



引文格式: 吕宏伟, 徐磊, 徐晓明, 等. 陕西省丹凤县庾岭锑矿的发现及找矿意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 339-353. DOI: 10.12401/j.nwg.2025064

Citation: LYU Hongwei, XU Lei, XU Xiaoming, et al. The Discovery of Antimony Deposit in Yuling, Danfeng County, Shaanxi Province and Its Prospecting Significance[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 339-353. DOI: 10.12401/j.nwg.2025064

陕西省丹凤县庾岭锑矿的发现及找矿意义

吕宏伟¹, 徐磊¹, 徐晓明², 柳坤峰^{1,*}, 彭岩¹, 王璐¹

(1. 中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710100; 2. 江西省煤田地质勘察研究院, 江西南昌 330006)

摘要: 新发现的丹凤县庾岭锑矿位于北秦岭复合岛弧杂岩带之东部, 成矿区划为北秦岭 Au-Cu-Mo-Sb-石墨-蓝晶石-红柱石-金红石成矿带。矿体赋存于中元古界峡河岩群寨根岩组中, 圈定锑矿体 4 条, 初步估算锑潜在资源约为 8000 t。矿石中 useful 矿物主要为辉锑矿、黄锑矿。矿石结构主要为自形、半自形, 矿石构造类型为星散浸染状构造, 少量呈条带状构造。该发现增加了该区锑矿床数量, 也为在该区进一步寻找锑矿补充了矿床实例。笔者在对成矿地质背景、矿床地质特征、矿石质量特征及矿石类型研究的基础上, 对矿床成因进行了初步探讨并归纳总结区域找矿标志。辉锑矿微量元素中 Sb、W 较为富集, 稀土元素分配曲线表现为轻稀土元素富集重稀土元素亏损的右倾曲线。辉锑矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.20‰ ~ 7.12‰, Pb 同位素组成较稳定, 变化范围较小, 比值比较均一。研究表明, 庾岭锑矿可分为石英-辉锑矿型、石英-辉锑矿-方解石型两种矿石类型, 是构造-热液再造型锑矿床, 成矿作用受到上地壳岩浆活动以及构造活动、变质变形作用的控制, 成矿物质来源于上地壳岩浆热液与早期沉积地层。找矿标志具有特定层位、岩性、构造、岩浆岩及围岩蚀变特征。

关键词: 锑矿; 地质特征; 矿床成因; 找矿标志; 庾岭

中图分类号: P611

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)04-0339-15

The Discovery of Antimony Deposit in Yuling, Danfeng County, Shaanxi Province and Its Prospecting Significance

LYU Hongwei¹, XU Lei¹, XU Xiaoming², LIU Kunfeng^{1,*}, PENG Yan¹, WANG Lu¹

(1. Sino Shaanxi Nuclear Industry Group Geological Survey Co, Ltd, Xi'an 710100, Shaanxi, China; 2. Jiangxi Provincial Coal Geological Exploration and Research Institute, Nanchang 330006, Jiangxi, China)

Abstract: The newly discovered Yuling antimony deposit in Danfeng County is located in the eastern part of the North Qinling Composite Island Arc Complex. The mineralization area is classified as the North Qinling Au-Cu-Mo-Sb-Graphite-Kyanite-Sillimanite-Rutile mineralization belt. The ore body is hosted in the Zhai Gen For-

收稿日期: 2025-04-16; 修回日期: 2025-05-20; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 陕西省 2023 年地质勘查基金项目“陕西省丹凤县回头山晶质石墨矿普查”(61201707328), 中陕核地调院科研项目“北秦岭蟒岭南部锑多金属成矿条件及选区研究”(91612023004)联合资助。

作者简介: 吕宏伟(1982-), 男, 工程师, 主要从事地质矿产勘查与成矿规律研究工作。E-mail: 3281496052@qq.com。

* 通讯作者: 柳坤峰(1990-), 男, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查、区域地球化学普查等工作。E-mail: 739885185@qq.com。

mation of the Xiahe Rock Group of the Mesoproterozoic. Four antimony ore bodies have been delineated, and the estimated potential antimony resources are approximately 8 000 tons. The useful minerals in the ore are mainly stibnite and hauerite. The ore structure is mainly euhedral and subhedral, and the ore texture type is disseminated and disseminated in a starry pattern, with a small amount of banded texture. This discovery has increased the number of antimony deposits in this area and provided an additional example for further exploration of antimony deposits in this area. Based on the study of the geological background of mineralization, geological characteristics of the deposit, quality characteristics of the ore, and types of ore, the author has made a preliminary discussion on the genesis of the deposit and summarized the regional exploration indicators. The trace elements in stibnite are relatively enriched in Sb and W, and the rare earth element distribution curve shows a right-inclined curve with enrichment of light rare earth elements and depletion of heavy rare earth elements. The $\delta^{34}\text{S}$ value of stibnite is between 5.20‰ and 7.12‰, and the lead isotope composition is relatively stable with a small range of variation and relatively uniform ratios. The research shows that the Yuling antimony deposit can be divided into two ore types: quartz-stibnite type and quartz-stibnite-calcite type. It is a tectonic-hydrothermal remobilization type antimony deposit, and the mineralization is controlled by magmatic activity in the upper crust, tectonic activity, and metamorphic deformation. The ore-forming materials are derived from magmatic hydrothermal fluids in the upper crust and early sedimentary strata. The exploration indicators have specific stratigraphic, lithologic, structural, magmatic rock, and wall rock alteration characteristics.

Keywords: antimony deposit; geological characteristics; deposit genesis; prospecting mark; Yuling

锑矿是中国传统优势矿种,已被列入24种关键矿产之一(毛景文等,2019;王登红,2019)。作为一种不可再生的稀缺矿产资源,锑在国民经济、国防军工和日常生活中发挥重要作用(王淑玲,2009;周艳晶等,2014;董延涛等,2020)。陕西省锑矿以商南-丹凤断裂为界,南带集中分布在下泥盆统公馆组白云岩中(张颖等,2010;王强等,2019;向舜,2020;孟浩,2020;马渊博,2021;唐明锋,2021),北带则集中分布于朱阳关-夏馆断裂带(商洛境内称为“蔡川断裂”)(张拴厚等,2013)。北带属于陕豫锑成矿带的西段,该带西起陕西商州市看山寺-高岭沟一带,东至河南卢氏县朱阳关一带,东西延伸百余千米。

研究区位于北秦岭复合岛弧杂岩带之东部,成矿区划为北秦岭Au-Cu-Mo-Sb-石墨-蓝晶石-红柱石-金红石成矿带,属于陕豫锑成矿带西段。该带内目前已发现较多锑矿床(点),包括看山寺金锑矿(张勇等,2022;胡兴旺等,2022)、高岭沟锑矿(王绪现,1985;中国自然资源报,2024)、蔡凹锑矿(高菊生,1999;范红科等,2015)、掌耳沟锑矿(刘保申,1985;伏雄等,2012)等中型矿床和数十个小型锑矿点(范红科等,2015)。中陕核工业集团地质调查院有限公司承担的“陕西省丹凤县回头山晶质石墨矿普查”项目在北秦岭东部庾岭地区新发现了庾岭锑矿床,为在该区进一步寻找锑矿补充了矿床实例。笔者立足庾岭锑矿野外地质特征,在对成矿地质背景、矿体特征、矿石质量特

征及矿石类型研究的基础上,通过与区域典型锑矿床开展综合对比研究,对找矿标志进行总结,进行初步探讨了矿床成因。该研究成果对区域找矿突破、成矿规律总结及预测都起到至关重要的作用。

1 区域成矿地质背景

庾岭锑矿床位于丹凤县北东约40 km处。大地构造位置属北秦岭复合岛弧杂岩带之东部,南界以区域商丹大断裂与商丹蛇绿构造混杂岩带分隔,北界发育高岭沟-双槐树大断裂,与宽坪中元古界裂谷相隔,区域主要褶皱为张河-留仙坪-界岭背斜(图1)。

地层分区属秦祁昆地层区祁连-北秦岭地层分区之太白山地层小区。该区域岩浆活动频繁,北部主要为蟒岭二长花岗岩岩体,中部有蔡川石英闪长岩岩体,南部有庾岭二长花岗岩岩体和少量脉岩。锑矿床(点)沿区域性高岭沟-双槐树大断裂分布,矿体产于大断裂旁侧的次级构造带内,展布方向与区域构造线的展布方向基本一致,具有较好的成矿地质条件,是“构造-热液再造型锑矿床”有利成矿带。

2 矿区地质特征

庾岭锑矿床分为西沟矿段和南沟矿段(图2),二者呈NW-SE向展布,且赋矿围岩均为寨根岩组。

夹极少量斜长角闪岩,大理岩中可见石墨大理岩及石墨片麻岩夹层发育。寨根岩组 b 岩段(Pt_2z^b)变质程度达低角闪岩相,是锑矿的主要赋矿层位,也是区内重要的石墨矿含矿层位,具有一定的找矿潜力。

2.2 构造

研究区处于强应变构造环境,经历了多期次构造叠加,形变复杂强烈。岩石面貌大多改观,早期构造多被新的叠加构造所替代。本区多期构造的主体轴线方向基本保持一致,呈近 EW 向及 NWW 向。总体区内地质构造较为复杂,褶皱变形强烈,研究区处于区域张河-留仙坪-界岭背斜西部北翼。研究区内断裂构造发育,主要为小宽坪-双槐树区域大断裂带(F_1)和庾家河-会仙台断裂(F_3)及其次级小断裂构造。其中,庾家河-会仙台断裂(F_3)在南沟派生出 3 条近 EW 向平行的次级断裂,次级断裂的规模不大,长度约为 0.3~1 km,宽度为 1 m~几十米不等,沿断层带硅化、褐铁矿化强烈,局部锑矿化发育,南沟锑矿化与该断裂带及其次级断裂关系密切。

2.3 侵入岩

研究区内侵入岩分布广泛,主要为泥盆纪花岗岩($n\gamma D_1$)自西向东均见断续出露,占研究区面积的 38%,岩体总体呈 NW-SW 向展布,局部呈近 EW 向展布,主要侵入于雁岭沟岩组中,岩性为灰白色不等粒二长花岗岩。西沟内岩浆岩主要出露为奥陶纪蔡川石英闪长岩岩体(δO_3^3),主体呈 NW 向的条带状,分布于小宽坪-双槐树断裂带北侧或次级断裂带中,出露面积约为 0.02 km²。研究区内石英闪长岩往南西尖灭于五里川组(T_3wl)岩屑长石变砂岩中,往北东出矿区北侧边界。岩体北西侧岩性为五里川组(T_3wl)岩屑长石变砂岩,南东侧岩性为五里川组(T_3wl)岩屑长石变砂岩、炭质板岩和寨根岩组 b 岩段(Pt_2z^b)云母石英片岩。该

岩体与围岩呈断层接触关系。

3 矿床特征

3.1 矿体地质特征

矿体赋存于中元古界峡河岩群寨根岩组 b 岩段(Pt_2z^b)之中,庾岭锑矿区共圈定锑矿体 4 条。其中,西沟矿段圈定 1 条(编号 I-1),南沟矿段圈定 3 条(编号 II-1、III-1、IV-1)(表 1)。

3.1.1 西沟锑矿段

分布在研究区北西部,位于 11~04 勘探线,矿体呈波状、似层状近 NE-SW 向展布(图 3a)。矿体产状为 $340^\circ\sim 350^\circ\angle 54^\circ\sim 60^\circ$,地表由 2 个槽探工程和 2 个钻探工程控制,工程间距为 56~126 m,矿体长为 170 m,赋存标高为 1234~1400 m,矿体出露标高为 1316~1400 m。沿倾向控制斜深为 104~110 m。矿体厚度为 1.28~4.43 m,平均厚度为 2.71 m。单样 Sb 品位为 0.53%~3.33%,平均为 1.75%。单工程 Sb 品位 0.53%~2.21%,平均品位为 1.58%。

3.1.2 南沟锑矿段

南沟锑矿段分布在研究区中东部,共圈定 3 条锑矿体,编号分别为 II-1、III-1、IV-1 号锑矿体。

II-1 号锑矿体:位于 23~11 勘探线,矿体呈波状、似层状近 NE-SW 向展布。矿体产状为 $15^\circ\sim 28^\circ\angle 72^\circ\sim 77^\circ$,地表由 3 个槽探工程和 2 个钻探工程控制,工程间距为 110~140 m,矿体长为 120 m,赋存标高为 1083~1152 m,矿体出露标高为 1110~1152 m。沿倾向控制斜深为 64~66 m。矿体厚度为 2.20~2.61 m,平均厚度为 2.41 m。单样 Sb 品位 0.75%~4.20%,平均为 1.78%。单工程 Sb 品位一般为 1.18%~2.30%,平均品位为 1.74%。

表 1 庾岭锑矿体形态、规模、产状一览表

Tab. 1 List of the form, scale and occurrence of Yuling antimony deposit

矿体 编号	规模(m)		锑品位 (%)	赋矿岩性	矿体 形态	产状	工程个数(个)	
	长度	真厚度					槽探	钻探
I-1	170	1.28~4.43	0.53~2.21	深灰色硅质大理岩	波状、 似层状	$340^\circ\sim 350^\circ$ $\angle 54^\circ\sim 60^\circ$	2	2
II-1	120	2.20~2.61	1.18~2.30	深灰色硅质大理岩	似层状	$15^\circ\sim 28^\circ$ $\angle 72^\circ\sim 77^\circ$	3	2
III-1	300	1.82~3.26	0.79~2.23	深灰色硅质大理岩	缓波状、 似层状	$15^\circ\sim 30^\circ$ $\angle 62^\circ\sim 77^\circ$	5	3
IV-1	60	0.82~2.86	0.73~1.65	深灰色硅质大理岩	波状、 似层状	$10^\circ\sim 14^\circ$ $\angle 47^\circ\sim 60^\circ$	2	1

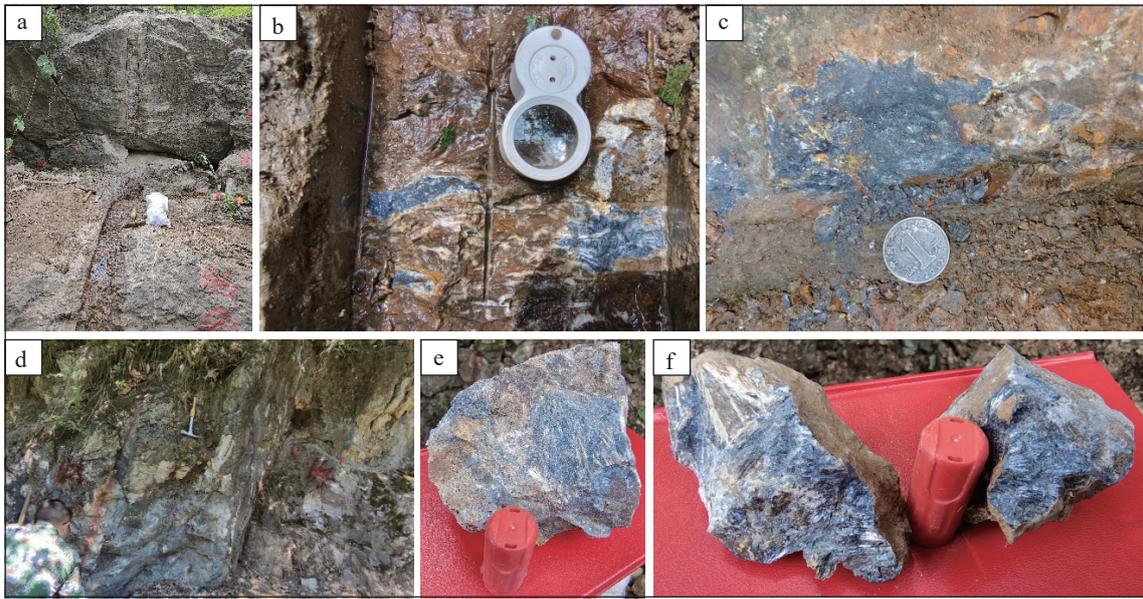


图3 锑矿体宏观特征及矿石矿物特征

Fig. 3 Macroscopic characteristics of antimony ore bodies and characteristics of ore minerals

Ⅲ-1号锑矿体:位于15~14勘探线,矿体呈缓波状、似层状近NW-SE向展布(图3d)。矿体产状为 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}\angle 62^{\circ}\sim 77^{\circ}$,地表由5个槽探工程和3个钻探工程控制,工程间距为50~160 m,矿体长为300 m,赋存标高为1096~1250 m,矿体出露标高为1122~1250 m。沿倾向控制斜深为50~110 m。矿体厚度为1.82~3.26 m,平均厚度为2.60 m。单样Sb品位为0.50%~3.27%,平均为1.20%。单工程Sb品位为0.79%~2.23%,平均品位为1.26%。

Ⅳ-1号锑矿体:位于01~06勘探线,矿体呈波状、似层状近NE-SW向展布(图4)。矿体产状为 $10^{\circ}\sim 14^{\circ}\angle 47^{\circ}\sim 60^{\circ}$,地表由2个槽探工程和1个钻探工程控制,工程间距为45~80 m,矿体长为60 m,赋存标高为1066~1142 m,矿体出露标高为1124~1142 m。沿倾向控制斜深为75 m。矿体厚度为0.82~2.86 m,平均厚度为1.90 m。单样Sb品位为0.73%~1.77%,平均为1.46%。单工程Sb品位0.73%~1.65%,平均品位为1.30%。

3.2 矿石质量特征

3.2.1 矿石矿物组成

矿石中的金属矿物成分比较复杂,有用矿物主要为辉锑矿(图3b、图3c、图3e、图3f)、黄锑矿,含量占矿物总含量的1%~2%;杂质矿物有黄铁矿、毒砂、褐铁矿,少量针铁矿;脉石矿物主要有石英、方解石。

辉锑矿:呈半自形晶柱状、他形粒状、填隙脉状,柱粒状者粒径一般为 $0.005\text{ mm}\times 0.010\text{ mm}\sim 1.95\text{ mm}\times$

2.37 mm ,填隙脉状者粒径巨大,延出视域外,反射率约为30%~40%,白-浅灰白多色性显著,聚片双晶发育(图4a),蓝-黄粉-褐强非均质性,主要呈网脉状沿岩石裂隙分布,少量呈填隙状分布于脉石矿物粒间。

黄锑矿:沿辉锑矿边缘和裂隙进行交代,反射率约为5%~10%,反射色灰色,内反射黄白色;锑华交代辉锑矿呈辉锑矿假象存在,沿岩石微裂隙分布,反射率约为16%,内反射白色(图4b)。

黄铁矿:呈自形、半自形三角形、方形粒状、他形粒状,粒径一般为 $0.005\text{ mm}\times 0.005\text{ mm}\sim 0.35\text{ mm}\times 0.50\text{ mm}$,蚀变弱,主要呈网脉状分布于角砾间的填隙物中(图4c),少量沿微裂隙呈脉状分布,少量散乱分布于脉石粒间。

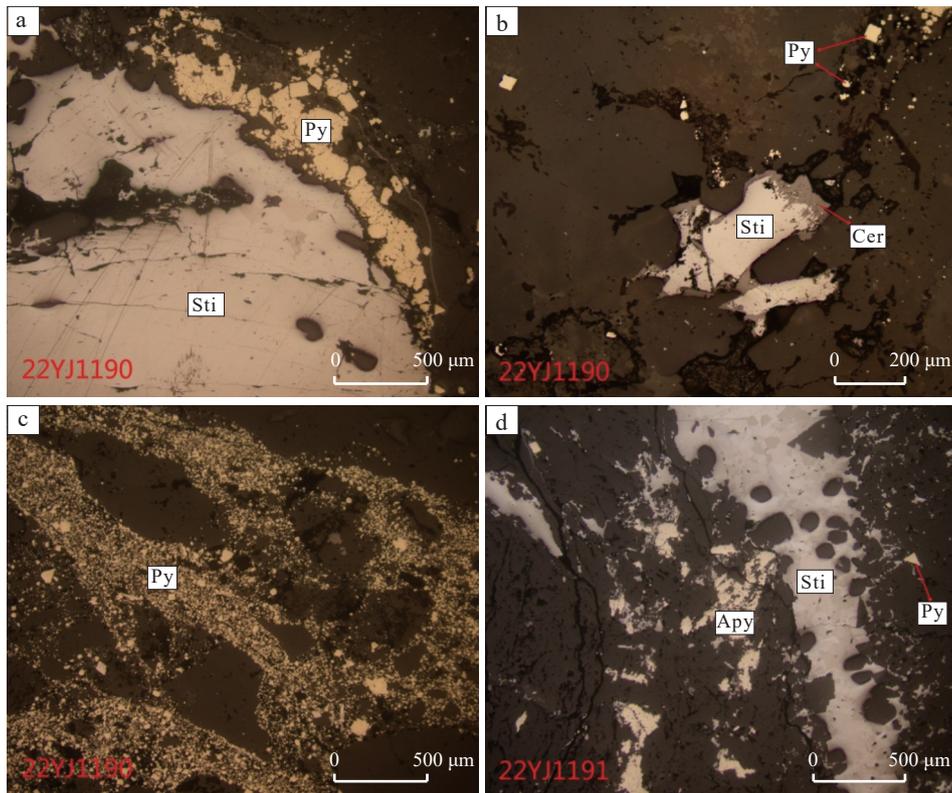
毒砂:呈自形、半自形菱形、矛头状、长柱状、他形粒状,粒径一般为 $0.01\text{ mm}\times 0.02\text{ mm}\sim 0.17\text{ mm}\times 0.44\text{ mm}$,与黄铁矿紧密分布在一起(图4d)。

3.2.2 矿石结构构造

(1)矿石结构:按矿石中矿物的结晶程度、矿物形态及嵌布关系,将矿石结构分为主要为自形、半自形、他形柱状、粒状结构。

(2)矿石构造:区内锑矿石常见的构造类型为星散浸染状构造,少量呈条带状构造。

星散浸染状构造:主要指辉锑矿沿裂隙呈星散浸染状分布(图5a)。条带状构造:主要指辉锑矿沿裂隙呈长条状分布(图5b)。



Sti. 辉锑矿; Cer. 黄锑矿; Py. 黄铁矿; Apy. 毒砂

图4 显微镜下矿石矿物特征

Fig. 4 Mineral characteristics of ore under microscope

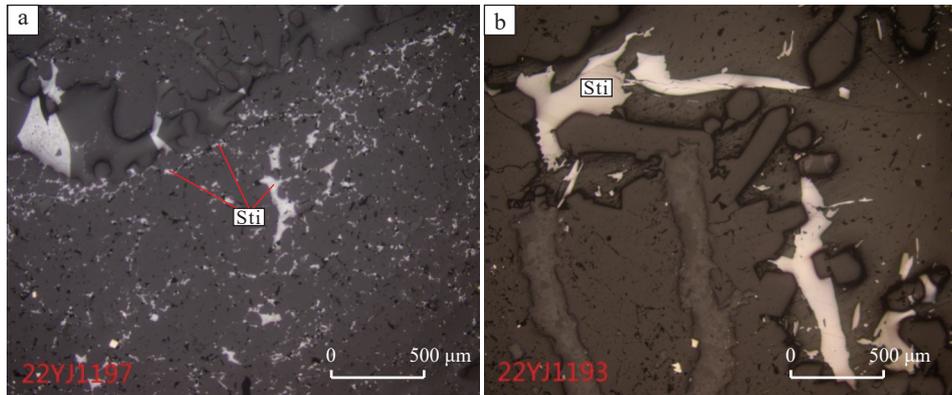


图5 显微镜下矿石构造特征

Fig. 5 Structural characteristics of ore under microscope

3.3 矿石类型

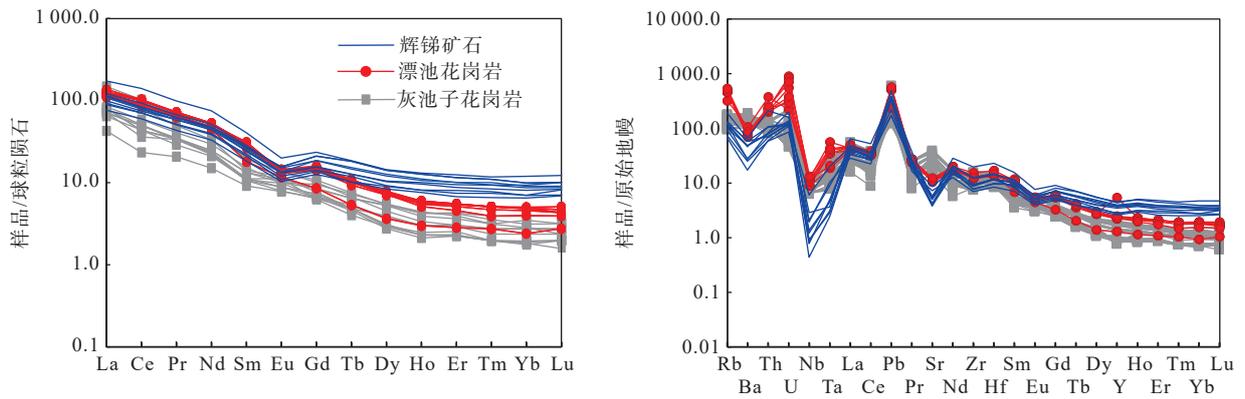
锑矿石按照矿物共生组合特征可划分石英-辉锑矿型、石英-方解石-辉锑矿型。按矿石构造划分为块状矿石、脉状矿石和浸染状矿石。矿石工业类型主要为原生硫化矿石,因氧化带分布较少,可忽略不计。

3.4 矿床地球化学特征

3.4.1 微量元素特征

辉锑矿微量元素蛛网图(图6)显示, Rb、Ba、Th

等大离子亲石元素相对富集,高场强元素相对亏损,具有Nb强烈负异常、Sr显著负异常、Pb强烈正异常(表2)。这些特征与漂池花岗岩的微量元素蛛网图分布特征高度一致, Sr、Eu的负异常表明岩浆源区存在斜长石的分离结晶,而辉锑矿石在沉淀的时候也继承了这一特征。灰池子花岗岩的微量元素蛛网图,则表现出相类似的分布特征,具有弱的Sr正异常。此外,通过研究岩石(矿石)的Y/Ho值可以判断成矿流体的



灰池子花岗岩和漂池花岗岩数据来自秦拯纬(2016); 数据标准化据 Sun 等(1989)

图6 锑矿石稀土元素球粒陨石标准化图解

Fig. 6 Standardized diagram of chondrites of rare earth elements in antimony ores

性质(Breeding, 1999; Papike, 1996)。因为 Ho 与 Y 具有相同的价态和离子半径, 它们相同的地球化学性质使得在诸多地质过程中二者的地球化学性质不改变

(Douville, 1999)。庾岭一带辉锑矿石的 Y/Ho 值为 24.87~27.83, 平均为 26.36, 接近于漂池岩体和灰池子岩体的 Y/Ho 平均值(36.02 和 30.36)。

表 2 研究区锑矿石样品微量元素组成(10⁻⁶)

Tab. 2 Trace element composition and characteristic parameters of antimony ore samples in the study area (10⁻⁶)

样品编号	Sb	W	Sn	Pb	Bi	Be	Li	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Mo
TC50-1HX	33.24	20.43	0.45	47.98	0.11	0.69	93.17	6.37	21.72	79.03	60.96	32.42	9.85	117.16	5.90	0.34
TC51-1HX	197.62	246.30	1.98	71.83	0.25	1.13	111.70	8.54	54.66	129.79	73.97	58.60	27.62	157.54	10.68	0.31
TC52-1HX	107.61	63.69	0.60	54.01	0.15	0.86	119.60	6.86	38.19	86.88	67.24	49.03	13.28	227.98	5.59	0.25
TC53-1HX	158.71	37.45	0.83	54.40	0.27	0.86	98.99	6.81	32.03	93.50	62.02	55.12	21.58	90.92	8.01	0.20
TC54-1HX	418.67	37.06	0.69	26.16	0.25	0.78	67.62	6.29	22.55	101.45	45.77	85.39	18.05	86.95	7.69	0.13
TC60-1HX	61.60	26.51	1.97	50.69	0.31	1.50	106.30	9.57	60.61	107.11	56.98	46.23	32.26	62.56	15.00	1.06
TC60-2HX	281.29	25.89	1.01	57.90	0.15	1.08	86.94	8.52	29.64	90.26	31.62	47.48	12.40	118.26	10.25	0.19
TC61-1HX	251.02	27.70	1.14	32.75	0.16	0.84	70.17	7.75	33.59	64.07	35.67	23.87	11.05	78.02	9.23	0.29
TC61-2HX	195.63	38.25	0.73	55.66	0.15	1.03	84.53	8.06	27.38	77.51	61.44	31.85	24.38	681.21	10.23	0.19
TC61-3HX	272.27	63.57	1.17	25.27	0.39	1.06	122.50	6.68	40.86	76.50	55.26	27.09	14.27	110.82	8.40	0.23
样品编号	Rb	Sr	Cd	In	Te	Cs	Ba	Tl	Th	U	Zr	Hf	Nb	Ta	Zr/Hf	Nb/Ta
TC50-1HX	43.65	141.59	0.34	0.03	0.04	5.12	162.88	0.71	4.54	1.71	71.79	2.35	1.26	0.38	30.55	3.34
TC51-1HX	78.62	108.14	0.264	0.04	0.03	10.62	378.73	0.92	8.18	2.25	129.89	4.12	3.91	0.73	31.50	5.38
TC52-1HX	40.01	166.95	0.53	0.03	0.07	6.50	111.41	0.86	4.66	2.19	78.77	2.72	0.79	0.17	28.95	4.73
TC53-1HX	60.34	106.54	0.29	0.03	0.02	7.02	313.72	0.87	6.19	2.69	90.65	3.20	0.59	0.10	28.36	5.67
TC54-1HX	55.81	97.55	0.43	0.03	0.03	6.15	180.19	0.96	5.33	2.48	80.29	2.68	0.50	0.18	29.91	2.77
TC60-1HX	114.14	100.14	0.09	0.04	0.03	14.18	427.08	1.21	16.39	3.19	202.65	6.36	1.87	0.13	31.88	14.04
TC60-2HX	74.37	113.51	0.41	0.03	0.06	9.78	298.36	0.91	8.39	2.42	125.85	3.93	0.88	0.16	32.04	5.41
TC61-1HX	69.83	74.28	0.23	0.04	0.05	8.27	312.46	0.96	6.29	2.71	96.64	3.23	0.56	0.11	29.90	5.00
TC61-2HX	77.96	76.59	1.48	0.04	0.04	7.76	372.78	1.05	5.61	2.32	91.06	3.33	0.29	0.09	27.32	3.24
TC61-3HX	71.03	82.33	0.27	0.03	0.08	7.58	176.23	1.33	6.47	4.00	96.04	3.29	1.34	0.32	29.23	4.16

注: 测试单位为西安兆年矿物测试技术有限公司。

因此,从微量元素特征可以看出,庾岭辉锑矿具有与漂池岩体、灰池子岩体较好亲缘性的特点。此外,辉锑矿微量元素中 Sb、W 较为富集(表 2)。Zr/Hf 值为 27.321~32.038, Nb/Ta 值为 2.733~14.038, 表明成矿流体具有两个来源:岩浆来源(矿体北侧的漂池岩体和灰池子岩体,岩石组合为石英闪长岩和花岗岩)和大陆地壳来源(沉积-变质岩)。

3.4.2 稀土元素特征

稀土元素分配曲线表现为轻稀土元素富集重稀土元素亏损的右倾曲线,分配曲线基本平行,形态基本一致(表 3, 图 6)。LR/HR 值为 8.277~12.217, δEu 值为 0.601~0.669(负异常), δCe 值为 0.938~1.029(轻微负异常),成矿环境为还原环境,成矿物质来源于地壳,与围岩为沉积-变质岩符合。(La/Sm)_n 和 (Gd/Yb)_n 值表明轻稀土分馏明显,重稀土分馏不明显,表明成矿过程中有外来物质(大气降水)的混入。辉

锑矿的稀土元素配分曲线特征和漂池花岗岩的稀土元素配分曲线特征十分接近,而且均具有中等-显著的负铕异常;辉锑矿和灰池子花岗岩的稀土元素配分曲线也表现出相对一致的特征,区别在于灰池子花岗岩无负铕异常。稀土元素在地质作用和地球化学过程中常常作为一个整体出现,而且各个稀土元素之间具有非常接近的地球化学行为,因而晚期的变质作用很难改变岩(矿)石的稀土元素配分曲线特征。一些遭受流体反复交代的岩(矿)石稀土元素配分曲线会发生改变并表现为轻稀土元素亏损的特征,因为轻稀土元素相对离子半径较大且更容易被流体带出。庾岭辉锑矿石的轻稀土元素相对富集显然不是流体交代作用所致,而是辉锑矿在沉淀时候继承了成矿热液的稀土元素特征。

综上所述,庾岭辉锑矿稀土元素特征表现出与漂池、灰池子岩体较好的亲和性特征,同时也表现出围

表 3 研究区锑矿石样品稀土元素组成(10^{-6})

Tab. 3 Trace element composition and characteristic parameters of antimony ore samples in the study area (10^{-6})

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
TC50-1HX	18.10	36.87	4.12	15.46	2.81	0.60	2.60	0.38	2.29	0.46	1.33	0.20	1.19	0.18	11.85
TC51-1HX	28.80	57.14	6.39	23.95	4.36	0.88	3.80	0.55	3.07	0.60	1.67	0.24	1.58	0.26	16.21
TC52-1HX	23.69	45.55	5.59	21.67	3.71	0.76	3.17	0.47	2.65	0.57	1.57	0.24	1.48	0.22	15.84
TC53-1HX	21.92	43.48	4.92	18.50	3.38	0.70	2.90	0.44	2.35	0.46	1.23	0.19	1.19	0.21	11.64
TC54-1HX	25.64	48.23	5.53	20.52	3.76	0.78	3.22	0.48	2.62	0.54	1.45	0.21	1.37	0.21	14.70
TC60-1HX	41.13	85.84	9.40	34.98	6.21	1.16	4.83	0.69	3.66	0.74	2.06	0.30	2.04	0.31	18.40
TC60-2HX	31.27	59.54	6.76	25.52	4.61	0.87	3.70	0.54	2.89	0.57	1.55	0.24	1.45	0.24	15.44
TC61-1HX	25.66	49.70	5.57	21.54	3.94	0.78	3.83	0.57	3.22	0.63	1.67	0.26	1.54	0.23	16.75
TC61-2HX	21.26	43.36	4.81	18.01	3.23	0.64	2.81	0.38	2.13	0.43	1.12	0.17	1.10	0.18	11.03
TC61-3HX	27.13	51.03	5.94	22.23	4.13	0.90	4.32	0.68	3.60	0.72	1.91	0.28	1.69	0.26	19.26
样品编号	Y/Ho	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	LRE	MRE	HRE	δEu	δCe	(La/Sm) _n	(Gd/Yb) _n	(La/Yb) _n		
TC50-1HX	25.71	86.59	77.96	8.63	9.03	74.55	9.14	2.90	0.67	1.01	4.16	1.81	10.91		
TC51-1HX	26.92	133.29	121.51	11.78	10.32	116.28	13.26	3.75	0.64	0.99	4.27	1.99	13.04		
TC52-1HX	27.83	111.32	100.96	10.36	9.74	96.49	11.33	3.50	0.66	0.94	4.12	1.77	11.50		
TC53-1HX	25.42	101.86	92.89	8.97	10.36	88.81	10.23	2.82	0.66	0.99	4.18	2.01	13.18		
TC54-1HX	27.03	114.55	104.45	10.10	10.34	99.91	11.39	3.24	0.66	0.95	4.40	1.95	13.42		
TC60-1HX	24.87	193.35	178.72	14.63	12.22	171.35	17.29	4.71	0.62	1.03	4.27	1.96	14.49		
TC60-2HX	26.90	139.76	128.57	11.18	11.50	123.09	13.18	3.48	0.62	0.96	4.38	2.11	15.43		
TC61-1HX	26.55	119.14	107.19	11.95	8.97	102.46	12.99	3.69	0.61	0.97	4.20	2.06	11.95		
TC61-2HX	25.58	99.61	91.31	8.30	11.00	87.44	9.61	2.56	0.63	1.01	4.25	2.10	13.83		
TC61-3HX	26.83	124.81	111.36	13.45	8.28	106.33	14.34	4.14	0.65	0.94	4.25	2.11	11.52		

注:测试单位为西安兆年矿物测试技术有限公司。

岩沉积岩来源的特征。

3.4.3 S 同位素特征

S 是成矿热液中最主要的矿化剂之一,硫化物硫同位素组成是成矿流体来源和成矿物质示踪最有效的方法(Ohmoto, 1979; Seal, 2006)。为了精准的分析研究区锑矿的成矿物质来源以及成矿演化过程,我们选择硫同位素组成作为测试分析的对象。在西沟矿段和南沟矿段分别采集两件样品,进行 S 同位素测定,并与研究区典型锑矿床蔡凹锑矿进行对比,分析锑矿成矿物质来源(表 4)。

庾岭地区辉锑矿 $\delta^{34}\text{S}$ 频率分布直方图(图 7)显示,庾岭辉锑矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.20‰~7.12‰,平均为 6.19‰、极差为 1.92‰,与蔡凹锑矿相似。

3.4.4 铅同位素特征

研究区内锑矿 Pb 同位素组成较稳定,变化范围较小,比值比较均一。测试结果(表 5)显示,研究区 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 18.295 9~18.487 0, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.635 9~15.692 5, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 38.371 1~38.655 5;蔡凹锑矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 17.870 5~18.110 3, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.546 0~15.595 0, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 38.124 4~38.359 6,显示研究区与蔡凹锑矿铅同位素具有相同特征。

4 矿床成因

4.1 成矿物质来源

4.1.1 S 同位素约束

当成矿环境中的氧逸度高的条件下,矿床中常存在硫酸盐矿物,而且 ^{34}S 会优先进入到硫酸盐矿物富集,硫酸盐矿物 $\delta^{34}\text{S} \approx \text{成矿体系 } \delta^{34}\text{S}_{\text{S}}$;而在相对还原条件下,且矿物组合简单并无硫酸盐矿物时,则成矿热液体系总硫同位素组成($\delta^{34}\text{S}$ 硫化物 $\approx \delta^{34}\text{S}_{\text{S}}$)可以近

表 4 辉锑矿岩(矿)石样品 S 同位素样品测试结果

Tab. 4 Sulfur isotope results of stibnite ore (rock) samples

样号	矿物名称	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)	平均(‰)	采样
DX-1	辉锑矿	5.84	6.19	庾岭地区
DX-2	辉锑矿	5.20		
XN-1	辉锑矿	6.59		
XN-2	辉锑矿	7.12	6.77	蔡凹锑矿
II C-2	辉锑矿	5.30		
II C-3	辉锑矿	7.00		
II C-5	辉锑矿	8.00		

注:测试单位为西安兆年矿物测试技术有限公司。

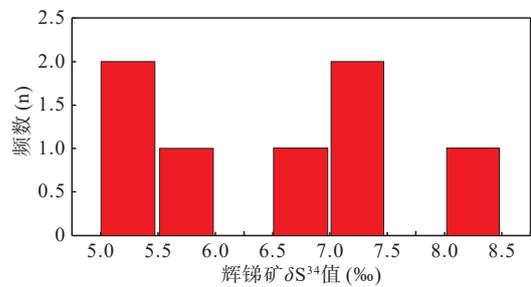


图 7 庾岭锑矿与蔡凹锑矿辉锑矿 S 同位素分布直方图
Fig. 7 Sulfur isotope distribution of stibnite in Yuling and Caiao antimony deposits

似表达为硫化物中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(Ohmoto et al., 1979; 王长春等, 2022; 孙非非等, 2023; 焦阳等, 2025)。如前所述,庾岭锑矿床主要的硫化物为辉锑矿和黄铁矿,辉锑矿是最主要的矿石矿物,黄铁矿则是伴生的重要金属硫化物。岩相学和矿相学研究表明,庾岭锑矿床中并未出现硫酸盐矿物。因此,辉锑矿的 S 同位素值将直接反映成矿物质来源。

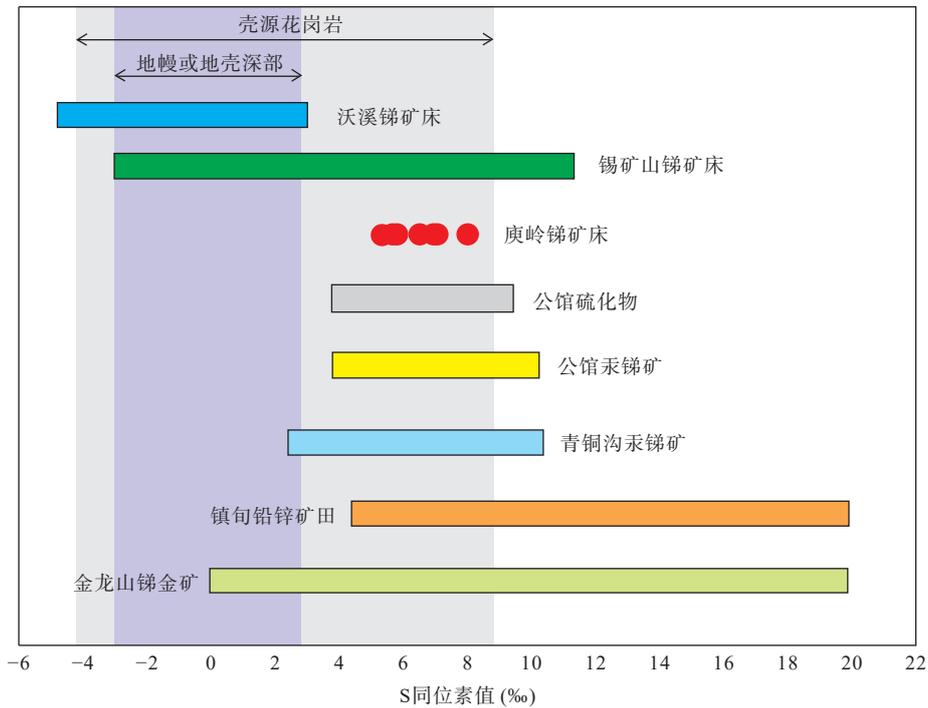
研究区辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.20‰~8.00‰,相对集中(图 7、图 8),落入了壳源花岗岩区域,这说明矿

表 5 庾岭-蔡凹锑矿辉锑矿石 Pb 同位素样品测试结果统计表

Tab. 5 Lead isotope analysis results of stibnite ore samples from Guying-Caiwo antimony deposit

样号	矿物名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2SE	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2SE	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2SE	采样位置
DX-1	辉锑矿	18.306 2	0.003	15.666 4	0.004	38.403 2	0.009	庾岭地区
DX-2	辉锑矿	18.295 9	0.004	15.635 9	0.005	38.371 1	0.008	西沟矿段
XN-1	辉锑矿	18.487 0	0.002	15.692 5	0.003	38.655 5	0.007	庾岭地区
XN-2	辉锑矿	18.458 9	0.005	15.679 7	0.004	38.599 4	0.007	南沟矿段
CW-1	辉锑矿	17.870 5	0.003	15.595 0	0.002	38.359 6	0.008	蔡凹锑矿
CW-2	辉锑矿	18.110 3	0.007	15.546 0	0.004	38.124 4	0.014	

注:测试单位为西安兆年矿物测试技术有限公司。



锡矿山数据来源于肖宪国(2014); 沃溪数据来源于沈能平等(2013); 公馆锑矿床数据来源于孟浩(2020); 青铜沟汞锑矿数据来源于张颖(2010); 镇甸铅锌矿田数据来源于侯满堂等, 2006; 金龙山锑金矿床数据来源于李涛(2013); 壳源花岗岩、地幔或地壳深部 S 数据来源于 Ohmoto(1972)、Drummond 等(1985)、Seal(2006)

图8 典型锑矿床与庾岭锑矿床 S 同位素组成分布图

Fig. 8 Sulfur isotope distribution of stibnite in the South China Sb belt and the laojunshan region

区南侧的泥盆纪花岗岩体(漂池和灰池子岩体)是硫的重要来源。而庾岭锑矿床矿体的赋矿围岩则是寨根岩组大理岩,且该大理岩中 Sb、Pb 含量远高于地壳中相应元素丰度含量(地化剖面数据),同样为锑矿成矿作用提供了充足的物质来源。综上所述,庾岭锑矿床辉锑矿中的 S 呈现出沉积硫来源和地壳(岩浆)来源特征,受沉积作用和岩浆作用影响。

4.1.2 Pb 同位素约束

Pb 元素由于其相对原子量较大,而且 Pb 不同核

素之间的相对质量数较小,溶解、运移和沉淀过程中的 Pb 同位素组成一般不发生变化。因此,作为成矿物质组成的 Pb 继承了其源区的 Pb 同位素组成(Ohmoto, 1979; Seal, 2006), Pb 也成为了热液矿床研究中成矿物质来源的良好指示手段(朱炳泉, 1998)。铅同位素的 μ 值、 ω 值、Th/U 值记录了地质过程相关信息,常被用来推测 Pb 的物质来源(Zartman et al., 1981; 吕鹏瑞等, 2015)。庾岭一带辉锑矿的 μ 值为 9.39~9.64(表 6),平均值为 9.56,非常接近于地壳 μ

表 6 庾岭-蔡凹锑矿辉锑矿 Pb 同位素比值与相关参数表

Tab. 6 Pb isotope ratio and related parameters of stibnite in Yuling-Caiwa antimony mine

样号	样品名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	t (Ma)	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	μ	ω	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
DX-1	辉锑矿	18.3062	15.6664	38.4032	470	1.1685	9.61	37.57	3.78	91.08	23.86	45.12
DX-2	辉锑矿	18.2959	15.6359	38.3711	470	1.1701	9.55	37.21	3.77	90.46	21.87	44.25
XN-1	辉锑矿	18.487	15.6925	38.6555	470	1.1781	9.64	37.86	3.80	101.85	25.57	51.99
XN-2	辉锑矿	18.4589	15.6797	38.5994	470	1.1772	9.62	37.66	3.79	100.18	24.73	50.46
CW-1	辉锑矿	17.8705	15.595	38.3596	470	1.1459	9.52	39.27	3.99	65.11	19.20	43.93
CW-2	辉锑矿	18.1103	15.546	38.1244	470	1.1649	9.39	36.37	3.75	79.40	15.99	37.53

注: Pb同位素特征参数 μ 为 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值; ω 为 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 值; t为漂池岩体成岩年龄(秦拯纬, 2016); $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ 计算参考朱炳泉(1998)。

值(9.58),指示矿床中的 Pb 来自于上地壳。庾岭辉锑矿的 ω 值为 35.57~39.27(表 6),平均为 37.66,介于上地壳 ω 值(41.860)和地幔的 ω 值(31.844)之间,但更接近于上地壳,显示出混合来源的特征,但以上地壳来源为主。辉锑矿的 Th/U 值为 3.8675~3.99(表 6),平均值为 3.81,非常接近于全球上地壳平均值(3.88),同样说明该矿石中的 Pb 主要来源于上地壳。

Pb 同位素构造演化图解显示,庾岭一带辉锑矿的 Pb 同位素比值在图 9a 中落在了上地壳和造山带,并具有线性分布的趋势,显示壳源特征;在图 9b 上落在造山带和下地壳之间并靠近造山带一侧,同样指示壳源的特征。沃溪和锡矿山的辉锑矿的 Pb 同位素比值数据点在图 9 中均沿着上地壳或造山带线性分布,也表现出了上地壳来源的特征(图 9)。陕西公馆虽然表现出了与上述矿床相近的 Pb 同位素特征,但是其 Pb 同位素比值特征却指示其成矿物质来源于地幔或下地壳,表现出深源的特点(图 9)。

考虑到时间因素对铅同位素失踪可能存在潜在的影响,使用 3 种铅同位素比值与同时代地幔相对偏差值来进行对比($\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$)(表 6),并根据不同岩石组合以及已知成因类型的矿石 Pb 同位素数据,建立了矿石 Pb 的 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 成因图解,而且这一方法具有更精确的示踪结果(朱炳泉, 1998)。在 Pb 同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解上(图 10),庾岭一带辉锑矿石数据点落入了上地壳源区域,仅有一个点落入到了岩浆作用的区域,表明该矿石主要来源于上地壳而且受到了岩浆作

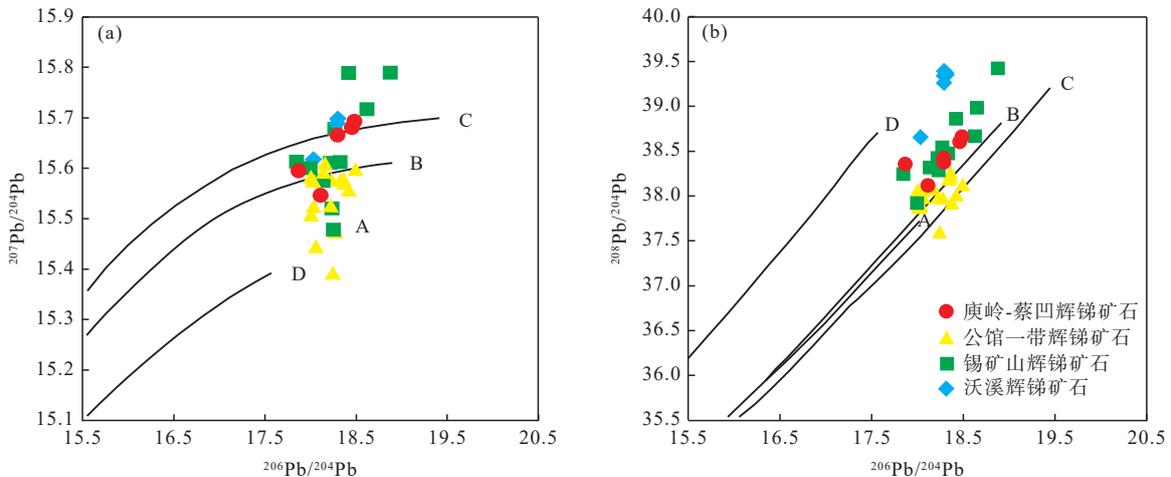
用的影响。沃溪矿床表现出比较单一的上地壳来源,而锡矿山矿床则表现出具有深源混合且受到了沉积物质加入的上地壳来源(图 10)。公馆一带锑矿石在图中指示 Pb 来自于深源的岩浆活动。通过和典型的岩浆热液型锑矿床对比发现,沃溪和锡矿山矿床均表现出 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 的线性相关分布特征,而且主要数据点均落入到了上地壳 Pb 来源区域,庾岭一带锑矿石均符合上述特征。

综上所述,从 Pb 同位素比值特征来看,庾岭一带辉锑矿石的成矿物质来源主要来自于上地壳,且有部分上地壳岩浆活动的贡献。

4.2 矿床成因类型

区域上锑矿床(点)较多,目前已发现高岭沟、蔡凹、掌耳沟和大河沟 4 个中型锑矿床,数十个小型锑矿床(点),以蔡凹锑矿最为典型,前人对蔡凹锑矿床成因研究较早,但相关报道性文献较少。对蔡凹锑矿床成因,过去多认为属低温热液充填,并将其成矿源与蟒岭花岗岩体联系,作为岩浆热液分带成矿的表现。印支期、燕山期构造运动,尤以燕山期构造运动,在应力高度集中部位产生的构造及构造热的影响,引起了地下水的运移,促进岩层中 Hg、Sb 元素的活化及其它有用物质的溶解,并与携带来自壳幔深处的含矿热液混合,沿断裂系统向压力小的方向运移,最终在有利的构造部位沉淀富集,形成沿构造裂隙充填的脉状、透镜状等形态的汞锑矿体。

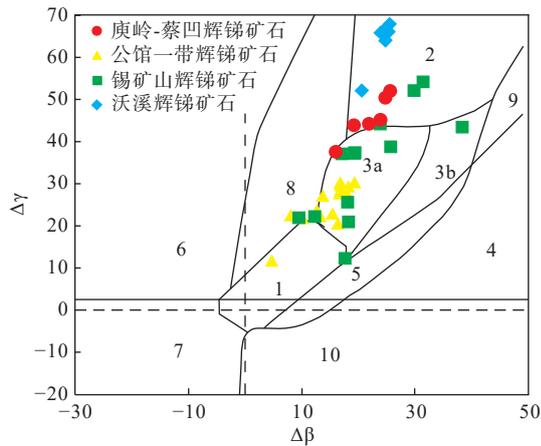
高菊生(1999)认为,蔡凹锑矿化受 8 个控矿构造



底图据 Zartman 等(1981); 锡矿山数据来源于刘文均(1992)、胡雄伟(1995)、陶琰等(2001); 沃溪数据来源于沈能平等(2013)、彭渤(2006)、李彬等(2024); 公馆共锑矿床数据来源于孟浩(2020); A. 地幔; B. 造山带; C. 上地壳; D. 下地壳

图9 庾岭锑矿床 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(a)与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(b)

Fig. 9 (a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and (b) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ diagrams for stibnite of the Yuling deposit



底图据朱炳泉(1998); 锡矿山数据来源于刘文均(1992)、胡雄伟(1995)、陶琰等(2001); 沃溪数据来源于沈能平等(2013)、彭渤(2006)、李彬等(2024); 公馆共辉锑矿床数据来源于孟浩(2020); 1.地幔源铅; 2.上地壳铅; 3.上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a.岩浆作用; 3b.沉积作用); 4.化学沉积型铅; 5.海底热水作用铅; 6.中深变质作用铅; 7.深变质作用下地壳铅; 8.造山带铅; 9.古老页岩上地壳铅; 10.退变质作用铅

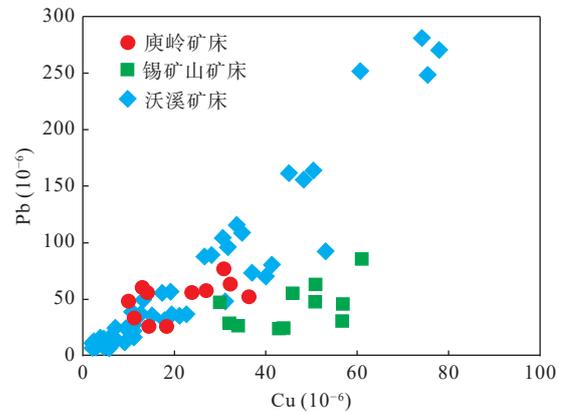
图10 庚岭辉锑矿床 Pb 同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解

Fig. 10 The $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ diagram of lead isotopes of stibnite in the Yuling deposit

带控制, 锑矿体赋存于控矿构造带的6个特殊容矿构造之中, 成矿最有利的地层是雁岭沟岩组的(石墨)大理岩。范红科等(2015)认为, 蔡凹锑矿床的成矿物质主要来源于地层, 成矿流体有变质流体和岩浆流体, 为中-低温条件成矿, 初步认为该矿床的成因类型为变质-岩浆再造型锑矿床。

矿区南侧的漂池岩体和灰池子岩体, 分别形成于(473±4)Ma和(422±5)Ma, 漂池岩体为超高压变质沉积岩折返至中下地壳水平部分熔融的产物, 灰池子岩体是玄武质岩浆的底侵与构造加厚以及后期俯冲板片所诱发的部分熔融形成(秦拯纬, 2016)。从庚岭辉锑矿的稀土元素和微量元素特征来看, 辉锑矿表现出与上述岩体的亲缘性特征, 尤其是辉锑矿和漂池岩体具有一致的稀土微量元素分布特征。在Pb-Cu图解上, 典型的岩浆热液型锑矿床的Cu-Pb值表现出显著的正相关关系(图11), 庚岭辉锑矿矿石也表现出这种趋势, 表明庚岭辉锑矿床的形成与岩浆热液有关。辉锑矿的S同位素特征也指示出, 辉锑矿的沉淀受沉积作用和岩浆作用的影响, 而且辉锑矿的S同位素值反映了壳源花岗岩的特点。然而, 陕西公馆一带锑矿床的S同位素含量虽然表现出与庚岭辉锑矿一致的特征, 但是其成矿物质来源主要是地层硫化物或者同

沉积海水硫酸盐(孟浩, 2020)。这表明S同位素值同时受到成矿物质来源和成矿过程的双重控制。如前所述, Pb同位素比值反映出庚岭一带辉锑矿的成矿物质来源具有上地壳来源特征, 而且受到了壳源岩浆活动的控制。这些壳源岩浆活动正是漂池岩体和灰池子岩体形成过程的直接体现。虽然漂池岩体和灰池子岩体的岩浆源区形成与中下地壳, 但是随着这部分熔融形成的岩浆演化以及逐渐运移至上地壳以后, 受到同化混染以及分离结晶的控制作用, 岩浆进一步演化并逐渐冷却形成这些中酸性岩体, 而这个过程中形成的岩浆热液促使成矿物质开始逐渐汇聚并运移。



锡矿山矿床数据来源于Fu等(2020); 沃溪锑矿床数据来源于Fu等(2020)、Li等(2023)

图11 辉锑矿矿石 Pb-Cu 相关图解

Fig. 11 The diagram of Pb-Cu for stibnite

在区域上高岭沟-双槐树大断裂是含锑热液运移的通道, 是一条多期次的断裂带, 其次级断裂发育, 在长期的地质构造活动作用下, 逐渐从地层中迁移出来的Sb元素多次沿活动断裂带运移, 并在不同岩性界面间上或者次级断裂带、裂隙面上等有利部位聚集形成锑矿体。寨根岩组大理岩中Sb、Pb等成矿元素在裂隙处汇聚时, 由于温度和流体压力均降低, 诱发了辉锑矿的沉淀。实验研究表明, 含Sb热液在温度低于150℃时, Sb即达到饱和且形成辉锑矿开始沉淀(Krupp, 1988; Olsen et al., 2019)。

需要注意的是, 研究区处于高岭沟-双槐树大断裂带南侧及其次级断裂带中, 位于陕豫锑成矿带西段。锑矿主要产于寨根岩组大理岩中, 寨根岩组大理岩中Sb、Pb含量远高于地壳中相应元素丰度含量(地化剖面数据), 为锑矿成矿作用提供了充足的物质来源。秦岭岩群自晚元古代以来就经历了多期次的区域变

质作用,特别是在加里东期处于强烈的地质构造活动带中,变质变形作用、混合岩化作用强烈,岩石中矿物发生交代、熔融、分解、重组、重结晶,为原始矿质成分被萃取、活化、迁移、富集、沉淀提供了主要动力和热源。一些热力学模拟结果表明,成矿流体从碳酸盐向外迁移时可能伴随着 pH 值由碱性水平向中性水平变化,形成的硅钙面是有利于锑成矿的地球化学界面(赵圣涛等, 2025)。

庾岭一带会锑矿床的成矿作用具多期次、多阶段的特点。岩浆作用为 Sb 的活动提供了主要的热动力条件和富矿的热液来源,形成了含 Sb 的热液(高温元素 Mo、Sn、W 含量远高于地壳丰度)。同时,更早期的沉积变质地层中的 Sb 和 Pb 等元素在构造活动作用、变质变形作用、混合岩化作用下沿着构造裂隙或硅钙面迁移并沉淀。

综上所述,认为研究区锑矿床成因类型为“构造-热液再造型锑矿床”,成矿物质来源于上地壳岩浆活动与早期沉积地层。

5 找矿标志

根据研究区锑矿特征,结合区域典型锑矿床(蔡凹锑矿),总结锑矿找矿标志如下。

(1)地层、岩性标志:峡河岩群寨根岩组 b 岩段是锑矿的主要赋存层位,该岩段中深灰色硅质大理岩、碎裂状硅化大理岩是找矿的岩性标志。

(2)构造标志:区域主断裂高岭沟-小宽坪-双槐树断裂带呈 NE-SW 向产出,在其南侧及弧型转弯处(大理岩变厚)成矿条件较好(西沟锑矿段)。庾家河-会仙台断裂呈 NW-SE 向分布,其次级断裂发育处锑矿产出较好(南沟锑矿段)。

(3)侵入岩标志:石英闪长岩体侵位于干江河组的底部,构成西沟锑矿体上盘围岩,是成矿热液的重要来源。

(4)蚀变标志:围岩蚀变主要为硅化、褐铁矿化、绢云母化、绿帘石化。

6 结论

(1)通过开展陕西省丹凤县回头山晶质石墨矿普查工作,在庾岭地区新发现庾岭锑矿床,矿体赋存于峡河岩群寨根岩组 b 岩段地层之中。矿石类型有石英-辉锑矿型、石英-方解石-辉锑矿型两种。

(2)初步圈定锑矿体 4 条,初步估算 Sb 潜在资源约为 8 000 t。锑矿体成波状、似层状展布,长为 60~300 m,真厚度为 0.82~4.43 m,倾向为 340°~30°,倾角为 47°~77°,其走向和倾向延伸方向找矿潜力较大,具中型找矿远景。

(3)寨根岩组 b 岩段是锑矿的主要赋存层位,是寻找锑矿的地层标志。寨根岩组 b 岩段的深灰色硅质大理岩、碎裂状硅化大理岩都是找矿的岩性标志。锑矿化主要在高岭沟-小宽坪-双槐树断裂带南侧及其次级断裂附近发育,在主断裂弧型转弯处且在大理岩变厚处成矿条件较好。石英闪长岩体是成矿热液的重要来源。围岩蚀变主要为硅化、褐铁矿化、绢云母化、绿帘石化。

(4)辉锑矿微量元素中 Sb、W 较为富集,稀土元素分配曲线表现为轻稀土元素富集重稀土元素亏损的右倾曲线。庾岭辉锑矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.20‰~7.12‰; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 18.295 9~18.487 0, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.635 9~15.692 5, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 38.371 1~38.655 5,与蔡凹锑矿 Pb 同位素具有相同特征。

(5)在对矿床地质特征、矿床地球化学特征以及同位素地球化学研究基础上,结合区域成矿地质背景以及典型矿床对比研究,认为庾岭锑矿床为“构造-热液再造型锑矿床”。

参考文献(References):

- 董延涛,袁博,牛颖超.我国锑矿资源产业高质量发展研究[J].*现代矿业*, 2020, 36(10): 19-21.
- DONG Yantao, YUAN Bo, NIU Yinchao. Research on high quality development of antimony mineral resource industry in China [J]. *Modern Mining*, 2020, 36(10): 19-21.
- 范红科,张代斌,韩代成,等.陕西省丹凤县蔡凹锑矿床地质特征及找矿方向[J].*山东国土资源*, 2015, 31(1): 18-22.
- FAN Hongke, ZHANG Daibin, HAN Daicheng, et al. Geological Characteristics and Prospecting Direction of Caiwa Antimony Deposit in Danfeng County in Shanxi Province [J]. *Shandong Land and Resources*, 2015, 31(1): 18-22.
- 伏雄,门道改,李娜.河南大河沟-掌耳沟锑矿田地质特征及找矿潜力初评[J].*矿产勘查*, 2012, 3(5): 624-631.
- FU Xiong, MEN Daogai, LI Na. Geological characteristics of Dahogou-Zhangergou antimony field and evaluation on prospecting potential, Henan [J]. *Mineral Exploration*, 2012, 3(5): 624-631.
- 高菊生.陕西蔡凹锑矿构造特征及其对成矿的控制[J].*有色金属矿产与勘查*, 1999, 8(1): 53-59.
- GAO Jusheng. Structures of the Caiwa Antimony deposit and their controls over Mineralization, Shaanxi [J]. *Geological exploration*

- tion for non-ferrous metals, 1999, 8(1): 53-59.
- 胡雄伟. 湖南锡矿山超大型锑矿床成矿地质背景及矿床成因[D]. 北京: 中国地质科学院, 1995.
- HU Xiongwei. The Geological Setting and Genesis of Xikuangshan Super-Giant Antimony Deposits, Hunan, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1995.
- 胡兴旺, 赵灿, 朱满怀, 等. 陕西省看山寺一带金锑矿地质特征与找矿标志研究[J]. *世界有色金属*, 2022, (11): 217-219.
- HU Xingwang, ZHAO Can, ZHU Manhuai, et al. Study on the Geological Characteristics and Prospecting Marks of Gold Antimony Mine in Guanshan Temple Shaanxi Province[J]. *Non-ferrous Metals of the World*, 2022, (11): 217-219.
- 侯满堂, 唐永忠. 陕西旬阳地区志留系铅锌矿带成矿地球化学特征及物理化学条件[J]. *西北地质*, 2006, 39(3): 28-38.
- HOU Mantang, TANG Yongzhong. Metallogenic Geochemistry and Physico-Chemical Condition of Silurian Pb-Zn Mineralization in the Xunyang County, Shaanxi[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(3): 28-38.
- 焦阳, 冯俊环. 西秦岭地区猪婆沟金矿成矿物质来源及矿床成因分析[J]. *西北地质*, 2024, 57(1): 219-229.
- JIAO Yang, FENG Junhuan. Source of ore Forming Materials and Genesis of Zhupogou Gold Deposit in West Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(1): 219-229.
- 李涛. 陕西镇安县金龙山地区金汞锑成矿特征及矿床成因研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- LI Tao. Metallogenic characteristics and genesis of Au-Hg-Sb ore deposits in Jinlongshan district in Zhen'an, Shanxi[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- 李彬, 许德如, 柏道远, 等. 湘西沃溪金锑矿床燕山期幕式成矿作用: 来自原位白钨矿 U-Pb 定年与黄铁矿元素-同位素的约束[J]. *岩石学报*, 2024, 40(1): 215-240.
- LI Bin, XU Deru, BAI Daoyuan, et al. Episodic mineralization at Yanshannian in the Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan, South China: Constraints from in-situ scheelite LA-ICP-MS U-Pb geochronology and element-isotope of pyrite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2024, 40(1): 215-240.
- 刘保申. 卢氏掌耳沟锑矿田断裂构造控矿作用初步探讨[J]. *河南地质*, 1985, (4): 43-47.
- LIU Baoshen. A preliminary study on the ore-controlling effect of fault structure in Lui's Shuergou antimony ore field[J]. *Geology of Henan*, 1985, (4): 43-47.
- 刘文均. 华南几个锑矿床的成因探讨[J]. *成都地质学院学报*, 1992, 19(2): 13-22.
- LIU Wenjun. Genesis of Some Antimony Deposits in Southern China[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1992, 19(2): 13-22.
- 吕鹏瑞, 姚文光, 吴亮, 等. 巴基斯坦西北喜马拉雅构造结科希斯坦—拉达克地体 Pb 同位素组成特征及其示踪意义[J]. *西北地质*, 2015, 48(1): 56-62.
- LÜ Pengrui, YAO Wenguang, WU Liang, et al. Lead Isotopic Compositions of the Kohistan-Ladakh Terrane in NW Himalayan Syntax, Pakistan and their Tracer Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(1): 56-62.
- 马渊博. 南秦岭镇安-旬阳盆地金、汞、锑矿床成矿作用研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- MA Yuanbo. Metallogenesis of gold, mercury and antimony deposits in the Zhen'an-Xunyang basin, South Qinling Orogen[D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- 毛景文, 杨宗喜, 谢桂青, 等. 关键矿产——国际动向与思考[J]. *矿床地质*, 2019, 38(4): 689-698.
- MAO Jingwen, YANG Zongxi, XIE Guiqing, et al. Critical minerals: International trends and thinking[J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(4): 689-698.
- 孟浩. 陕西旬阳公馆 Hg-Sb 矿床地质地球化学特征及成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- MENG Hao. Geological and Geochemical Characteristics and Causes of Formation of the Gongguan Hg-Sb deposit, Shaanxi province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- 彭渤, Robert F, 涂湘林. 湘西沃溪 W-Sb-Au 矿床白钨矿 Nd-Sr-Pb 同位素对成矿流体的示踪[J]. *地质学报*, 2006, 80(4): 561-570.
- PEN Bo, Robert F, XU Xianglin. Nd-Sr-Pb Isotopic Geochemistry of Scheelite from the Woxi W-Sb-Au Deposit, Western Hunan: Implications for Sources and Evolution of Ore-forming Fluids[J]. *Acta Geological Sinica*, 2006, 80(4): 561-570.
- 秦拯纬. 北秦岭造山带早古生代岩浆作用及其大陆地壳演化意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- QIN Zhengwei. Early Paleozoic Magmatism in the North Qinling Orogenic Belt and Its Implications for Continental Crust Evolution[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- 沈能平, 苏文超, 符亚洲, 等. 贵州独山巴年锑矿床硫、铅同位素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. *矿物学报*, 2013, 33(3): 271-277.
- SHEN Nengping, SU Wenchao, FU Yazhou, et al. Characteristics of Sulfur and Lead Isotopes for Banian Antimony Deposit in Dushan Area, Guizhou Province, China: Implication for Origin of Ore-forming Materials[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, 33(3): 271-277.
- 孙非非, 张爱奎, 刘智刚, 等. 东昆仑西段阿其音金矿成矿流体特征及其成因机制[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 82-94.
- SUN Feifei, ZHANG Aikui, LIU Zhigang, et al. Analysis of the Genesis and H-O-S-Pb Isotopic Characteristics of Aqiyin Gold Deposit in the Western Section of the East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 82-94.
- 陶琰, 高振敏, 金景福, 等. 湘中锡矿山式锑矿成矿物质来源探讨[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(1): 14-20.
- TAO Yan, GAO Zhenmin, JIN Jingfu, et al. The Origin of Ore-Forming Fluid of Xikuangshan-Type Antimony Deposits in Central Hunan Province[J]. *Geology Geochemistry*, 2001, 29(1): 14-20.
- 唐明锋. 陕西省旬阳县公馆-青铜沟汞锑金成矿带控矿构造与成矿作用专题研究[R]. 2021.
- 王登红. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. *地质学报*, 2019, 93(6): 1189-1209.
- WANG Denghong. Study on critical mineral resources, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting,

- problems of utilization, and direction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(6): 1189–1209.
- 王长春, 袁攀, 吴新斌, 等. 陕西略阳东沟坝多金属矿床地质特征及成矿规律研究[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 300–315.
- WANG Changchun, YUAN Pan, WU Xinbin, et al. Study on Geological Characteristics and Metallogenic Regularity of the Donggouba Polymetallic Deposit in Lueyang, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 300–315.
- 王强, 刘振川, 车伟锋. 陕西省旬阳县张坪-西岔汞锑多金属矿成矿地质条件分析[J]. *科技创新与应用*, 2019, (17): 69–70.
- WANG Qiang, LIU Zhenchuan, CHE Weifeng. Analysis of metallogenic geological conditions of Zhangping-Xicha mercury-antimony polymetallic deposit in Xunyang County, Shaanxi Province[J]. *Technology Innovation and Application*, 2019, (17): 69–70.
- 王绪现. 商县高岭沟—丹凤蔡凹锑矿带主要控矿因素和成因探讨[J]. *西北地质*, 1985, (5): 28–37.
- WANG Xuguan. Discussion on main ore-controlling factors and genesis of Gaolinggou-Danfeng Caiwa antimony ore belt in Shangxian County[J]. *Northwestern Geology*, 1985, (5): 28–37.
- 王淑玲. 锑资源形势分析[J]. *中国有色金属*, 2009, (24): 64–65.
- WANG Shuling. Situation analysis of antimony resources[J]. *Chinese Non-ferrous Metals*, 2009, (24): 64–65.
- 肖宪国. 贵州半坡锑矿床年代学、地球化学及成因[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- XIAO Xianguo. Geochronology, Ore Geochemistry and Genesis of the Banpo Antimony Deposit, Guizhou Province, China[D]. Kunming: Kunming University, 2014.
- 向舜. 陕西旬阳公馆 Hg-Sb 矿床成矿流体地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- XIANG Shun. Geochemical study on ore-forming fluids of the Gongguan Hg-Sb deposit in Xunyang mansion, Shaanxi Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- 赵圣涛, 毛世德, 张文高, 等. 辉锑矿在热液中的溶解度与沉淀机制: 来自热力学计算的约束[J]. *地球化学*, 2025, 12(1): 1–12.
- ZHAO Shengtao, MAO Shide, ZHANG Wengao, et al. Stibnite solubility and precipitation in hydrothermal fluids: Constraints from thermodynamic modeling[J]. *Geochimica*, 2025, 12(1): 1–12.
- 张拴厚, 韩芳林, 王根宝, 等. 陕西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- 张勇, 邵志刚, 陈伟男. 陕西商洛市商州区看山寺金锑矿地质特征及找矿方向[J]. *能源研究与管理*, 2022, 14(3): 42–47.
- ZHANG Yong, SHAO Zhigang, CHEN Weinan. Geological Characteristics and Prospecting Direction of Kanshansi Au-Sb Deposit, Shangzhou District, Shangluo City, Shaanxi Province[J]. *Energy Research and Management*, 2022, 14(3): 42–47.
- 张颖, 陈衍景, 郝进平, 等. 陕西旬阳公馆—青铜沟汞锑矿床地球化学研究[J]. *矿物学报*, 2010, 30(1): 1–8.
- ZHANG Yin, CHEN Yanjing, HAO Jinping, et al. Geochemistry of Gongguan-Qingtonggou Hg-Sb deposit in Xunyang, Shaanxi Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2010, 30(1): 1–8.
- 周艳晶, 李建武, 王高尚, 等. 全球锑矿资源分布及开发现状[J]. *中国矿业*, 2014, 23(10): 13–16.
- ZHOU Yanjing, LI Jianwu, WANG Gaoshang, et al. Distribution and development situation of global antimony resources[J]. *China Mining Magazine*, 2014, 23(10): 13–16.
- 中国自然资源报. 北秦岭高岭沟——五里川成矿带找锑获进展[J]. *黄金科学技术*, 2024, 32(1): 54.
- China Natural Resources News. Progress in finding antimony in the Gaolinggou-Wulichuan metallogenic belt, North Qinling Mountains[J]. *Gold Science and Technology*, 2024, 32(1): 54.
- 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 1–330.
- Breeding M. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge: implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999, 155(1–2): 77–90.
- Drummond S E, Ohmoto H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems[J]. *Economic Geology*, 1985, 80(1): 126–147.
- Douville E, Bienvenu P, Charlou J L, et al. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(5): 627–643.
- Fu S L, Hu R Z, Bi X W, et al. Trace element composition of stibnite: Substitution mechanism and implications for the genesis of Sb deposits in southern China[J]. *Applied Geochemistry*, 2020, 118: 104637.
- Li W, Xie G Q, Mao J W, et al. Precise age constraints for the Woxi Au-Sb-W deposit, south China[J]. *Economic Geology*, 2023, 118(2): 509–518.
- Krupp R E. Solubility of stibnite in hydrogen sulfide solutions, speciation and equilibrium constants from 25 to 350 °C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52: 3005–3015.
- Ohmoto H, Rye R O. Isotopes of sulfur and carbon[M]. New York: Wiley, 1979, 979: 509–567.
- Olsen N J, Mountain B W, Seward T M. Antimony (III) Speciation in Hydrosulfide Solutions from 70 to 400 °C and up to 300 bar[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2019, 3: 1058–1072.
- Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67(5): 551–578.
- Papike J J, Fowler G W, Shearer C K, et al. Ion microprobe investigation of plagioclase and orthopyroxene from lunar Mg-suite norites: Implications for calculating parental melt REE concentrations and for assessing postcrystallization REE redistribution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(20): 3967–3978.
- Seal R R. Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 61(1): 633–677.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model[J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1–2): 135–162.