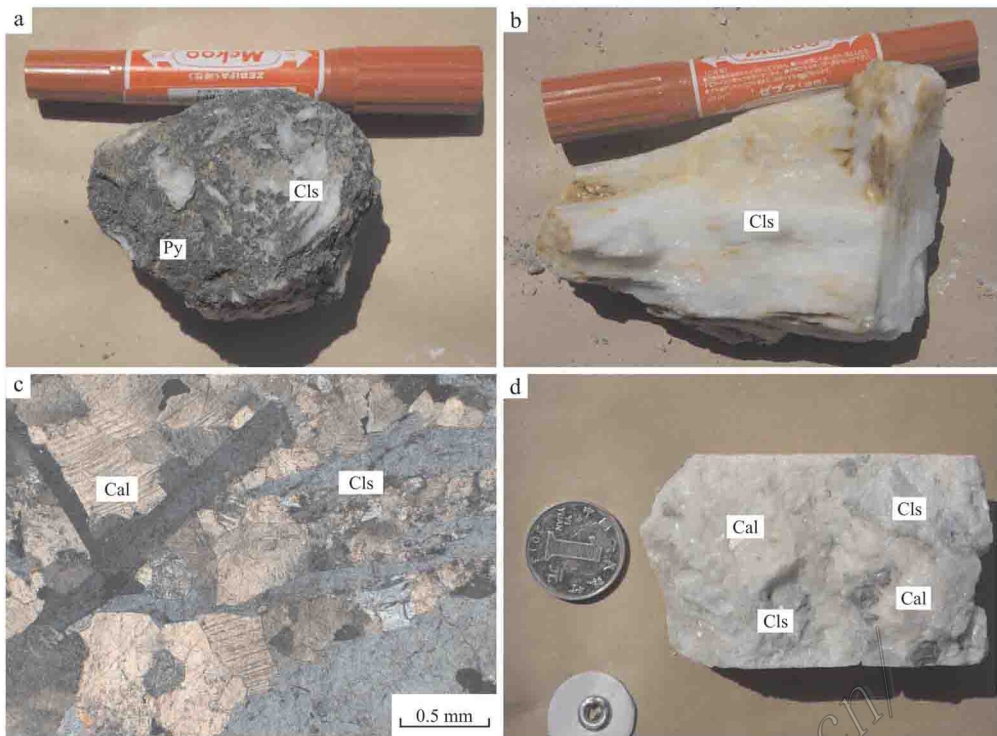


图 5 卧龙山矿床各成矿阶段矿石照片

a. 天青石-黄铁矿阶段矿石；b. 天青石阶段矿石；c. 天青石-方解石阶段矿石（正交偏光）；d. 天青石-方解石阶段矿石
Py—黄铁矿；Cal—方解石；Cls—天青石

Fig. 5 Photographs of each mineralization stage in the Wolongshan deposit

a. Celestite-Pyrite mineralization stage ore; b. Celestite mineralization stage ore; c. Celestite-calcite mineralization stage ore
(crossed nicols); d. Celestite-calcite mineralization stage ore
Py—Pyrite; Cal—Calcite; Cls—Celestite

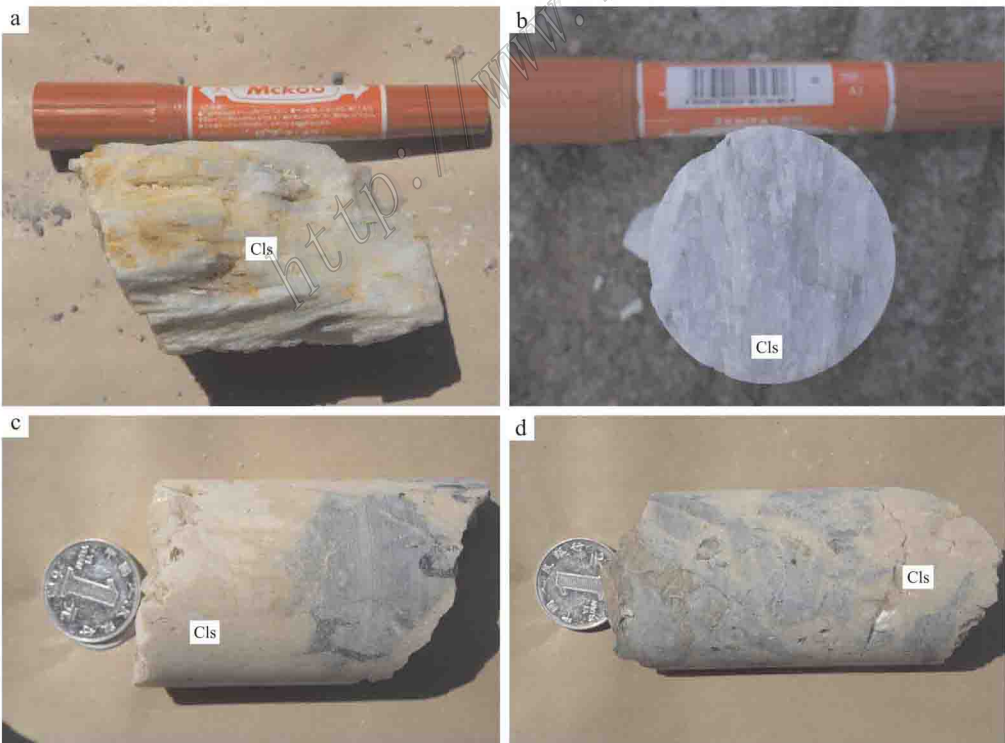


图 6 卧龙山矿床锑矿石主要结构、构造

a. 自形板状结构块状构造锶矿石; b. 块状构造锶矿石; c. 角砾状构造锶矿石; d. 网脉状构造锶矿石
Cls—天青石

Fig. 6 Main texture and structure of strontium ore in the Wolongshan deposit

a. Euhedral slate and massive strontium ore; b. Massive strontium ore; c. Breccform strontium ore; d. Stockwork strontium ore
Cls—Celestite

表 2 卧龙山矿床锶矿石全分析结果表

Table 2 Chemical characteristics of strontium ore in the Wolongshan deposit

样品编号	采样位置	w(B)/%										
		SrO	BaO	SO ₃	S	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	H ₂ O	H ₂ O ⁺	P ₂ O ₅
Q-1	Sr2 矿体 7 线	48.94	4.48	41.64	0.06	0.35	0.02	0.37	0.13	0.05	0.28	0.005
Q-2	Sr2 矿体 0 线	34.65	0.60	28.13	0	27.44	0	0.27	0.13	0.09	2.17	0
Q-3	ZK504 孔	48.61	4.01	40.23	0.18	0.62	0.13	0.30	0.12	0	0.15	0.008
Q-4	Sr2 南采坑	32.77	2.02	27.02	2.07	0.13	0.04	0.29	0.13	0.46	3.57	0.050
Q-5	ZK004 孔	29.25	2.48	26.49	17.47	9.98	1.29	1.69	0.26	0.40	1.92	0.100
Q-6	ZK004 孔	33.81	2.87	29.27	11.65	3.77	3.28	9.26	0.26	0.08	0.25	0.020

样品编号	采样位置	w(B)/%										
		Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Cu	Pb	Zn	Cl	Ni	Co
Q-1	Sr2 矿体 7 线	0.27	0.12	3.10	0.57	0.04	0.0040	0.0120	0.0120	0.0200	0	0
Q-2	Sr2 矿体 0 线	0.20	0.08	4.59	0.78	0.25	0.0040	0.0094	0.0690	0.0175	0	0.130
Q-3	ZK504 孔	0.20	0.12	5.63	0.12	0.06	0	0.0064	0.0082	0.0690	0.006	0
Q-4	Sr2 南采坑	0.67	1.10	10.33	12.96	0.05	0.0028	0.0220	0.0120	0.0010	0.006	0
Q-5	ZK004 孔	0.15	0.08	16.14	3.74	0	0.0050	0	0.0060	0	0.009	0.002
Q-6	ZK004 孔	0.15	0.04	5.09	0.88	0.88	0.0190	0.0140	0.0070	0	0.043	0.003

样品编号	采样位置	w(B)/%									
		Cr	As	U	F	Se	Te	TiO ₂	Au/10 ⁻⁶	Ag/10 ⁻⁶	烧失量
Q-1	Sr2 矿体 7 线	0.0046	0.0008	0	0.0003	0	0.0004	0	0.06	1.80	0
Q-2	Sr2 矿体 0 线	0.0006	0.0004	0	0.0004	0	0.0005	0	0.10	1.52	2.55
Q-3	ZK504 孔	0.0013	0.0005	0.0004	0.0002	0.0009	0.0007	0	0.06	1.02	0.23
Q-4	Sr2 南采坑	0.0009	0.0007	0	0.0003	0	0.0003	0	0.06	0.40	12.44
Q-5	ZK004 孔	0.0030	0.0030	0	0	0.0004	0	0.24	0.10	0.70	12.30
Q-6	ZK004 孔	0.0040	0	0	0	0	0	0.06	0.10	3.20	11.97

注: I、Bi、Mo、W、Be 的分析结果均为 0。

高,在微量元素蛛网图中,龙王山旋回的火山岩 Sr 正异常显著,而盆地内其他旋回火山岩则没有这一正异常(禹尧等,2009)。李超文等(2004)采集的溧水盆地龙王山旋回火山岩样品,其中的 $w(\text{Sr})$ 为 $791\times 10^{-6}\sim 1248\times 10^{-6}$,溧水盆地龙王山旋回次火山岩辉石闪长玢岩(安山玢岩)的 Sr 含量也较高, $w(\text{Sr})$ 平均 1000×10^{-6} (宗诚等,1986)和 4597×10^{-6} (张福祯,1997),均明显高于中国东部大陆地壳 Sr 丰度值 350×10^{-6} (迟清华等,2007)。而大王山旋回次火山岩(石英)粗安斑岩、姚家边旋回次火山岩霓石正长斑岩和甲山旋回次火山岩霏细斑岩 Sr 含量均较龙王山旋回次火山岩低, $w(\text{Sr})$ 平均值分别为 $(321\sim 600)\times 10^{-6}$ 、 300×10^{-6} 和 $(300\sim 350)\times 10^{-6}$ (宗诚等,1986),接近或略低于中国东部大陆地壳 Sr 丰

度值。
目前多数学者研究表明,龙王山旋回火山碎屑岩(朱根林等,1990;刘振红,1990;黄志良等,1994;窦志娟,2015)和次火山岩(窦志娟,2015)是溧水地区锶矿成矿源岩。所以认为溧水地区龙王山旋回火山-岩浆活动与矿区锶矿化关系密切。
4.2 构造与成矿关系
4.2.1 矿脉与构造规模、产状类比分析
卧龙山矿区锶矿脉与矿区构造在规模、产状等方面的对比分析(表 1),以及主矿脉在各地质剖面上的特征(图 3),表明矿区 NW 向断裂构造控制着矿区矿体的产状、规模及产出位置。现选取矿区主矿脉(Sr1 号脉)与矿区主控矿构造(Fn2 断裂)做详细的对比。

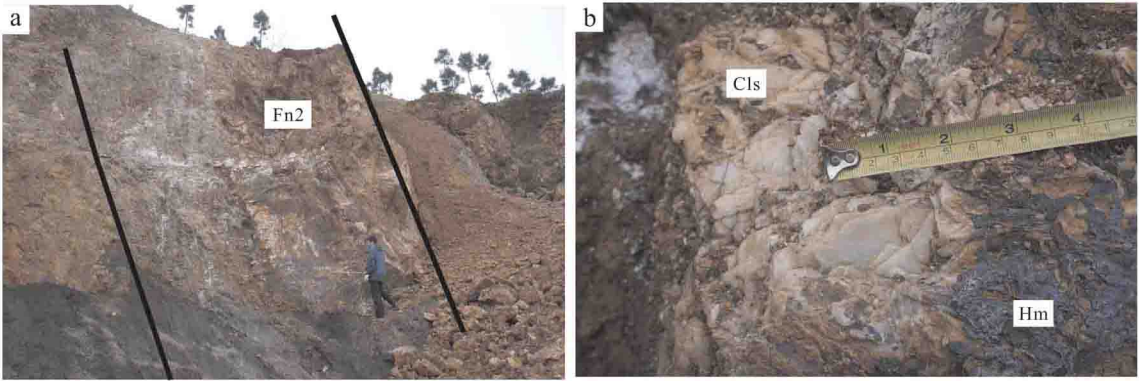


图 7 卧龙山矿区 Fn2 断裂野外照片(a)及 Fn2 断裂内天青石照片(b)
Cls—天青石; Hm—赤铁矿

Fig. 7 Photographs of Fn2 fracture(a) and celestite in Fn2 fracture (b) in the Wolongshan deposit
Cls—Celestite; Hm—Hematite

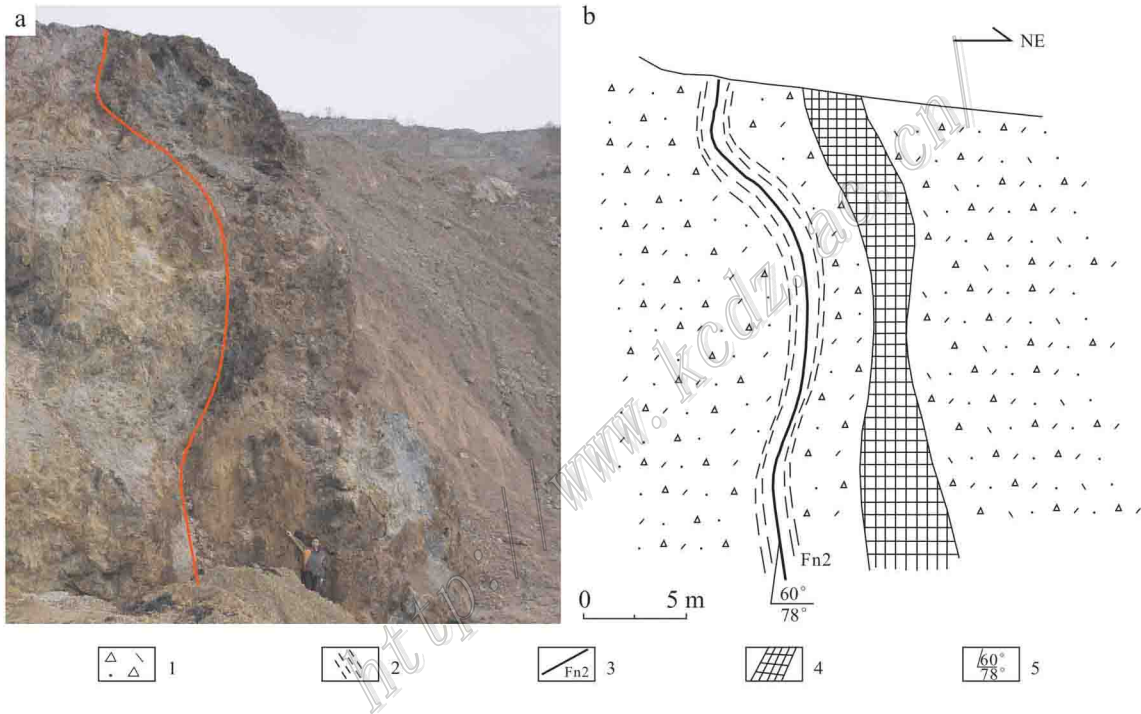


图 8 爱景山南坡 Fn2 野外照片(a)及其素描简图(b)
1—破碎带; 2—片理化带; 3—NW 向断裂; 4—矿体; 5—产状

Fig. 8 Field photograph (a) and sketch diagram(b) of Fn2 fault of Aijingshan south slope
1—Structural fractured belt; 2—Schistosity belt; 3—NW-tending structure; 4—Orebody; 5—Attitude

Fn2 断裂构造是矿区主控矿构造, 规模大, 呈 NW 向斜贯整个矿区, 地表出露总长约 5 km; 走向 320~330°, 局部 295~340°; 倾向北东; 倾角上陡下缓(上部平均倾角 82°, 下部平均倾角 65°), 局部地段直立或倒转(0 线), 在 27 线与 -1 线、31 线与 0 线、1 线与 2 线之间, 分别被 NE 向 F1、F2、F3 断裂右行错断。断裂沿走向方向, 在 2 线以东处膨大, 以西处收

窄; 沿倾向方向, 宽度变化不大, 以 0 线剖面为例, 由浅至深, 断裂带宽度依次为: 38 m(ZK003 孔)、47 m(ZK004 孔)、48 m(ZK002 孔)和 23 m(ZK001 孔)。断裂性质先张后压, 总体以张性为主(图 7), 局部地段具压性性质(图 8), 控制着 Sr1~Sr8 和 Sr11 号矿体, 控制的天青石矿物量占整个矿区天青石总矿物量的 78.29%。

Sr1 号矿体是矿区主矿体,赋存在矿区 27 线至 2 线之间,工程控制走向延长约 370 m,倾向最大延伸至 -310 m。总体走向 $320\sim 335^\circ$,倾向北东,倾角上陡下缓,总体 $65\sim 85^\circ$ 。平面形态呈狭长脉状,剖面形态以上宽下窄的楔形为主(图 3),矿体工程控制最大真厚度 5.98 m,最小真厚度 0.60 m,平均 1.79 m,于 Fn2 断裂膨大处膨大,收窄处尖灭,总体上呈现北西段厚南东段薄的趋势。同时经工程控制显示,该矿脉除规模、产状受 Fn2 断裂控制外,其空间产出位置亦严格受 Fn2 断裂的控制,在 31 线与 0 线、1 线与 2 线之间亦分别被 NE 向 F2、F3 断裂右行错断。

4.2.2 构造形成机制分析

通过对卧龙山矿床矿体特征的分析研究,明确了矿区 NW 向断裂构造是矿区主要控矿因素,亦是主要找矿标志。故分析矿区及其邻区 NW 向构造形成机制,梳理主干断裂与次级断裂的生成关系,可以有效的指导溧水盆地锑矿勘查工作。

晚三叠世南象运动以后,长江中下游地区结束了自古生代以来海侵-海退的历史,开始了强烈的板内变形和构造-岩浆活动的演化阶段(翟裕生等, 1992;周涛发等,2008;2012)。在燕山早亚旋回(I、II 幕)时期,长江中下游地区受到古太平洋板块向北西俯冲欧亚板块的影响,其构造主压应力方向为 NWW 向,在前侏罗纪地层分布区形成 NNE 向叠加褶皱,在侏罗纪地层区普遍发育大中型开阔纵弯褶皱,发育的 NNE 向断裂构造性质为左行压剪性逆断层,而 NWW 向-近 EW 向断裂构造性质则普遍为张性、张剪性正断层(翟裕生等,1992)。同属于长江中下游成矿带的溧水盆地当然也不例外,在燕山早亚旋回时期受到 NWW 向区域挤压应力作用,其最大主压应力方向为 $290\sim 305^\circ$,在此应力场作用下,形成了溧水盆地的边界断裂和 NE 向压性、NW 向张性的主干断裂(宗诚等,1986),其中控制着溧水盆地铁(铜)、锑成矿带的 NW 向开太-白马山断裂构造即形成于该时期。在燕山晚亚旋回(III、IV、V 幕)时期,长江中下游地区受到印度板块向北东方向的推挤作用影响,使得该区主压应力方向转变为 NNE 向(翟裕生等,1992),但该时期溧水盆地主压应力方向仍以 NWW 向为主,主压应力方向为 290° ,较早阶段逆时针偏转约 15° (宗诚等,1986),产生这种现象的原因为:溧水盆地地处长江中下游成矿带最东端,受古太平洋向北西俯冲欧亚板块的影响强烈,而受

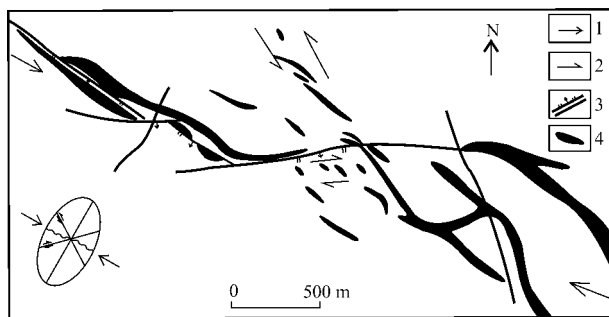


图 9 西北山正长斑岩脉群分布素描简图(引自宗诚等,1986)

1—主压应力方向; 2—扭动方向; 3—断层; 4—岩脉

Fig. 9 Sketch diagram of syenite porphyry dike swarm distribution in Xibeishan (after Zong et al., 1986)

1—Principal compressive stress direction; 2—Torsional direction; 3—Fault; 4—Dike rock

印度板块向北东挤压欧亚板块的影响较弱。溧水盆地南部西北山大王山期的正长斑岩脉的分布特征最好的反应了该时期溧水盆地应力场的力学性质(图 9)。如图 9 所示,西北山正长斑岩脉群的分布反映了追踪张裂构造的特征,脉带总体走向 NWW,反映主压应力方向,而主脉带两侧的 NNW 向左列和 NEE 向右列则反应主压应力方向两侧一对共轭的扭裂面。卧龙山矿区的控矿断裂构造即形成于该时期。在燕山 III~V 时期,溧水盆地还存在一个 NWW 向应力场所派生的 EW 向局部挤压应力场(宗诚等,1986),该应力场产生 SN 向褶皱和压性断裂,部分 EW 向张性断裂,尤以 SN 向构造为主,但此 EW 向应力场只在溧水盆地早白垩世的新建造区较发育,而在老建造区应力多沿老的破裂面释放,仅相应的改变其力学性质(宗诚等,1986)。该应力场在溧水盆地东南部表现较明显,西北部较弱,典型的地质现象是溧水盆地东南部呈 SN 向分布的朝山-官塘-东庐山-白马桥和杭村-尖山 3 条火山-岩浆活动带(图 1)。卧龙山矿区亦受到此应力场的制约,但影响较小,只是将个别规模较大的 NW 向断裂构造由张性局部转变为压性(如 Fn2)。同时,主干断裂派生的 NE 向右行正断层右行错断 NW 向断裂构造和矿脉。

现将矿区构造形成过程做简要梳理:控制着溧水盆地铁(铜)、锑成矿带的 NW 向开太-白马山主干断裂在燕山早亚旋回时期形成(宗诚等,1986),而从卧龙山矿区发育的与其锐角相交的 NW 向张性断裂构造和矿区外围爱景山北坡、卧龙山南坡、小东山等地所发育的近 EW 向压性断裂构造(图 1),说明开太-

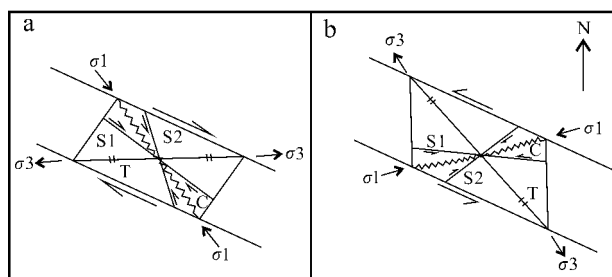


图 10 卧龙山矿区应力分析平面示意图

σ_1 —最大主应力; σ_3 —最小主应力; S1、S2—共轭扭裂面;

T—压应力面; C—张应力面

Fig. 10 Sketch diagram of stress analysis in the

Wolongshan deposit

σ_1 —Maximum principal stress; σ_3 —Minimum principal stress;

S1 & S2—Effective face of conjugate; T—Effective face of compression stress; C—Effective face of tensile stress

白马山主干断裂在其形成后发生了右行扭动。如图 10a 所示,呈 NW 走向的开太-白马山主干断裂右行扭动,在其最大主应力方向派生 NW 向张性断裂构造,在其最小主应力方向派生近 EW 向压性断裂构造。由于岩性差异及内摩擦角的影响,故所派生的 NW 向张性断裂与开太-白马山主干断裂的交角小于理论值(45°),所以矿区的 NW 向断裂构造总体走向 $320 \sim 335^\circ$ 。而后区域 NWW 向应力场所派生的 EW 向局部挤压应力场(宗诚等, 1986)叠加于卧龙山矿区,使得开太-白马山主干断裂左行扭动,其地质证据有:矿区原有的 NW 向张性断裂构造局部表现为压性特征,如 Fn2 断裂构造整体以张性构造为主(图 7),而在爱景山南坡则表现为压性特征(图 8);同时,矿区 NE 向右行正断层发育。如图 10b 所示,开太-白马山主干断裂由早期的右行扭动转变为左行扭动后,其最大主应力方向和最小主应力方向调换,使早期的 NW 向张性破裂面转变为压性破裂面,早期的近 EW 向压性破裂面转变为张性破裂面,但由于矿区早期的 NW 向张性破裂面发育(Fn1 ~ Fn11, 共计 11 条),所以左行扭动产生的应力多沿 NW 向破裂面释放,从而造成了矿区 NW 向控矿断裂构造以张性为主,局部表现压性的特征;而矿区内早期的近 EW 向压性破裂面不发育,仅在矿区外围爱景山北坡、卧龙山南坡和小东山等地见到,所以左行扭动后产生的 NE 向张性破裂面在矿区较发育(F1 ~ F15, 共计 15 条),为右行正断层,错断早期 NW 向断裂和矿体(图 2)。

5 找矿方向

通过对矿区主干断裂及控矿断裂的分析,同时结合锑矿化与龙王山旋回火山-岩浆活动关系密切的特征,推测溧水地区锑矿化发生于燕山 III ~ IV 幕运动期,受开太-白马山主干断裂先右行后左行运动的控制。

笔者认为开太-白马山主干断裂是溧水地区锑矿导矿构造,与断裂带内龙王山期岩浆岩共同制约着溧水地区锑矿床(田)的空间分布;其右行扭动派生的 NW 向张性断裂是控矿构造,控制着矿区锑矿体的空间分布。

开太-白马山断裂北西起自开太镇,经爱景山、丰安寺至白马山一带,全长约 37 km,且断裂带内龙王山旋回火山-岩浆活动强烈。根据力学性质分析可知,开太-白马山断裂右行扭动可产生一组(多条)近平行的 NW 向张性断裂构造,故溧水地区今后锑矿勘查工作应沿开太-白马山断裂展开,重点找寻其在右行扭动时期派生的 NW 张性断裂构造。

References

- Chang Y F, Liu X P and Wu C Y. 1991. Iron-Copper minerogenic belt along Middle-lower reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House. 379p (in Chinese).
- Chen D, Hu S L, Zhang Z Y, Zhang L Y, Sun Q Z. 2014a. On ore-control factors and prospecting orientation of Jingjushan Au-poly-metallic deposit in Lishui of Jiangsu[J]. Journal of Geology, 38 (1): 110-116 (in Chinese with English abstract).
- Chen D, Xia M F, Hu F P and Li S Q. 2014b. The general investigation of Sr-deposit in Wolongshan- Donglushan-Shuangjianshan, Lishui district, Nanjing City, Jiangsu Province[R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province. Unpublished Report. 145p(in Chinese).
- Chen Z H, Xie G F, Guo K Y, Zeng Y, Kuang F X, He X Y, Ke M, Yu M G, Zhao X L and Zhang Y. 2011. Zircon U-Pb age of ore-bearing granitic bodies in northern Jiujiang-Ruichang metallogenic district of the mineralization belt of the Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 85(7): 1146-1158 (in Chinese with English abstract).
- Chi Q H and Yan M C. 2007. The date manual of element abundance on applied geochemisemy[M]. Beijing: Geological Publishing House. 148p (in Chinese).
- Dou Z J. 2015. Relationship studies of volcanic activity and strontium

- Mineralization of Lishui volcano-tectonic depression (dissertation for master degree)[D]. Supervisor: Yang Z L. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. 103p(in Chinese with English abstract).
- Gao X F, Guo F, Li C W and Cai G Q. 2007. The genesis of two types of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin, Lower Yangtze Valley[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1):1-13 (in Chinese with English abstract).
- Huang Z L, Cui N F, Leng S Q and Yang Y L. 1994. Geochemistry and origin of the Lishui strontium deposit [J]. *Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology*, 16(4):233-236 (in Chinese with English abstract).
- Li C W, Guo F and Li X Y. 2004. Petrogenesis and geodynamic implication of Late Mesozoic mafic volcanic rocks from the Lishui Basin of the Lower Yangtze region [J]. *Geochimica*, 33(4):361-371 (in Chinese with English abstract).
- Liang Y H, Sun X M, Zhai W, Ma C, Wu Z Q, Ding C G, Wang T X, Li A J and Liang J L. 2008. Geochemistry of ore-forming fluids and genesis of Guanshan Cu-Pb-Au polymetallic deposit in Jiangsu Province[J]. *Mineral Deposits*, 27(5):605-612 (in Chinese with English abstract).
- Liang Y H, Sun X M, Zhai W, Ma C, Wu Z Q, Ding C G and Wang T X. 2010. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Guanshan high-sulphidation type Cu-Pb-Au deposit in Jiangsu Province and its geological significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(2):143-149 (in Chinese with English abstract).
- Liang Y H, Sun X M, Zhai W, Ma C, Wu Z Q, Ding C G and Wang T X. 2010. S table isotopic geochemistry and genesis of the Guanshan high-sulphidation type Cu-Pb-Au deposit in Jiangsu Province[J]. *Geology and Exploration*, 46(4):698-704 (in Chinese with English abstract).
- Liu J and Peng F. 1991. A study on the volcanic rock of the Guanshan Cycle of Lishui volcanic basin in Jiangsu Province[J]. *Journal of Kunming Institute of Thechnology*, 16(1):12-20 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z H and Yin Y D. 1993. On the reasonable exploration network of Aijingshan Sr deposits in Lishui of Jiangsu[J]. *Jiangsu Geology*, 17(1):39-42 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z H. 1990. Characteristics and metallogenesis of strontium deposit in the Middle and Lower Yangtze reaca[J]. *Jiangsu Geology*, 1(2):31-34(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Duan C, Liu J L and Zhang C. 2012. Metallogeny and corresponding mineral deposit model of the Cretaceous terrestrial volcanic-intrusive rocks-related polymetallic iron deposits in Middle-Lower Yangtza River valley[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1):1-14 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Shao Y J, Xie G Q, Zhang J D and Chen Y C. 2009. Mineral deposit model for porphyry-skarn polymetallic copper deposits in Tongling ore dense districe of Middle-Lower Yangtza valley metallogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 28(2):109-119 (in Chinese with English abstract).
- Pan W Q, Xia M F, Zhang S Q, Jiang X and E J. 2013. The detailed investigation of deep Sr-deposit in Aijingshan, Lishui county, Jiangsu Province[R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province. Unpublished Report. 116p(in Chinese).
- Wang L J, Huang J P, Yu J H, Griffin W L, Wang R C, Zhang S Q and Yang Y H. 2014. Zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope study of intermediate-mafic sub-volcanic and intrusive rocks in the Lishui Basin in the Middle-Lower reaches of Yangtze River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 59(14):1305-1317 (in Chinese with English abstract).
- Wang L J, Yang, Y H, Zhang S Q and Wei B S. 2015. Study on the relationship of tectonic-magmatic evolution and mineralization in Ningwu-Lishui basin, Jiangsu Province[R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province. 237p(in Chinese).
- Yu Y and Xu X S. 2009. Cretaceous Alkali-rich magmatism in the Middle and Lower reaches of the Yangtze Rive[J]. *Earth Science*, 34(1):105-116(in Chinese with English abstract).
- Zhai Y S, Yao S Z, Lin X D, Zhou X R, Wang T F, Jin F Q and Zhou Z G. 1992. Metallogenic regularity of Iron-Copper(Gold) deposits along Middle-lower reaches of the Yangtze River[M]. Beijing: Geological Publishing House. 235p (in Chinese).
- Zhang F Z. 1996. Rationality of exploration network of strontium deposit in Aijingshan of Lishui, Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Geology*, 20(4):233-236 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F Z. 1997. Aijingshan strontium deposit in Lishui, Jiangsu: A multi-parameter ore-hunting mode [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 19(3): 193-196(in Chinese with English abstract).
- Zhang S Q, Wang L J and Yang Y H. 2015. Geochronology and geochemistry of volcanic rock in the Lishui basin in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River and its geological implications[J]. *Geological Journal of China Universities*, 21(1):15-30(in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F, Zhang L J, Ma L, Qian B and Xie J. 2011. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the Middle-Lower Yangtze metallogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5):713-730 (in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Fan Y, Yuan F and Zhong G X. 2012. Progress of geological study in the Middle-Lower Yangtze river valley metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10):3051-3066 (in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Fan Y and Yuan F. 2008. Advances on petrogenesis and metallogeny study of the mineralization belt of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8):1665-1678 (in Chinese with English abstract).
- Zhu G L, Yin Y D and Liu Z H. 1990. Geology and prospecting of strontium deposit in Lishui district[J]. *Jiangsu Geology*, 1(4):27-32(in Chinese with English abstract).

Zong C, Hong Z Y and Tang Z. 1986. Report of 1:50000 regional geological survey in Lishui, Jiangsu Province[R]. Changzhou: 2th Batch Team of Jiangsu Geological Exploration Bureau. 486p(in Chinese).

附中文参考文献

常印佛, 刘湘培, 吴昌言. 1991. 长江中下游地区铜铁成矿带[M]. 北京: 地质出版社. 379 页.

陈冬, 胡森林, 张珍玉, 张利亚, 孙清钟. 2014a. 江苏溧水金驹山金多金属矿的控矿因素及找矿方向[J]. 地质学报, 38(1): 110-116.

陈冬, 夏明飞, 胡福培, 李四清. 2014b. 江苏省南京市溧水区卧龙山-东芦山-双尖山锑矿普查报告[R]. 南京: 江苏省地质调查研究院. 内部报告. 145 页.

陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 曾勇, 匡福祥, 贺振宇, 柯学, 余明刚, 赵希林, 张勇. 2011. 长江中下游成矿带九瑞矿集区(北部)含矿岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 85(7): 1146-1158.

迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社. 148 页.

窦志娟. 2015. 溧水火山构造洼地火山活动及与锑成矿作用关系研究(硕士论文)[D]. 导师: 杨祝良. 北京: 中国地质科学院. 103 页.

高晓峰, 郭峰, 李超文, 蔡观强. 2007. 溧水盆地两类晚中生代中酸性火山岩的岩石成因[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 1-13.

黄志良, 崔南方, 冷盛强, 岳岳龙. 1994. 溧水锑矿成矿地球化学及矿床成因研究[J]. 武汉华工学院学报, 16(4): 60-65.

李超文, 郭峰, 李晓勇. 2004. 溧水盆地晚中生代基性火山岩成因与深部动力学过程探讨[J]. 地球化学, 33(4): 361-371.

梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 马春, 吴志强, 丁存根, 王堂喜, 李爱菊, 梁金龙. 2008. 江苏观山铜铅金矿床成矿流体地球化学和成因[J]. 矿床地质, 27(5): 605-612.

梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 马春, 吴志强, 丁存根, 王堂喜. 2010a. 江苏观山高硫型铜铅金矿床稳定同位素地球化学和成因意义[J]. 地质与勘探, 46(4): 698-704.

梁业恒, 孙晓明, 翟伟, 马春, 吴志强, 丁存根, 王堂喜. 2010b. 江苏溧水观山高硫型铜铅金矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年及其地质意义[J]. 高校地质学报, 16(2): 143-149.

刘俊, 彭芳. 1991. 江苏溧水火山岩盆地观山旋回岩石学特征[J]. 昆明工学院学报, 16(1): 12-20.

刘振红. 1990. 苏南锑矿成矿作用讨论[J]. 江苏地质, 1(2): 31-34.

刘振红, 殷友东. 1993. 浅谈爱景山锑矿的合理勘探网度[J]. 江苏地质, 17(1): 39-42.

毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 张建东, 陈毓川. 2009. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 28(2): 109-119.

毛景文, 段超, 刘佳林, 张成. 2012. 陆相火山-侵入岩有关的铁多金属矿成矿作用及矿床模型——以长江中下游为例[J]. 岩石学报, 28(1): 1-14.

潘万乾, 夏明飞, 张少琴, 姜辛, 鄂健. 2013. 江苏省溧水县爱景山锑矿深部详查报告[R]. 南京: 江苏省地质调查研究院. 内部报告. 138 页.

王丽娟, 黄建平, 于津海, Griffin W L, 王汝成, 张少琴, 杨影鹤. 2014. 长江中下游溧水盆地中基性次火山岩-侵入岩的锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素[J]. 科学通报, 59(14): 1305-1317.

王丽娟, 杨颖鹤, 张少琴, 魏邦顺. 2015. 江苏省宁芜溧水火山岩盆地岩浆构造演化与成矿作用关系研究报告[R]. 南京: 江苏省地质调查研究院. 237 页.

禹尧, 徐夕生. 2009. 长江中下游地区白垩纪富碱火山岩浆作用[J]. 地球科学, 34(1): 105-116.

翟裕生, 姚书振, 林新多, 周珣若, 万天丰, 金福全, 周宗贵. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律[M]. 北京: 地质出版社. 235 页.

张福祯. 1996. 论江苏溧水爱景山锑矿床勘探网度的合理性[J]. 江苏地质, 20(4): 233-236.

张福祯. 1997. 江苏溧水爱景山锑矿综合技术方法找矿模型[J]. 化工矿产地质, 19(3): 193-196.

张少琴, 王丽娟, 杨颖鹤. 2015. 长江中下游溧水盆地火山岩的时代、地球化学特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 21(1): 15-30.

周涛发, 范裕, 袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展[J]. 岩石学报, 24(8): 1665-1678.

周涛发, 范裕, 袁峰, 张乐骏, 马良, 钱兵, 谢杰. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用[J]. 地质学报, 85(5): 713-730.

周涛发, 范裕, 袁峰, 钟国雄. 2012. 长江中下游成矿带地质与矿产研究进展[J]. 岩石学报, 28(10): 3051-3066.

朱根林, 殷友东, 刘振红. 1990. 溧水地区锑矿地质特征及找矿方向[J]. 江苏地质, 1(4): 27-32.

宗诚, 洪志渊, 唐震. 1986. 江苏省溧水地区 1:5 万区域地质调查报告[R]. 常州: 江苏省省地质矿产局第二地质大队. 486 页.