

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.085>



云南金顶铅锌矿成矿时代厘定：来自沥青 Re-Os 同位素证据

孙鹏程^{1,2}, 李超^{1,2*}, 周利敏^{1,2}, 屈文俊^{1,2}, 王登红³, 高兰³, 李伟⁴, 李欣尉^{1,2},
赵鸿^{1,2}, 杜安道^{1,2}

1. 国家地质实验测试中心, 北京 100037
2. 中国地质调查局 Re-Os 同位素地球化学重点实验室, 北京 100037
3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
4. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局七总队, 贵州贵阳 550005

摘要：MVT型铅锌矿由于成矿温度低, 目前没有发现十分合适的定年矿物, 此外, 由于多期成矿作用叠加以及成矿物质存在多元混合, 严重制约了对此类矿床成矿年代学研究。前人对云南金顶超大型MVT铅锌矿床成因、物质来源、成矿条件等方面研究取得了重要成果, 但对其形成时代各有所云, 至今仍未定论。笔者在总结了大量前人研究成果的基础上, 通过对跑马坪和架崖山矿段沥青样品开展Re-Os同位素定年研究, 表明古油藏形成于59.1 Ma, 金顶铅锌矿床的形成时代可能为27.7 Ma。早期的油气藏为后期铅锌矿的形成提供了十分重要的条件, 穹隆构造为金属成矿提供了储矿空间, 由于遭受构造及热液作用的破坏, 油气裂解释放大量的还原性物质, 为Pb、Zn等成矿物质迁移、富集、沉淀提供了重要载体, 进而形成了金顶超大型铅锌矿床。研究结果表明, 沥青Re-Os同位素不仅能够为MVT型铅锌矿床成矿年龄的厘定提供一种有效的技术途径, 同时还能够为油气藏的生成、破坏等事件发生时代提供有利依据。

关键词：MVT型铅锌矿; Re-Os; 成矿时代; 动力学背景; 沥青; 矿床。

中图分类号: P581 文章编号: 1000-2383(2021)12-4247-13 收稿日期: 2021-04-21

Dating Metallogenic Age of Jinding Pb-Zn Deposit in Yunnan: Evidence from Re-Os Isotope of Bitumen

Sun Pengcheng^{1,2}, Li Chao^{1,2*}, Zhou Limin^{1,2}, Qu Wenjun^{1,2}, Wang Denghong³, Gao Lan³, Li Wei⁴,
Li Xinwei^{1,2}, Zhao Hong^{1,2}, Du Andao^{1,2}

1. National Geological Experiment and Testing Center, Beijing 100037, China
2. Key Laboratory of Re-Os Isotope Geochemistry, China Geological Survey, Beijing 100037, China
3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
4. Non-Ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau Brigade No.7 of Guizhou, Guiyang 550005, China

Abstract: Due to the low mineralization temperature, no suitable dating minerals have been found in the MVT type lead-zinc deposit at present. In addition, due to the superposition of multi-stage mineralization and the existence of multiple mixing of ore-forming materials, it seriously restricted the study on mineralization chronology of this type of deposit. Some achievements have

基金项目:国家自然科学基金(No.41873065);科技部重点研发计划项目(No.2020YFA0714800)。

作者简介:孙鹏程(1992—),男,硕士研究生,主要从事Re-Os分析测试工作。ORCID: 0000-0002-5784-1084. E-mail: pengchengsun1225@163.com

*通讯作者:李超,E-mail:Re-Os@163.com

引用格式:孙鹏程,李超,周利敏,等,2021.云南金顶铅锌矿成矿时代厘定:来自沥青Re-Os同位素证据.地球科学,46(12):4247-4259.

been made on the genesis, material source and metallogenic conditions of the super-large MVT lead-zinc deposit in Jinding, Yunnan. However, the age of deposit formation is still uncertain. On the basis of summarizing a large number of previous study results and combining the Re-Os isotopic dating results of fresh bitumen samples taken from Paomaping and Jiayashan ore sections, it shows that the ancient oil reservoirs was formed at 59.1 Ma, and the formation age of Jinding lead-zinc deposit might be 27.7 Ma. Ancient reservoirs are of greatly important condition on formation of lead-zinc mine, the tectonic domes provided storage space for metal mineralization. On account of the structure and hydrothermal process in damage, cracking of oil and gas meantime release large amounts of reducing substances, which provides important carrier for Pb, zinc and other ore-forming materials migration, enrichment and precipitation, thus formed the Jinding super-large Pb-Zn deposit. The results confirm that asphalt Re-Os isotope can not only provide an effective technical way to determine the metallogenic age of MVT type lead-zinc deposit, but also provide a favorable basis for the generation and destruction age of the oil and gas reservoirs.

Key words: MVT type lead-zinc ore; Re-Os; metallogenic age; dynamic background; bitumen; deposits.

0 引言

密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床是全球最重要的铅锌矿床类型之一,提供了世界上约27%的铅锌金属(Leach *et al.*, 2005).此类矿床由于勘察发现早,储量大,受到了地质研究者的广泛关注,已在地质勘察、成矿规律和成矿模型等方面取得了重要的成果,包括成矿物质来源、金属元素的迁移及富集机制、生物及有机质在矿床形成过程的作用、共生矿物组合、成矿流体及成矿的物理化学条件和矿床的成矿模型等.但由于成矿温度低,体系易受后期地质事件的扰动,目前尚未发现有理想的定年矿物.此外,MVT型矿床与侵入岩相关矿床成矿作用不同,后者的成矿持续时间较短,而前者的成矿作用往往表现为多期次、持续时间可长达10 Ma,且成矿物质来源存在多元混合(Leach and Sangster, 1993, 2001; Basuki and Spooner, 2002; Zhu *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020).这极大的制约了对MVT型铅锌矿成矿规律的剖析和此类矿床的找矿突破.

金顶铅锌矿是目前我国发现的最大的硫化物型铅锌矿床,在世界范围内也属于超大型铅锌矿床.但由于其地质背景、成矿流体演化尤为复杂,其成矿年代学问题一直未能解决.自20世纪90年代探明以来,不同学者对其成矿时代进行了广泛研究,多数认为该矿床的形成主要限于72 Ma以内(李小明等,2000;高炳宇等,2012;王安建等,2009),但模糊的成矿时代证据无疑阻碍了研究者对金顶铅锌矿床的成矿过程及矿床成因的精细剖析.近年来,Re-Os同位素已成功应用于对金属硫化物矿床的精确定年以及成矿物质来源的示踪(蒋少涌等,2000;靳新娣等,2010;李超等,2016).其中以辉钼矿

Re-Os定年(侯增谦等,2003;郭保健等,2006;唐菊兴等,2010;董随亮等,2019)技术最为成熟,然而,在MVT型铅锌低温矿床中,辉钼矿并不发育.其他金属硫化物(如黄铁矿)近年来在岩浆、热液金属矿床中的应用报道也越来越多(Huang *et al.*, 2015),但由于金顶铅锌矿床中黄铁矿形成阶段多、成因复杂,使得其应用存在较大难度.

Anderson(1991)发现有机质参与了MVT型铅锌矿床的形成.我国学者(胡古月等,2013;任顺利等,2018)也发现,MVT型铅锌矿床中有机质和Pb、Zn等金属密切共生(如四川赤普、陕西马元、湖南花垣等铅锌矿).Re和Os具有亲有机性,在富有机质的样品(如沥青、原油、油砂等)中含量较高,且其中Re-Os体系封闭性较好(沈传波等,2011;李超等2012).因此,采用富有机质样品Re-Os技术来厘定金属矿床的形成时代具有极大的潜力.但有机质Re-Os年龄存在一定的争议,可能代表古油气藏的生成时代,也能够代表古油藏破坏事件.本文以云南金顶铅锌矿中沥青样品为研究对象,探讨沥青Re-Os封闭性、沥青Re-Os年龄的地质意义以及对金顶铅锌矿成矿时代的指示.

1 地质背景和矿床地质

金顶铅锌矿区在大地构造单元中位于青藏高原东南缘,印支地块北部,东部与扬子地块连接、西部靠近保山地块.分别与澜沧江断裂带、红河断裂带构成了该地块的东西边界断裂(王国芝等,2001),该矿床在区域上位于云南兰坪盆地(图1).按照板块构造理论,该成矿区处在印度板块与欧亚板块的交汇部位,受喜马拉雅造山作用严重影响.三江地区的地质构造演化经历了3次特提斯洋的闭

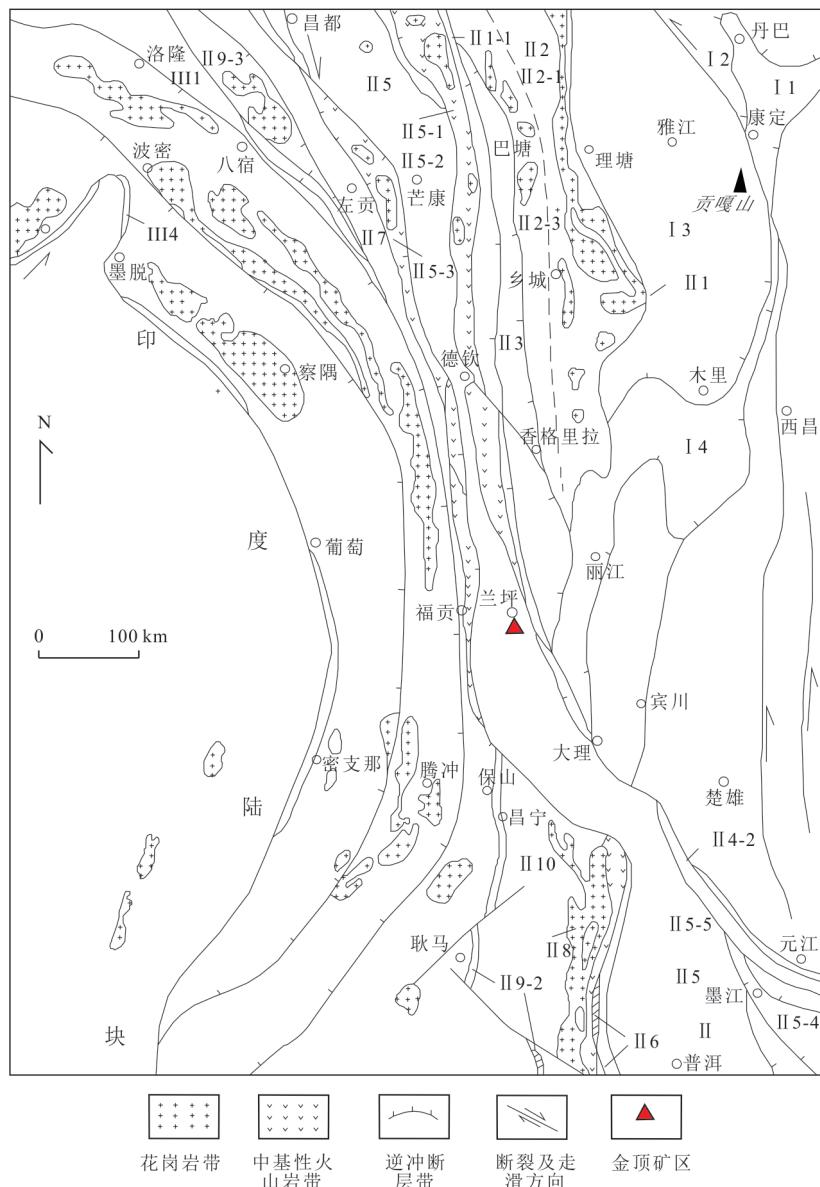


图1 西南三江(南段)地区大地构造图

Fig.1 The geotectonic zoning map of the “three rivers” (south section) area in the Southwest China

I. 扬子陆块：I 1. 龙门山逆冲带，I 2. 巴颜喀拉前陆盆地，I 3. 雅江残余盆地，I 4. 盐源—丽江陆缘坳陷带，I 5. 楚雄前陆盆地；II. 三江多岛弧盆系：II 1. 甘孜—理塘结合带，II 2. 德格—乡城岛弧（义敦岛弧）；II 2-1. 雀儿山—稻城外弧带，II 2-2. 结古—义敦弧后盆地带，II 3. 中咱—香格里拉地块；II 4. 金沙江—哀牢山结合带；II 4-1. 金沙江蛇绿混杂带，II 4-2. 哀牢山蛇绿混杂带，II 5. 昌都—普洱地块；II 5-1. 江达—几家顶—维西陆缘火山弧，II 5-2. 昌都—芒康双向弧前陆盆地，II 5-3. 杂多—东达山陆缘火山弧，II 5-4. 墨江—绿春陆缘火山弧，II 5-5. 兰坪—普洱双向弧后前陆盆地，II 5-6. 云县—景洪晚陆缘火山弧；II 6. 澜沧江结合带；II 7. 左贡地块；II 8. 临沧岩浆弧；II 9. 班公湖—怒江—昌宁—孟连结合带；II 9-1. 班公湖—怒江结合带，II 9-2. 昌宁—孟连结合带，II 9-3. 嘉玉桥残余弧带，II 10. 保山地块；III. 冈底斯—高黎贡山—腾冲弧盆系：III 1. 沙丁—洛隆弧前盆地，III 2. 波密—腾冲岩浆弧，III 3. 下察隅岩浆弧，III 4. 雅鲁藏布江结合带；据李文昌等（2014）改编

合和拉张,印支—燕山、燕山—喜马拉雅的2次强烈碰撞造山作用及壳幔物质交互作用等复杂的地质演化过程(李兴振等,1999),使得兰坪中新生代盆地发生一系列不同端元物质的混合、不同地层的汇聚及离散等。其中,对三江地区影响最大的是喜马拉雅期印度板块与欧亚板块的汇聚和碰撞,引发了

一系列区域变质作用、深部流体与地壳浅部流体的混染及深部流体的对流等。造成区域内地层的升降、断层广泛发育、岩浆作用频繁,这被认为是该区域新生代矿床形成的关键因素之一。此外,由这次构造作用引发的热事件被认为是造成该区域内金属及成矿物质的迁移和富集的主要原因(曾荣等,

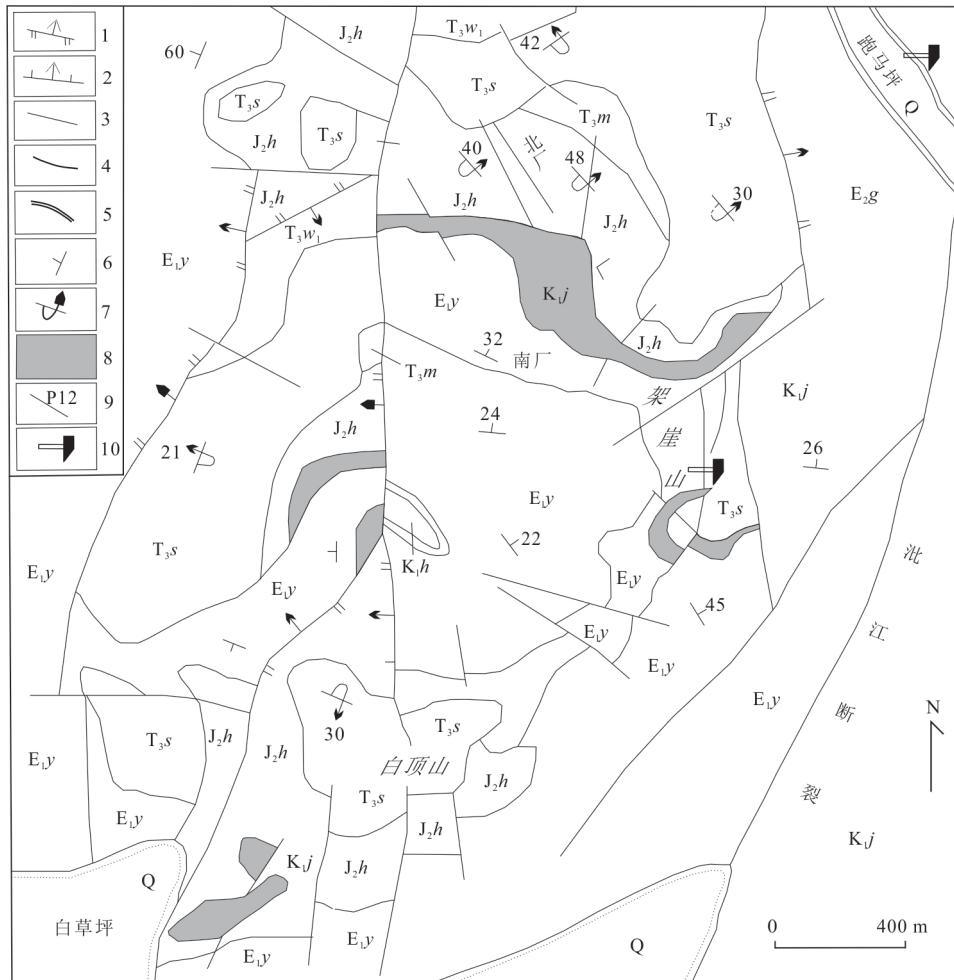


图2 金顶铅锌矿床矿区地质图

Fig.2 Geological map of the Jinding lead-zinc ore district

1.逆冲推覆断层;2.正断层;3.性质不明断层;4.地层界限;5.不整合面;6.岩层产状;7.倒转岩层产状;8.Pb-Zn矿体;9.勘探线及编号;10.采样位置;Q.第四系; E_2g .始新统果郎组; E_1y .古新统云龙组; K_1h .下白垩统虎头寺组; K_2j .下白垩统景星族; J_2h .中侏罗统花开佐组; T_3m .上三叠统麦初箐组; T_3w_1 .上三叠统挖鲁八组; T_3s .上三叠统三合洞组.图据云南地质三队,1989.云南省兰坪县金顶铅锌矿详细勘探地质报告.云南省地质矿产局,昆明

2005;侯增谦等,2008;宋玉财等,2011;杨天南等,2019),金顶超大型铅锌矿床正是在这种构造背景下形成的。

以构造推覆面为界限,可以把矿区内地层划分A和B为两部分,即A(外来系统)和B(原生系统).其中,A倒置于构造推覆面之上,自上而下由三叠系上统、侏罗系及少部分白垩系下统地层组成(薛春纪等,2002).上三叠统三合洞组(T_3s)岩性主要为灰岩夹杂少量的泥岩及砂岩,上三叠统麦初箐组(T_3m)以含碳质页岩和粉砂岩,中侏罗统花开佐组(J_2h)以泥岩为主夹杂少量的层状砂岩,下白垩统景星组(K_1j)上部为石英砂岩,底部为含砾砂岩、粉砂岩,其主要为含矿层位.B主要为老第三系云龙组(E_1y)地层,其中跑马坪矿段偶尔可见出露的始新统

果郎组(E_2g)地层.云龙组(E_1y^b)以灰岩及砂岩为主,与下伏上白垩统虎头寺组(K_2h)的长石石英砂岩呈不整合接触. $Pb-Zn$ 矿体主要形成于白垩系下统的景星组(上含矿层)与老第三系云龙组上段(下含矿层)的构造接触面之间(曾荣等,2005).总体来看,矿区以碳酸盐岩最为普遍,砂岩次之(宋玉财等,2011).

矿床由跑马坪、西坡、架崖山、北厂、南厂、白草坪、蜂子山7个矿段组成(图2),矿区发育多处断裂,Pb-Zn矿体受穹隆构造控制,由一系列近水平发育的逆冲断层和构造圈闭而成(王长明等,2017).矿体的产出位置靠近逆冲断裂及相关断裂(薛春纪等,2002;宋玉财等,2011).矿区的矿石主要为砂岩、灰岩及少量的角砾岩,区内未见岩浆岩和火山岩出露.

砂岩型矿石主要赋存于含矿层的上部,如架崖山、白草坪、北厂、蜂子山等矿段。含矿层的底部由灰岩及角砾岩构成,如跑马坪、架崖山、南厂等矿段。矿石矿物以方铅矿、闪锌矿、黄铁矿及黄铜矿等硫化物矿物为主。脉石矿物主要有石英、天青石、重晶石、方解石、石膏、及一些碎屑矿物。矿区围岩蚀变以硅化、沥青化、重晶石化、天青石化、方解石化、赤铁矿化等为主,与矿化关系密切的蚀变有重晶石化、天青石化和方解石化等。

2 样品及分析方法

样品采自云南金顶铅锌矿跑马坪和架崖山矿段地表矿石堆中(图3a)。沥青主要包括两种产状:一是呈团块状充填于角砾岩型矿石的晶洞中;二是呈网脉状、细脉状充填于角砾岩型矿石、砂岩型矿石裂隙中,肉眼可见沥青呈亮黑色,具贝壳状断口,表明其正处在中-高演化阶段,在成矿过程中很可能经历了复杂的热演化过程(图3b~3d)。采用装有人造金刚石钻头的微钻取样器将沥青样品钻取下来,然后在镜下对沥青样品进行挑纯。

准确称取沥青样品于细颈漏斗加入到长20 cm, 直径2 cm的Carius管底部。采用2 mL 15 mol/L盐酸将¹⁸⁵Re-¹⁹⁰Os混合稀释剂转入用液氮冷冻的Carius管之后,再依次加入5 mL 15 mol/L

硝酸和2 mL 30% H₂O₂,然后用液化石油气和氧气火焰封闭Carius管,在230 °C条件加热24 h(李超等,2010)。

将溶好冰冻的Carius管在细颈处打开,向管中加入超纯水定容至25 mL采用直接蒸馏法对Os进行分离富集。将Carius管蒸馏残液转入150 mL Teflon烧杯中,将其置于电热板上,加热近干。在10 mol/L NaOH碱性介质中,采用丙酮对Re进行萃取,丙酮蒸干后,加入5 μL超纯水,用于点带。

首先将焊好的Pt带在空气中以4.5 A的电流去气0.5 h,然后用微量移液器将溶液点在Pt带上(每次取0.2 μL),以1 A电流蒸干。当溶液全部点带蒸干后,缓慢升高电流至1.5 A,持续1 min赶尽多余的杂质,随后降下电流。用微量移液器取发射剂0.3 μL Ba(OH)₂溶液点在试样上,以0.6 A电流蒸干,可看到乳白色的沉淀覆盖在Pt带上。随后缓慢升高电流至乳白色沉淀开始熔化成像冰一样的状态,而后降低电流。

采用热表面电离质谱仪 Triton-plus 对同位素比值进行测定。对测量数据利用O同位素自然丰度和统计学中等概率模型采用逐级剥谱法进行O同位素干扰扣除。采用普通Re ¹⁸⁵Re/¹⁸⁷Re=0.597 38作为外标进行Re同位素质量分馏校正,采用¹⁹²Os/¹⁸⁸Os=3.082 7(Nier, 1940)作为内标迭代法对Os进行质量分馏校正。

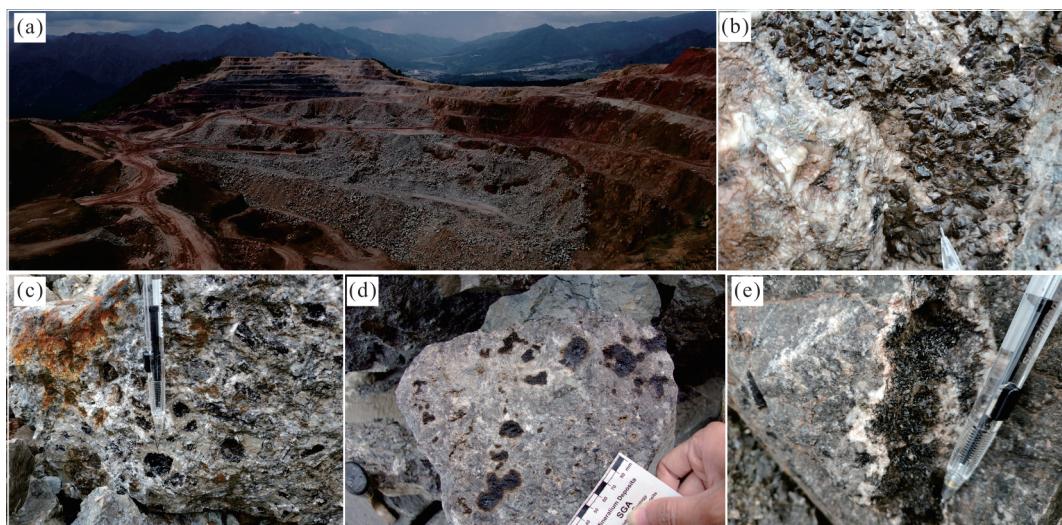


图3 金顶铅锌矿区采样位置(a),沥青以团块状充填于含砾砂岩和砂岩晶洞中(b,c,d)以及以脉状充填于角砾岩型矿石、砂岩型矿石裂隙中(e)

Fig.3 Sample location of Jinding Pb-Zn deposit (a), bitumen is packed in pebbled sandstone and sandstone crystal cavity (b, c, d) as well as stocked in vein-like in breccia type ore and sandstone type ore(e)

3 分析结果

云南金顶铅锌矿跑马坪和架崖山矿段细脉状沥青 Re-Os 同位素数据结果如表 1 所示, 架崖山矿段的 Re、普通 Os 和 ^{187}Os 含量分别为 23.22~359.00 ng/g、0.059 5~1.092 0 ng/g 和 0.048 4~0.823 3 ng/g。跑马坪矿段的 Re、普通 Os 和 ^{187}Os 含量分别为 41.92~1 192.00 ng/g、普通 Os 含量为 0.053 7~3.297 ng/g 和 0.097 3~2.955 0 ng/g。采用 ISOPLOT 程序 (Ludwig, 2003) 拟合沥青 Re-Os 等时线, 得到等时线年龄为 27.7 Ma 和 59.1 Ma (图 4)。初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 分别为 5.41±0.14 和 4.57±0.24。高炳宇等 (2012) 获得架崖山矿段沥青 Re-Os 等时线为 68±5 Ma, 初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 为 4±1, 表明沥青形成年

代越老, 初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 越小, 且 Re-Os 等时线在 60 Ma 左右时, 初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 在误差允许的范围内基本一致。而 27.7 Ma 对应的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 明显大于 59.1 Ma 时期的值 (主要由 ^{187}Re 在 59.1~27.7 Ma 期间放射性衰变积累), 说明两阶段的沥青氧化程度不一。综合分析表明, 架崖山和跑马坪矿段大规模成矿期的成矿物质来源一致。

4 讨论

4.1 沥青 Re-Os 地质意义

Re、Os 具有亲有机性, 地层沉积的过程中, 其中的有机质能够吸附富集海水中的 Re、Os, 沉积岩的沉积过程也是其中 Re-Os 体系封闭计时的过程。

表 1 云南金顶铅锌矿沥青 Re-Os 同位素数据

Table 1 Re-Os isotope data of bitumen from Jinding lead-zinc deposit in Yunnan

原样名	样重(g)	Re (ng/g)		普 Os(ng/g)		$^{187}\text{Os}(\text{ng/g})$		$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$		$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
PMP-2-3	0.236	1 192	9.74	1.146 0	0.013 0	1.419 0	0.014 0	5 025	71	9.514	0.107
JYS-007-2	0.199	134.5	1.38	0.206 7	0.005 9	0.204 9	0.003 4	3 145	95	7.621	0.239
PMP-1-5	0.175	41.92	2.46	0.126 8	0.005 9	0.097 3	0.001 1	1 757	132	5.895	0.276
PMP-2-2	0.180	1 313	12.21	3.297 0	0.055 0	2.955 0	0.034 0	1 923	37	6.612	0.117
JYS-012-1	0.078	359.0	3.33	0.910 7	0.009 4	0.776 9	0.008 1	1 904	26	6.556	0.069
PMP-1	0.200	377.5	3.25	0.053 7	0.001 0	0.265 5	0.002 9	33 948	695	37.990	0.720
PMP-1-1	0.161	388.6	3.12	0.065 4	0.002 2	0.280 8	0.003 2	28 696	993	32.980	1.120
JYS-012-2	0.222	176.4	1.33	1.092 0	0.013 0	0.823 3	0.008 3	780.3	11.1	5.793	0.069
JYS-012-3	0.204	289.8	2.80	0.644 8	0.006 2	0.541 1	0.004 8	2 171	29	6.449	0.053
JYS-2	0.266	23.22	0.20	0.059 5	0.000 4	0.048 4	0.000 4	1 885	21	6.253	0.021
JYS-007	0.203	153.4	1.34	0.200 3	0.002 4	0.185 8	0.002 1	3 698	55	7.126	0.094
JYS007-3	0.218	82.1	0.60	0.232 4	0.002 1	0.187 3	0.001 8	1 707	20	6.193	0.050

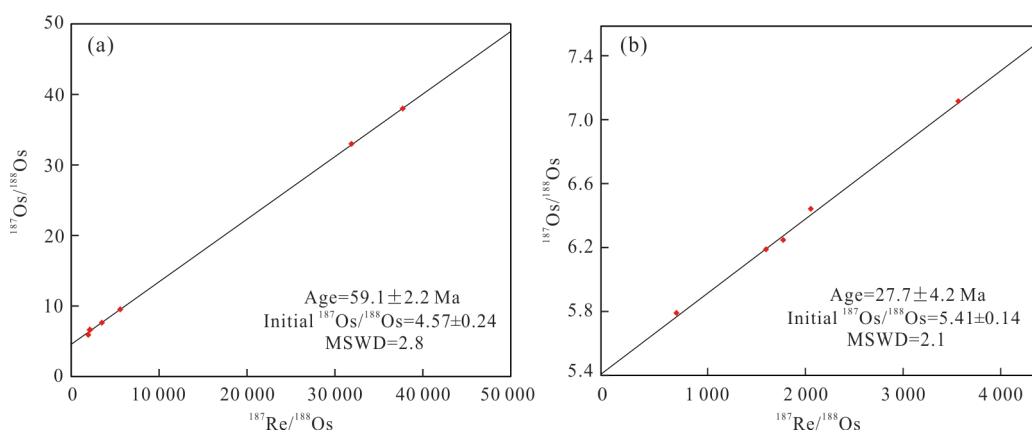


图 4 金顶铅锌矿沥青 Re-Os 等时线年龄

Fig.4 Re-Os isochron ages of bitumen in Jinding lead-zinc deposit

a. 跑马坪矿段和架崖山;b. 架崖山矿段

因此,富有机质沉积岩 Re-Os 年龄可以代表沉积岩的沉积时代。当富有机质的沉积岩发生有机质熟化之后,Re、Os 随着有机质的迁移进入原油中,在有机质的迁移过程中,由于热效应和物理混合过程,使得 Re-Os 同位素体系发生重置,重新计时,因此,原油 Re-Os 年龄能够代表油气藏形成时代。事实上,Re、Os 主要赋存在原油的沥青质中,如果在烃源岩熟化之后,不具备成藏条件,或者油气藏遭受破坏之后,原油中烃类等轻组分挥发分解,而沥青质经常以沥青的形式保存下来。因此,沥青 Re-Os 年龄可能代表油气成藏时代,也有可能代表油气藏发生破坏时代。此外,MVT 型铅锌矿床中经常发育大量沥青,前人(Anderson, 1991)研究表明,MVT 型铅锌矿的形成与有机质有密切的联系。沥青 Re-Os 体系为厘定 MVT 型铅锌矿床提供了理论基础。

Re-Os 同位素体系在有机质中封闭性较好,在氧化条件下,Re 和 Os 以高价态的形式存在于流体,且易于迁移;在还原条件下以低价态形式存在,活动性较弱,易于与有机质结合(Yoshiro *et al.*, 2007),主要呈有机络合物、化学吸附等形式存在于有机体系(干酪根、沥青、原油)并长期处于稳定状态(Selby *et al.*, 2007; 沈传波等, 2015)。有机质 Re-Os 同位素除了能够精确厘定地层沉积、油气成藏、古油藏破坏时代之外(沈传波等, 2019),还能够利用初始 Os 同位素比值,揭示地层沉积环境、油气藏烃源岩等信息。

富有机质的沉积岩中 Os 来自海水,沉积岩的 Re-Os 等时线年龄可以准确反应地层的形成时代,初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 可以代表古海水中的 Os 同位素特征。因此,沥青 Re-Os 等时线年龄能够代表油气藏形成时代或者古油藏破坏时代,初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 可

用于判别油气烃源岩。

金顶铅锌矿主要赋存于金顶穹窿构造内部。薛春纪等(2009)发现矿石中发育多种成熟的有机质(沥青、原油、重油等),还存在有机质包裹体。付修根等(2006)通过系统的野外观察,发现在金顶矿区的含矿地层以及不含矿的三叠系灰岩等围岩中也含有较高含量的有机质,且无机气相包裹体中也含有有机质组分。高炳宇等(2012)发现,金顶铅锌矿床存在大量沥青。这说明在某个地质时期曾发生过大规模油气成藏以及古油气藏的破坏事件。同时也揭示了有机质可能参与了金顶超大型铅锌矿床的形成。

4.2 金顶 MVT 型铅锌矿成矿时代

MVT 型铅锌矿床的成矿时代,一直是地质学的热点及难点。随着对 Re-Os 同位素的深入研究,Re-Os 体系亲有机性的发现(Selby and Creaser, 2005; Selby *et al.*, 2005),使得准确厘定 MVT 型铅锌矿床的成矿时代成为可能。朱弟成等(2003)研究表明,富有机质的沥青在 Pb、Zn 等成矿元素的迁移及富集过程起着重要作用。Selby *et al.*(2005)通过测定加拿大 MVT 型铅锌矿中的沥青形成年代,获得在误差范围内与闪锌矿的 Rb-Sr 年龄和古地磁定年一致,证实了沥青 Re-Os 年龄的可靠性。

云南金顶铅锌矿床是目前我国最大的硫化物型铅锌矿床,也是世界上少数几个 Pb、Zn 金属储量超过千万吨的超大型铅锌矿床。此矿床自发现以来,对于成矿时代一直存在争议。前人(李小明等, 2000; 修群业, 2008; 王安建等, 2009; 唐永永等, 2013; 高炳宇等, 2012; 宋祥峰, 2015)用了多种不同的测试手段及方法对云南金顶铅锌矿床的成矿时代进行厘定(表 2)。目前大多数矿床学家普遍接受

表 2 金顶铅锌矿成矿年龄统计
Table 2 Metallogenetic ages of Jinding lead-zinc deposit

定年方法	测试对象	年龄(Ma)	数据来源
裂变径迹	磷灰石	25.8~35.9	李小明等, 2000
Re-Os	黄铁矿	72.0±4.4	薛春纪等, 2003
锆石 U-Pb	矿石和砂质胶结物	225.0±7.8(最年轻)	修群业等, 2006a
花粉分析	含泥质细砂岩	晚三叠世	修群业等, 2006b
铅同位素	黄铁矿、铅锌矿	235	修群业等, 2006b
Rb-Sr	黄铁矿和闪锌矿	228±24	修群业, 2008
Re-Os	黄铁矿	65±10	唐永永等, 2013
Re-Os	沥青	68±5	高炳宇等, 2012
铅同位素	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿	181~229	唐永永等, 2013
铅同位素	方铅矿、闪锌矿、黄铁矿	119.1~229.9	宋祥峰, 2015

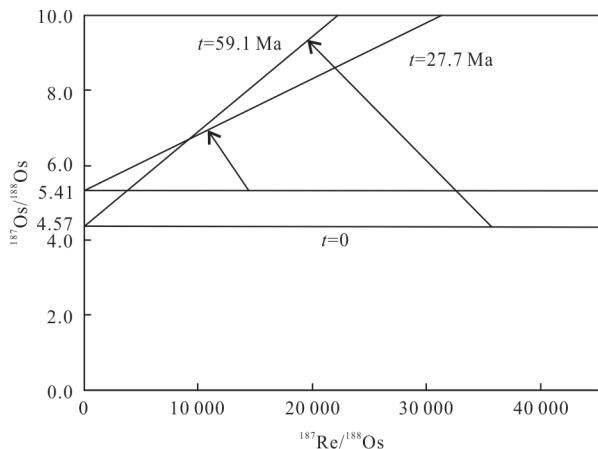


图 5 云南金顶铅锌矿区沥青 Re-Os 模拟演化线
Fig.5 Re-Os simulation evolution line of asphalt in Yunnan Jinding lead-zinc mining areas

的成矿时代为 28~72 Ma。这在很大程度上限制了对矿区动力学背景的精确定位,阻碍了对金顶铅锌矿床的成因、成矿物质来源、成矿过程等进一步研究。张金亮和常象春(2003)发现,金顶矿区的油气多见于上三叠统三合洞组的灰岩和角砾状灰岩含矿层中。而跑马坪铅锌矿体主要赋存于三合洞组地层和云龙组沉积地层之间。架崖山矿段露天采场多处可见古油气藏的残留遗迹,有机质热成熟现象显著(薛春纪等,2009)。金顶穹窿具备油气生成及储存的各种地质条件,且该区域广泛存在不同期次的碳沥青。薛春纪等(2009)研究表明,形成金顶超大型铅锌矿床需要大量的还原性硫(胡古月等,2013;李延河等,2013;任顺利等,2018),主要由古油气藏提供,少量来源于细菌还原硫酸盐。以上进一步说明金顶铅锌矿区曾经发生过与古油气藏生成或破坏有关的地质事件。

金顶铅锌矿床的形成与逆冲断层密切相关,该断层形成晚于云龙组沉积地层,云龙组地层形成时间为 55 Ma 左右,最新研究表明,云龙组地层可能形成于白垩纪(105.7 ± 1.4 Ma;曾招阳等,2020)。兰坪盆地形成之后的第一次大规模地壳水平运动发生于 37 Ma(余静,2016),进一步把铅锌矿床的形成年代限制在 37 Ma 以内。而矿化主岩的沉积时代为早白垩世:144~100 Ma(唐永永等,2013)。薛春纪等(2002)指出,在金顶铅锌矿区沿中央断裂带发育热变质作用,是兰坪盆地深大断裂活动和深部热液所致,时间为 31~24 Ma(阙梅英等,1998),金顶铅锌矿的大规模成矿事件可能与此次热变质事件有密切的联系。

综合前人的研究,笔者认为 59.1 Ma 代表了金顶油气藏的形成年代,27.7 Ma 代表古油气藏的破坏、熟化及运移时代,即金顶超大型铅锌矿的主成矿时期。金顶铅锌矿区沥青 Re-Os 同位素模拟演化线如图 5 所示,成矿模式见图 6。

4.3 金顶铅锌矿床成矿动力学背景

前人研究显示,早第三纪喜马拉雅期碰撞造山运动对西南三江兰坪地区的影响很大(侯增谦等,2008;宋玉财等,2011;Wang *et al.*, 2014),尤其是印度板块与欧亚板块之间的碰撞挤压,使得盆地沉积物强烈变形,期间形成了一系列褶皱和深大断裂。其中三江主干深断裂被认为是三江地区最主要的岩浆—变质—成矿带(侯增谦等,2008;宋玉财等,2011)。金顶逆冲推覆构造是兰坪盆地古新世云龙期后区域大型推覆构造的组成部分(薛春纪等,2002;邓军等,2011),是一种容矿构造,可为早期的油气藏提供了容矿空间及构造圈闭。金顶铅锌矿的形成和陆—陆碰撞造山阶段有着密不可分的联系(侯增谦等,2008)。兰坪盆地在古新世—中新世为走滑盆地发育阶段(周江羽等,2011),但规模相对较小,区内受到水平的挤压应力,原生地层在短期内快速增厚,并引发一系列构造—岩浆活动,这一过程促使原先赋存在地壳及地球深部的金属元素(Cu、Pb、Zn 等)活化,进一步发生迁移并就位于有利的构造位置。此过程可能为金顶铅锌矿的形成起到了预富集

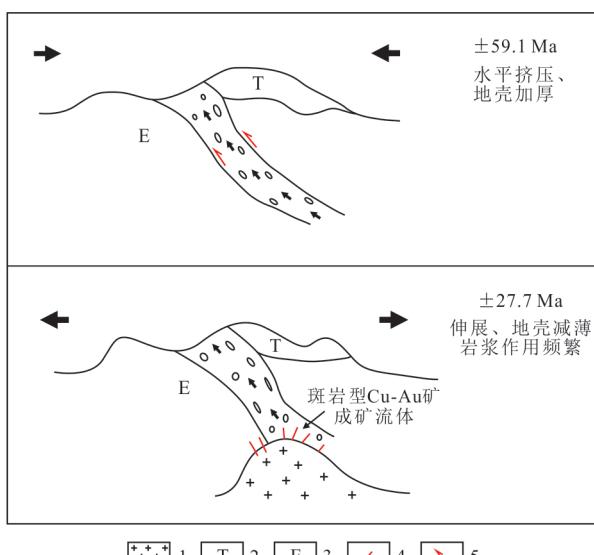


图 6 云南金顶铅锌矿区成矿模式
Fig.6 Metallogenetic model of Yunnan Jinding Pb-Zn ore-field
1. 岩体;2. 三叠纪地层;3. 新近纪地层;4. 脉体或裂隙;5. 断裂

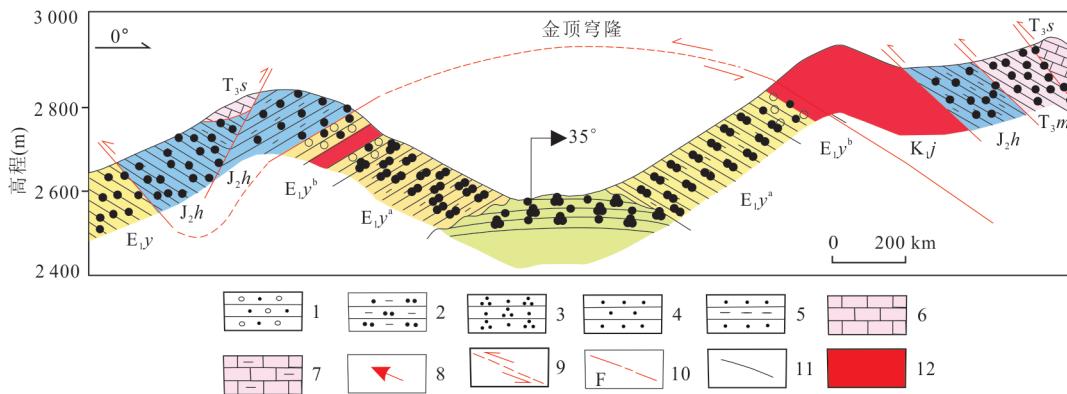


图7 金顶铅锌矿床穹隆构造剖面图

Fig.7 Dome structure profile of Jinding lead-zinc deposit

E_1y^b . 云龙组上段角砾岩和砂岩; E_1y^a . 云龙组下段粉砂泥岩; K_j . 下白垩统景星组粗砂岩和岩屑石英砂岩; T_3m . 上三叠统麦初箐组含膏盐粉砂—细砂岩; T_3s . 上三叠统三合洞组灰岩夹白云岩;1. 角砾岩和砂岩;2. 粉砂质泥岩;3. 石英砂岩及粉砂岩;4. 粉砂岩和细砂岩;5. 粉砂岩和泥岩;6. 灰岩;7. 泥质灰岩;8. 金顶穹隆区的外来系统的逆冲推覆界面;9. 性质不明断层;10. 地层界线;11. 新近纪中低温热液矿床;据曾普胜等(2016)改编

的作用。晚始新世—渐新世(33~28 Ma)随着造山作用的结束,区域水平挤压推覆逐渐向区域拉张伸展构造体制转换,幔源及地壳深部岩浆得以释放,促使前期赋存于地层浅部及深部的大量含矿流体活化,在热动力驱动下与白垩纪形成的富含有机质的前陆盆地流体及含大量金属元素的卤水混合,延着构造断裂带上升,最后圈闭在兰坪盆地穹窿构造内部有利部位(图7),形成了金顶超大型Pb-Zn矿床。这个构造转换过程被认为是有利成矿的(侯增谦等,2008;邓军等,2011)。59.1 Ma对应印度板块与欧亚板块主碰撞阶段,随着地壳加厚,烃源岩埋深加厚并发生熟化,形成古油藏。27.7 Ma对应后碰撞伸展阶段,古油藏遭受破坏,同时,大规模岩浆活动驱动盆地流体发生运移,携带大量Pb、Zn成矿物质流体与有机质发生混合,Pb、Zn等成矿元素被还原富集从而形成金顶超大型矿床(图6)。

5 结论

笔者在前人研究的基础上,通过总结金顶铅锌矿床的地质背景、跑马坪及架崖山碳沥青样品特征及Re-Os分析测试方法讨论展开讨论,获得如下认识。

(1) 沥青Re-Os定年不仅能够作为厘定MVT型铅锌矿床成矿年龄的有力工具,还可以为油气藏的形成、熟化及破坏事件发生时代提供有利的证据。

(2) 本次获得细脉状沥青Re-Os等时线年龄为59.1 Ma和27.7 Ma。其中,59.1 Ma可能代表了古油

气藏的形成时代,27.7 Ma可能代表了古油气藏的破坏、运移及熟化时代,同时也是金顶超大型铅锌矿床的大规模成矿年代。在铅锌矿大规模成矿时期,破坏了早期形成的油气藏,并为铅锌矿床的形成提供了赋矿空间、大量的还原性物质及富集迁移介质。

致谢:文章写作过程中得到昆明理工大学江小均教授指导,在绘图过程得到昆明理工大学硕士研究生彭强的帮助,审稿专家对文章提出了宝贵建议和意见,在此一并致以诚挚感谢。

References

- Anderson, G.M., 1991. Organic Maturation and Ore Precipitation in Southeast Missouri. *Economic Geology*, 86(5): 909–926. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.86.5.909>
- Basuki, N.I., Spooner, E.T.C., 2002. A Review of Fluid Inclusion Temperatures and Salinities in Mississippi Valley-Type Zn-Pb Deposits: Identifying Thresholds for Metal Transport. *Exploration and Mining Geology*, 11(1–4): 1–17. <https://doi.org/10.2113/11.1-4.1>
- Deng, J., Yang, L.Q., Wang, C.M., 2011. Research Advances of Superimposed Orogenesis and Metallogenesis in the Sanjiang Tethys. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2501–2509(in Chinese with English abstract).
- Dong, S.L., Zhang, Z., Li, G.M., et al., 2019. Re-Os Dating of Molybdenite from Gangqiongla Quartz-Vein Type Mo-Cu Deposit in Tibet and Its Geological Significance. *Earth Science*, 44(7): 2265–2274(in Chinese with English abstract).

- Fu, X.G., Lin, L., Pang, Y.C., et al., 2006. The Characteristics of Organic Matter and Its Mineralization in the Jinding Lead-Zinc Deposit, Yunnan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 33(6):621—630(in Chinese with English abstract).
- Gao, B.Y., Xue, C.J., Chi, G.X., et al., 2012. Re-Os Dating of Bitumen in the Giant Jinding Zn-Pb Deposit, Yunnan and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5):1561—1567(in Chinese with English abstract).
- Guo, B.J., Mao, J.W., Li, H.M., et al., 2006. Re-Os Dating of the Molybdenite from the Qiushawan Cu-Mo Deposit in the East Qinling and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2341—2348(in Chinese with English abstract).
- Hou, Z.Q., Qu, X.M., Wang, S.X., et al., 2003. The Molybdenite Re-Os Isotopic Dating of the Tibetan Plateau Gangdise Porphyry Copper Belt: Mineralization Time Limit and Application of Dynamic Background. *Science in China (Series D)*, 33(7):609—618(in Chinese).
- Hou, Z.Q., Wang, E.Q., Mo, X.X., et al., 2008. Orogeny and Related Metallogenesis by Continental Collision. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Hu, G.Y., Li, Y.H., Zeng, P.S., 2013. The Role of Halosalt in Mineralization of the Jinding Pb-Zn Deposit: Evidence from Sulfur and Strontium Isotopic Compositions. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1694—1702(in Chinese with English abstract).
- Huang, Y., Sun, X.M., Shi, G.Y., et al., 2015. Re-Os Dating of Sulphides from the Yushui Cu-Polymetallic Deposit in Eastern Guangdong Province, South China. *Ore Geology Reviews*, 70: 281—289. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.018>
- Jiang, S.Y., Yang, J.H., Zhao, K.D., et al., 2000. Re-Os Isotope Tracer and Dating Methods in Ore Deposits Research. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 36(6):669—677(in Chinese with English abstract).
- Jin, X.D., Li, W.J., Wu, H.Y., et al., 2010. Development of Re-Os Isotopic Dating Analytical Technique and Determination Know-How on ICP-MS Precise Dating for Molybdenite. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5):1617—1624(in Chinese with English abstract).
- Leach, D.L., Bradley, D., Lewchuk, M.T., et al., 2001. Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits through Geological Time: Implications from Recent Age-Dating Research. *Mineralium Deposita*, 36(8): 711—740. <https://doi.org/10.1007/s001260100208>
- Leach, D.L., Sangster, D.F., 1993. Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits. *Geological Association of Canada Special Paper*, 40(3):108—117.
- Leach, D.L., Sangster, D.F., Kelley, K.D., et al., 2005. Sediment-Hosted Lead-Zinc Deposits: A Global Perspective. *Economic Geology*, 100(Anniversary Volume): 561—607.
- Li, C., Pei, H.X., Wang, D.H., et al., 2016. Age and Source Constraints for Kongxintou Copper-Molybdenum Deposit Shandong from Re-Os Isotope in Molybdenite and Chalcopyrite. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 240—249(in Chinese with English abstract).
- Li, C., Qu, W.J., Du, A.D., et al., 2012. Study on Re-Os Isotope in Molybdenite Containing Common Os. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 702—708(in Chinese with English abstract).
- Li, C., Qu, W.J., Zhou, L.M., et al., 2010. Rapid Separation of Osmium by Direct Distillation with Carius Tube. *Rock and Mineral Analysis*, 29(1): 14—16(in Chinese with English abstract).
- Li, W.C., Xue, Y.X., Lu, Y.X., et al., 2014. Metallogenic Regularity for Porphyry Copper Deposits in China and Its Prospecting Direction. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Li, X.M., Tan, K.X., Gong, W.J., et al., 2000. Study on the Metallogenic Epoch of the Jinding Lead-Zinc Deposit with Apatite Fission Track Analysis. *Geotectonica et Metallogenesis*, 24(3): 282—286(in Chinese with English abstract).
- Li, X.Z., Liu, W.J., Wang, Y.Z., et al., 1999. Tectonic Evolution of the Tethys and Mineralization in the Sanjijingsheng Region, SW China. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Li, Y.H., Xie, G.Q., Duan, C., et al., 2013. Effect of Sulfate Evaporate Salt Layer over the Formation of Skarn-Type Iron Ores. *Acta Geologica Sinica*, 87(9): 1324—1334(in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K.R., 2003. Isoplot/Ex, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel, Version 3.00. Berkeley Geochronology Center, California.
- Nier, A.O., 1940. A Mass Spectrometer for Routine Isotope Abundance Measurements. *Review of Scientific Instruments*, 11(7): 212—216. <https://doi.org/10.1063/1.1751688>
- Que, M.Y., Cheng, D.M., Zhang, L.S., et al., 1998. Copper Deposits in Lanping-Simao Basin. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Ren, S.L., Li, Y.H., Zeng, P.S., et al., 2018. Effect of Sulfate Evaporate Salt Layer in Mineralization of the Huize and Maoping Lead-Zinc Deposits in Yunnan: Evidence from

- Sulfur Isotope.*Acta Geologica Sinica*, 92(5):1041—1055 (in Chinese with English abstract).
- Selby, D., Creaser, R.A., 2005. Direct Radiometric Dating of the Devonian-Mississippian Time-Scale Boundary Using the Re-Os Black Shale Geochronometer. *Geology*, 33(7): 545–548. <https://doi.org/10.1130/g21324.1>
- Selby, D., Creaser, R.A., Dewing, K., et al., 2005. Evaluation of Bitumen as a ^{187}Re - ^{187}Os Geochronometer for Hydrocarbon Maturation and Migration: A Test Case from the Polaris MVT Deposit, Canada. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1–2):1—15. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.018>
- Selby, D., Creaser, R.A., Fowler, M.G., 2007. Re-Os Elemental and Isotopic Systematics in Crude Oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(2): 378—386. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.09.005>
- Shen, C. B., Ge, X., Bai, X. J., 2019. Re-Os Geochronology Constraints on the Neoproterozoic-Cambrian Hydrocarbon Accumulation in the Sichuan Basin. *Earth Science*, 44(3):713—726(in Chinese with English abstract).
- Shen, C.B., Liu, Z.Y., Xiao, F., et al., 2015. Advancements of the Research on Re - Os Isotope System in Petroleum System. *Advances in Earth Science*, 30(2): 187—195(in Chinese with English abstract).
- Shen, C.B., Selby, D., Mei, L.F., et al., 2011. Advances in the Study of Re-Os Geochronology and Tracing of Hydrocarbon Generation and Accumulation. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 31(4):87—93(in Chinese with English abstract).
- Song, X.F., 2015. Genesis Mechanism on Superimposed Mineralization by Mantle-Crust Mixture of Jinding Super-Large Pb-Zn Deposit in Western Yunnan, China (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Song, Y.C., Hou, Z.Q., Yang, T.N., et al., 2011. Sediment-Hosted Himalayan Base Metal Deposits in Sanjiang Region: Characteristics and Genetic Types. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3):355—380(in Chinese with English abstract).
- Tang, J.X., Li, F.J., Li, Z.J., et al., 2010. Time Limit for Formation of Main Geological Bodies in Xiongcun Copper-Gold Deposit, Xietongmen County, Tibet: Evidence from Zircon U-Pb Ages and Re-Os Age of Molybdenite. *Mineral Deposits*, 29(3): 461—475(in Chinese with English abstract).
- Tang, Y.Y., Bi, X.W., Wu, L.Y., et al., 2013. Re-Os Isotopic Dating of Pyrite from Jinding Zn-Pb Ore Deposit and Its Geological Significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(3): 287—294(in Chinese with English abstract).
- Wang, A.J., Cao, D.H., Gao, L., et al., 2009. A Probe into the Genesis of Jinding Super-Large Lead-Zinc Ore Deposit. *Acta Geologica Sinica*, 83(1): 43—54(in Chinese with English abstract).
- Wang, C.M., Chen, J.Y., Yang, L.F., et al., 2017. Tectonic-Fluid-Mineral System in the Lanping Basin, Sanjiang Te-thys. *Acta Petrologica Sinica*, 33(7): 1957—1977(in Chinese with English abstract).
- Wang, C.M., Deng, J., Carranza, E.J.M., et al., 2014. Nature, Diversity and Temporal - Spatial Distributions of Sediment-Hosted Pb-Zn Deposits in China. *Ore Geology Reviews*, 56: 327—351. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.004>
- Wang, G.Z., Hu, R.Z., Wang, C.S., et al., 2001. Mineralization Geological Setting of Jinding Superlarge Pb-Zn Deposit, Yunnan. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(4):571—577(in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Li, B., Xiang, Z.P., et al., 2020. Chemical Compositions of Sulfides in the Porphyry Cu Ores, Yangla Cu Deposit, Yunnan, China: Implication for Ore Genesis. *Acta Geochimica*, 39: 947—972. <https://doi.org/10.1007/s11631-020-00433-3>
- Xiu, Q.Y., 2008. Provenance Characteristics and Metallogenetic Age of Jinding Deposit in Yunnan (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Xiu, Q.Y., Gao, L., Wang, A.J., et al., 2006a. Discovery of Paleoproterozoic Zircon SHRIMP Age from Jinding Deposit and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4):1040—1048(in Chinese with English abstract).
- Xiu, Q. Y., Wang, A. J., Gao, L., et al., 2006b. Discussion on the Geologic Time of Host Rocks of Jinding Superlarge Deposit and Its Geological Implications. *Geological Survey and Research*, 29(4):294—302(in Chinese with English abstract).
- Xue, C.J., Chen, Y.C., Wang, D.H., et al., 2003. Jinding and Baiyangping Deposits in NW Yunnan: Geology and He, Ne, Xe Isotopic Composition and Ore-Forming Time. *Science in China (Series D)*, 33(4):315—322(in Chinese).
- Xue, C.J., Chen, Y.C., Yang, J.M., et al., 2002. Analysis of Ore-Forming Background and Tectonic System of Lanping Basin, Western Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 21(1):36—44(in Chinese with English abstract).
- Xue, C.J., Gao, Y.B., Leach, D.L., 2009. Possible Former Oil-Gas Reservoir in the Giant Jinding Pb-Zn Deposit, Lanping, NW-Yunnan: The Role in the Ore Accumulation. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 31(3):

- 221—229(in Chinese with English abstract).
- Yang, T. N., Xue, C. D., Xin, D., et al., 2019. Paleotethyan Tectonic Evolution of the Sanjiang Orogenic Belt, SW China: Temporal and Spatial Distribution Pattern of Arc-Like Igneous Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 35(5): 1324—1340(in Chinese with English abstract).
- Yoshiro, Y., Yoshio, T., Hiromitsu, H., 2007. Comparison of Reductive Accumulation of Re and Os in Seawater-Sediment Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71:3458—3475.
- Yu, J., 2016. The Mechanisms of Sulfate-Sulfide-Carbonate Intergrowth and Companion for the Paomaping Lead-Zinc Deposit of Jinding Orefield in Lanping, Northwestern Yunnan, SW China (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming(in Chinese with English abstract).
- Zeng, P.S., Li, H., Li, Y.H., et al., 2016. Asian Largest Lead-Zinc Ore Deposit: The Jinding Giant Pb-Zn Deposit by Three Stages Superimposed Mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 90(9):2384—2398(in Chinese with English abstract).
- Zeng, R., Xue, C.J., Liu, S.W., et al., 2005. Formation Conditions of Jinding Giant Lead-Zinc Deposit. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 27(2): 21—25(in Chinese with English abstract).
- Zeng, Z. Y., Xue, C. D., Liu, J. K., 2020. Contribution of the Cretaceous Gypsum Sequence to Zinc-Lead Ore Formation: A Case Study of the Yunlong Formation at the Jinding Superlarge Zinc-Lead Deposit in Lanping Basin, Yunnan Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(5):723—738(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. L., Chang, X. C., 2003. Geochemical Characteristics of Hydrocarbon-Bearing Area Pb-Zn Ore Deposits in Jinding and Their Metallogenetic Role. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 33(2):264—274(in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. X., Xiang, Z. Z., Zhou, M. F., et al., 2018. The Giant Upper Yangtze Pb-Zn Province in SW China: Reviews, New Advances and a New Genetic Model. *Journal of Asian Earth Sciences*, 154: 280—315. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.12.032>
- Zhou, J. Y., Wang, J. H., Horton, B. K., et al., 2011. The Closure of Paleogene Basins of East-Central Tibet in Response to Tectonic, Sedimentation, Magmatism and Palaeoclimate. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 172—178(in Chinese with English abstract).
- Zhu, C. W., Wen, H. J., Zhang, Y. X., et al., 2017. Cadmium Isotope Fractionation in the Fule Mississippi Valley Type Deposit, Southwest China. *Mineralium Deposita*, 52(5): 675—686. <https://doi.org/10.1007/s00126-016-0691-7>
- Zhu, D.C., Zhu, L.D., Lin, L., et al., 2003. Organic Mineralization of Lead-Zinc Deposits in Devonian System, Xicheng Ore Field. *Earth Science*, 28(2): 201—208(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 邓军, 杨立强, 王长明, 2011. 三江特提斯复合造山与成矿作用研究进展. *岩石学报*, 27(9):2501—2509.
- 董随亮, 张志, 李光明, 等, 2019. 西藏岗穷拉石英脉型钼铜矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年及其地质意义. *地球科学*, 44(7):2265—2274.
- 付修根, 林丽, 庞艳春, 等, 2006. 云南金顶铅锌矿床中的有机质特征及成矿作用探讨. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 33(6):621—630.
- 高炳宇, 薛春纪, 池国祥, 等, 2012. 云南金顶超大型铅锌矿床沥青 Re-Os 法测年及地质意义. *岩石学报*, 28(5):1561—1567.
- 郭保健, 毛景文, 李厚民, 等, 2006. 秦岭造山带秋树湾铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义. *岩石学报*, 22(9): 2341—2348.
- 侯增谦, 曲晓明, 王淑贤, 等, 2003. 西藏高原冈底斯斑岩铜矿带辉钼矿 Re-Os 年龄: 成矿作用时限与动力学背景应用. *中国科学(D辑)*, 33(7):609—618.
- 侯增谦, 王二七, 莫宣学, 等, 2008. 青藏高原碰撞造山与成矿作用. 北京: 地质出版社.
- 胡古月, 李延河, 曾普胜, 2013. 膏盐在金顶铅锌矿成矿中的作用: 硫和锶同位素证据. *地质学报*, 87(11):1694—1702.
- 蒋少涌, 杨竞红, 赵葵东, 等, 2000. 金属矿床 Re-Os 同位素示踪与定年研究. *南京大学学报(自然科学)*, 36(6): 669—677.
- 靳新娣, 李文君, 吴华英, 等, 2010. Re-Os 同位素定年方法进展及 ICP-MS 精确定年测试关键技术. *岩石学报*, 26(5): 1617—1624.
- 李超, 裴浩翔, 王登红, 等, 2016. 山东孔辛头铜钼矿成矿时代及物质来源: 来自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据. *地质学报*, 90(2):240—249.
- 李超, 屈文俊, 杜安道, 等, 2012. 含有普通锇的辉钼矿 Re-Os 同位素定年研究. *岩石学报*, 28(2): 702—708.
- 李超, 屈文俊, 周利敏, 等, 2010. Carius 管直接蒸馏快速分离锇方法研究. *岩矿测试*, 29(1):14—16.
- 李文昌, 薛迎春, 卢映祥, 等, 2014. 中国斑岩铜矿成矿规律及找矿方向. 北京: 地质出版社.
- 李小明, 谭凯旋, 龚文君, 等, 2000. 利用磷灰石裂变径迹法研究金顶铅锌矿成矿时代. *大地构造与成矿学*, 24(3):

- 282—286.
- 李兴振,刘文均,王文昭,等,1999.西南三江地区特提斯构造演化与成矿(总论).北京:地质出版社.
- 李延河,谢桂青,段超,等,2013.膏盐层在矽卡岩型铁矿成矿中的作用.地质学报,87(9):1324—1334.
- 阙梅英,程敦模,张立生,等,1998.兰坪—思茅盆地铜矿床.北京:地质出版社.
- 任顺利,李延河,曾普胜,等,2018.膏盐层在云南会泽和毛坪铅锌矿成矿中的作用:硫同位素证据.地质学报,92(5):1041—1055.
- 沈传波,刘泽阳,肖凡,等,2015.石油系统 Re-Os 同位素体系封闭性研究进展.地球科学进展,30(2):187—195.
- 沈传波,葛翔,白秀娟,2019.四川盆地震旦—寒武系油气成藏的 Re-Os 年代学约束.地球科学,44(3):713—726.
- 沈传波,Selby, D., 梅廉夫, 等, 2011. 油气成藏定年的 Re-Os 同位素方法应用研究. 矿物岩石, 31(4):87—93.
- 宋祥峰,2015.金顶超大型铅锌矿床壳幔混染叠加成矿机制研究(博士学位论文).成都:成都理工大学.
- 宋玉财,侯增谦,杨天南,等,2011.“三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型.岩石矿物学杂志,30(3):355—380.
- 唐菊兴,黎风佶,李志军,等,2010.西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成的时限:锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据.矿床地质,29(3):461—475.
- 唐永永,毕献武,武丽艳,等,2013.金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义.矿物学报,33(3):287—294.
- 王安建,曹殿华,高兰,等,2009.论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因.地质学报,83(1):43—54.
- 王长明,陈晶源,杨立飞,等,2017.三江特提斯兰坪盆地构造—流体—成矿系统.岩石学报,33(7):1957—1977.
- 王国芝,胡瑞忠,王成善,等,2001.云南金顶超大型铅锌矿床的成矿地质背景.矿物学报,21(4):571—577.
- 修群业,2008.云南金顶矿床物源特征及成矿年代探讨(博士学位论文).北京:中国地质科学院.
- 修群业,高兰,王安建,等,2006a.金顶矿床古元古锆石 SHRIMP 年龄的发现及其地质意义.岩石学报,22(4):1040—1048.
- 修群业,王安建,高兰,等,2006b.金顶超大型矿床容矿围岩时代探讨及地质意义.地质调查与研究,29(4):294—302.
- 薛春纪,陈毓川,王登红,等,2003.滇西北金顶和白秧坪矿床:地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代.中国科学(D辑),33(4):315—322.
- 薛春纪,陈毓川,杨建民,等,2002.滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析.矿床地质,21(1):36—44.
- 薛春纪,高永宝,Leach, D.L., 2009.滇西北兰坪金顶可能的古油气藏及对铅锌大规模成矿的作用.地球科学与环境学报,31(3):221—229.
- 杨天南,薛传东,信迪,等,2019.西南三江造山带古特提斯弧岩浆岩的时空分布及构造演化新模型.岩石学报,35(5):1324—1340.
- 余静,2016.兰坪金顶跑马坪铅锌矿床硫酸盐—碳酸盐—硫化物共(伴)生机制(博士学位论文).昆明:昆明理工大学.
- 曾普胜,李红,李延河,等,2016.亚洲最大铅锌矿:三阶段叠加成矿的金顶巨型铅锌矿床.地质学报,90(9):2384—2398.
- 曾荣,薛春纪,刘淑文,等,2005.金顶超大型铅锌矿床成矿条件分析.地球科学与环境学报,27(2):21—25.
- 曾招阳,薛传东,刘靖坤,2020.白垩系膏岩层序对铅锌矿床形成的贡献:以云南兰坪金顶超大型铅锌矿床云龙组为例.地球学报,41(5):723—738.
- 张金亮,常象春,2003.金顶铅锌矿床油气地球化学特征及其成矿作用探讨.青岛海洋大学学报(自然科学版),33(2):264—274.
- 周江羽,王江海, Horton, B.K., 等, 2011. 青藏高原中东部古近纪盆地封闭的构造—沉积—岩浆活动和古气候响应. 地质学报, 85(2):172—178.
- 朱弟成,朱利东,林丽,等,2003.西成矿田泥盆系铅锌矿床中的有机成矿作用.地球科学,28(2):201—208.