# 滇西北维西陆缘弧月亮坪早三叠世 VMS 型铅锌矿床的发现及地质意义



李守奎<sup>1,2)</sup>,刘学龙<sup>1)</sup>,刘思晗<sup>1)</sup>,张世涛<sup>1)</sup>,赵庆红<sup>2)</sup>,杨学雄<sup>2)</sup> 1)昆明理工大学国土资源工程学院,云南昆明,650032;2)云南省地质矿产勘查院,云南昆明,650051

内容提要:滇西北维西陆缘弧夹持于扬子地块和兰坪地块之间,是古特提斯时期形成的火山弧,中一下三叠统 攀天阁组酸性端元和崔依比组基性端元构成的双峰式火山岩是其主要组成部分,被视为研究古特提斯洋俯冲和闭 合过程的关键区带。本文初次在该火山岩带攀天阁组长英质火山岩中发现了1处 VMS 型矿床——月亮坪铅锌 矿。初步野外调查显示,铅锌矿体具有"上层下脉"双层结构,伴生赤铁矿硅质岩、重晶石岩等热水喷流岩;围岩蚀 变不对称,矿体上盘火山岩蚀变微弱,下部脉状矿体密切伴生有硅化、绿泥石化、绢云母化等围岩蚀变。层状矿体 上、下盘英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 247.8±1.1 Ma 和 249.0±1.1 Ma,表明成岩成矿时代为早三 叠世。地球化学特征显示,英安岩属中高硅、高钾、过铝质长英质岩石,兼具"S"型花岗岩和岛弧火山岩特征,暗示 岛弧"基底"为大陆壳;赤铁矿硅质岩发育条纹构造,稀土含量低,轻稀土富集,高的正 Eu 异常(8Eu=2.37),U/Th 达 23.6, Co/Ni 为 0.17, 是典型的海底热水喷流岩; 矿石稀土配分曲线及微量元素标准化蛛网图与下盘英安岩极为 相似,显示成矿元素主要来自下伏长英质岩系。综合区域地质和前人研究资料,初步认为二叠纪时期古特提斯洋 俯冲作用导致兰坪地块东侧德钦一维西一乔后一带的大陆边缘形成了安第斯型俯冲带,早三叠世洋壳俯冲角度变 陡引起弧后拉张,月亮坪铅锌矿是在伸展背景下形成于酸性火山岩端元的黑矿型 VMS铅锌矿床。区域上,该带双 峰式火山岩喷发峰期约为 247 Ma,时间跨度约 7 Ma,并经过与弧有关的海底火山作用而快速伸展沉降至深海条 件,随着盆地的闭合和抬升,呈带状拼贴在弧-陆碰撞带上,具有"夭折的弧裂谷"特点,是保存 VMS 型矿床的理想 场所。目前对该带火山岩容矿的 VMS 型矿床研究程度低,找矿工作长期以来未有突破。月亮坪铅锌矿的发现对 维西陆缘弧找矿空间的开辟有重要指示意义,早一中三叠世火山岩可作为本区重要的 VMS 矿床勘查和研究层位。

关键词:维西陆缘弧;地球化学特征;锆石 U-Pb 年龄;VMS 型矿床;双峰式火山岩;月亮坪铅锌矿

火山岩块状硫化物矿床(Vocanogenci massive sulfide deposit,VMS)又称为海相火山岩型矿床,是 指与海底火山作用有关的含大量黄铁矿和一定数量 铜铅锌的矿床(Ye Tianzhu et al.,2014),以往中国 称为黄铁矿型矿床(Li Wenyuan,2004)。Zhai Yusheng et al.(2011)称之为与海相火山热液作用 有关的矿床,认为这类矿床的形成温度一般在50~ 400℃的范围,其形成主要与海相火山喷发间隙期或 晚期的火山气液作用有关。该类矿床产于海相火山 岩系地层,与地层整合的矿体成层状、似层状、透镜 状,其下往往有脉状、网脉状的矿体,矿石中硫化体 积大于 50%,具有典型的块状构造,因而得名块状 硫化物矿床(Yao Fengliang et al.,2006)。该类矿 床往往具有规模大、品位高、分布广的特点,是世界 铜铅锌银金的主要来源之一。据《矿产资源工业要 求手册》(2010年)显示,火山岩块状硫化物矿床与 斑岩型、砂页岩型、铜镍硫化物型占世界铜金属总储 量的 96.4%,与 SEDEX 型、MVT 型、砂页岩型占 世界总铅锌储量的 85%。作为世界四大支柱型铜 铅锌矿类型之一,其工业价值不言而喻,加之它可以

收稿日期:2020-11-08;改回日期:2021-01-13;网络发表日期:2021-04-16;责任编委:毕献武;责任编辑:黄敏、李曼、潘静。

 引用本文:李守奎,刘学龙,刘思晗,张世涛,赵庆红,杨学雄.2022. 滇西北维西陆缘弧月亮坪早三叠世 VMS 型铅锌矿床的发现及地质 意义.地质学报,96(4):1239~1264, doi: 10.19762/j.cnki. dizhixuebao.2022206.
 Li Shoukui, Liu Xuelong, Liu Sihan, Zhang Shitao, Zhao Qinghong, Yang Xuexiong. 2022. Discovery and significance of Early Triassic VMS type Pb-Zn deposit in Yueliangping, Weixi continental margin, northwestern Yunnan. Acta Geologica Sinica, 96(4): 1239~1264.

注:本文为云南省基础研究计划项目(编号 2019FA018、2019FB062)、国家自然科学基金项目(编号 41862009)、中国地质调查局发展研究中心项目(编号 DD2019057017)联合资助的成果。

作者简介:李守奎,男,1986年生。博士研究生,矿产普查与勘查专业,从事滇西北区域地质、矿产地质研究工作。E-mail: 289749859@ qq.com。通讯作者:刘学龙,男,1983年生。教授,矿床学专业,主要从事云南三江地区的地质矿产研究工作。E-mail: xuelongliu@ foxmail.com。

直接与现今正在发生的洋底热水沉积成矿作用相对照,因而一直是矿床学界研究热点之一(Tornos et al.,2015)。

江达-德钦-维西陆缘弧是古特提斯洋向昌 都-兰坪地块之下俯冲形成的一条长达 900 余千米 的火山弧(Deng Jun et al., 2016), 是三江地区一条 重要的 Cu-Fe-Pb-Zn-Ag 成矿带(图 1a; Wang Liquan et al., 2015)。从北至南分布有赵卡隆大型 铁银多金属矿床、足那中型铅锌矿床、加多岭-洞卡 中型铁-铜矿床、丁钦弄大型铜银多金属矿床、里仁 卡大型铅锌(铜银)矿床、鲁春中型铜多金属矿床、南 佐中型铅锌矿床、红坡牛场小型铜金多金属矿床、楚 格扎大型铁银多金属矿床,矿床类型多种多样,有 VMS型、SEDEX型、砂卡岩型、海相沉积型、构造 热液型等(Li Wenchang et al., 2001; Wang Liquan et al., 2015; Deng Jun et al., 2016, 在空间上具有 "成带分布、分段集中、成群产出"的规律。其中 VMS 型矿床均分布在德钦及以北地区 (Wang Liquan et al., 2001, 2002a, 2002b; Li Huan et al., 2011; Yang Xian et al., 2013), 而德钦以南地区(下 文称为维西陆缘弧),特别是楚格扎一维西一乔后一 带,长达近 300 km 的中一下三叠统攀天阁组( $T_{1-2}p$ )、 崔依比组(T<sub>1-2</sub> c)双峰式火山岩带一直未有找矿突 破,至今未有火山岩容矿的 VMS 类型矿床(点)发 现的报道。

前人对该带火山岩的研究多侧重于时空分布、 岩石组合、岩石化学、同位素地球化学、年龄、大地构 造等方面(Zhao Dasheng et al., 1994; Wang Xuewu et al.,2017),认为是由镁铁质至长英质火山岩组 成,富集 LREE 和 LILE(Rb、Ba),亏损 HFSE(Nb、 Ta),  $\epsilon_{\rm Hf}(t)$ 变化于+9.7~+16.7之间,反映岩浆源 于亏损地幔,并混有一定量的地壳物质(Hou Zengqian et al., 2020)。但是在形成机制上尚有很 大争议,有俯冲成因和碰撞成因之争,前者认为是古 特提斯洋俯冲时期沿深断裂俯冲带而形成的岛弧环 境火山岩造山带产物(Zhang Zixiong et al., 1985; Zeng Pusheng et al., 2015, 2018; Xin Di et al., 2018; Yin Guanghou et al., 2018; Yang Tiannan et al.,2019),又可细分为两种观点,即龙木措-双湖-昌 宁-孟连洋向东俯冲产物(Yang Tiannan et al., 2011; Yang Zhiming et al., 2014) 或金沙江洋向西 俯冲的产物(Mo Xuanxue et al., 2003; Deng Jun et al.,2014a);后者认为是古特提斯洋闭合时期弧-陆 碰撞、陆-陆对接作用同期(Zhao Dasheng et al., 1995;Li Wenchang et al.,2010)或碰撞后伸展时期 的产物(Wang Liquan et al.,2001,2002a,2002b; Wang Baodi et al.,2011,2014;Zi Jianwei et al., 2012a),属于大陆碰撞造山带火山岩。另外,在成矿 认识方面,多将其视为西侧毗邻的兰坪盆地新生代 大规模成矿的重要矿源层(Wang Liquan et al., 2000;Hou Zengqian et al.,2007,2015;Deng Jun et al.,2014a,2014b),而火山岩本身的含矿性有待深 入研究。

本次在维西陆缘弧南部月亮坪地区,于中一下 三叠统攀天阁组(T<sub>1-2</sub> p)火山岩系中初次发现1处 VMS型铅锌矿。本文初步调查矿床地质特征,通过 开展主要岩石类型的岩石学和地球化学研究,用 LA-ICP-MS方法测定矿区火山岩锆石 U-Pb 年龄, 从而探讨构造环境、矿床成因和地质意义,初步建立 成矿模式,一方面有利于本矿矿床类型的确定,另一 方面对维西陆缘弧早一中三叠世火山岩的含矿性和 找矿空间的开辟及成矿作用的研究具有重要指示 意义。

### 1 区域地质及成矿背景

月亮坪铅锌矿产于维西陆缘弧早一中三叠世火 山岩中。维西陆缘弧夹于兰坪地块与扬子地块之间 (图 1a; Yin Fuguang et al., 2017),构成了兰坪地块 东缘岩浆岩带(Tang Jing et al., 2016),东西两侧边 界分别为金沙江断裂和维西-通甸-乔后断裂(Zhao Dasheng et al., 1994)。其是在二叠纪至晚三叠世 古特提斯洋俯冲、陆陆碰撞形成的陆缘弧岩浆岩带 (Yang Tiannan et al., 2019)。二叠纪时期由于金 沙江洋盆向西俯冲(Li Wenchang et al., 2010), 兰 坪地块东侧维西至德钦一带的大陆边缘形成了安第 斯型俯冲带(Zeng Pusheng et al., 2015),由中基性 火山岩、板岩、变砂岩、片岩类夹结晶灰岩、大理岩、 硅质岩组成的陆缘弧。早一中三叠世双峰式火山岩 是维西陆缘弧的主要组成部分,攀天阁组(T<sub>1-2</sub> p)酸 性火山岩呈北北西向带状分布,并在北部出现崔依 比组(T<sub>1-2</sub>c)以基性为主的火山岩,二者构成"双峰 式"火山岩(Wen Ligang et al., 2017; Yin Guanghou et al., 2018), 该套火山岩浆喷发时间分布在 251~ 244 Ma之间(图 1b; Wang Baodi et al., 2011, 2014; Zi Jianwei et al., 2012a; Liang Mingjuan et al., 2015; Zeng Pusheng et al., 2015; Deng Jun et al., 2016; Tang Jing et al., 2016; Xin Di et al., 2018), 峰期约为247 Ma。晚三叠世末期处于碰撞后地壳



图 1 金沙江地区区域大地构造及江达-德钦-维西陆缘弧主要矿床分布图(a)

(据 Deng Jun et al., 2016; Yin Fuguang et al., 2017 修改)和维西陆缘弧区域地质矿产简图(b)

(据 Zi Jianwei et al. ,2012a; Wang Baodi et al. ,2014; Wen Ligang et al. ,2017 修改)

Fig. 1 Regional tectonics in Jinshajiang area and distribution map of main deposits in Jiangda Deqin Weixi continental margin arc (a) (after Deng Jun et al. ,2016; Yin Fuguang et al. ,2017) and simplified geological and mineral map of Weixi continental margin arc (b) (after Zi Jianwei et al. ,2012a; Wang Baodi et al. ,2014; Wen Ligang et al. ,2017)

伸展背景的应力松弛状态,在下伏火山岩之上不整 合沉积了一套上三叠统陆缘碎屑岩、碳酸盐岩(Li Wenchang et al.,2010;Wang Xuewu et al.,2017), 金沙江地区古特提斯演化至此结束。

基于上述构造背景,其频繁而复杂的岩浆、构造 活动及多样的岩性组合,势必会带来丰富的成矿流 体、矿质、成矿能量,以及形成大量的运移通道和成 矿空间,构成了十分有利的成矿条件(图 1b)。二叠 纪火山弧带灰岩中已发现南佐中型沉积-改造型铅 锌矿、里仁卡大型构造-热液脉型铅锌矿床(Li Wenchang et al. ,2010; Zeng Pusheng et al. ,2015; Lü Yu et al., 2017);在早一中三叠世上兰组绿泥板 岩中发现有鲁春中型 VMS 型铜矿 (Deng Jun et al.,2016),中一晚三叠世产有与侵入岩有关的红坡 牛场小型矽卡岩型-热液型铜金矿床(Wang Xiaohu et al., 2020), 在晚三叠世沉积岩中赋存有庆福、楚 格扎、建基、新民等大中型海相沉积型菱铁矿床和菜 子地(青甸湾)、分江、金山桃等中小型 SEDEX 型铅 锌矿床(Xue Shunrong, 2000; Huang Yufeng et al.,2011; Tang Yufei et al.,2013)。

本文新发现的月亮坪铅锌矿赋存于早一中三叠 世双峰式火山岩带南部英安岩及火山碎屑岩中,据 本次调查显示,其岩石组合、矿化样式、围岩蚀变、地 球化学特征均具有 VMS 型矿床特征。

# 2 矿区及矿床地质特征

### 2.1 矿区地质特征

矿区地层自西向东、由老到新依次出露有中一下三叠统攀天阁组(T<sub>1-2</sub> p)、上三叠统歪古村组(T<sub>3</sub>w)、三合洞组(T<sub>3</sub>sh)、挖鲁八组(T<sub>3</sub>wl)(图 2)。 其中攀天阁组(T<sub>1-2</sub>p)以灰绿色英安岩为主,夹火山 角砾集块岩、凝灰岩,偶见黑色页岩;歪古村组(T<sub>3</sub> w)岩性为暗紫红色、灰褐色、灰黄绿色及灰色砂砾 岩、砂岩夹粉砂岩、泥岩,为一套磨拉石沉积;三合洞 组(T<sub>3</sub>sh)为灰色、灰白色灰岩夹粉砂岩、页岩,为一 套浅海碳酸盐台地相沉积;挖鲁八组(T<sub>3</sub>wl)为灰 色-深灰色粉砂岩、粉砂质泥岩夹灰色砂岩,为浅海 陆棚沉积。上三叠统与攀天阁组(T<sub>1-2</sub>p)为角度不 整合接触,上三叠统各组自下而上为整合接触。

矿区断层不发育,仅南东角分布一条小型右行 平移断层。矿区北东部发育一 NNW 向延伸的向 斜,核部地层为挖鲁八组,翼部地层为三合洞组、歪 古村组,倾角约 25°~45°,两翼基本对称,长度约 1.5 km。

矿区出露大量印支期火山岩及少量喜马拉雅期 煌斑岩。火山岩地层分布于矿区西部和中部,主体 为单斜构造,地层走向北北西,倾向北东东,倾角 25°~60°。主要为中一下三叠统攀天阁组(T<sub>1-2</sub> *p*)火



图 2 月亮坪铅锌矿区地质简图(a)及矿体剖面图(b)(本文实测)

Fig. 2 Simplified geological map (a) and ore body profile (b) of Yueliangping Pb-Zn deposit (actual geological mapping)



### 图 3 月亮坪铅锌矿区火山岩特征

#### Fig. 3 Volcanic rocks features of Yueliangping Pb-Zn deposit

(a)一矿区概貌,灰绿色英安岩因风化作用呈紫红色;(b)一英安岩手标本,新鲜色为灰绿色;(c)一英安岩镜下特征(正交偏光);(d)一英安岩 石英斑晶港湾状溶蚀(正交偏光);(e)一石英斑晶放射状裂理发育,边部有熔蚀反应边,基质呈球粒结构(正交偏光);(f)一火山角砾集块岩, 富含铅锌矿石;(g)一火山角砾岩镜下特征(正交偏光);(h)一晶屑凝灰岩;(i)一晶屑凝灰岩镜下特征(正交偏光);ζ一英安岩;vba一火山角 砾集块岩;db一英安质角砾;tf一凝灰岩;Pl一斜长石;Qz一石英

(a)—Overview of mining area, and the grayish green dacite is purplish red due to weathering; (b)—dacite samples, and the fresh color is grayish green; (c)—dacite microscopic characteristics (orthogonal polarized); (d)—quartz phenocryst with harbor shape boundary because of dissolution (orthogonal polarized); (e)—quartz phenocryst developed radial cleavage, with melting reaction edge at the edge, and the matrix is in spherical structure (orthogonal polarized); (f)—volcanic breccia agglomerate, rich in lead and zinc ore; (g)microscopic characteristics of volcanic breccia (orthogonal polarized); (h)—crystalline tuff; (i)—microscopic characteristics of crystalline tuff (orthogonal polarized);  $\zeta$ —dacite; vba—volcanic breccia agglomerate; db—dacitic breccia; tf—tuff; Pl—plagioclase; Qz—quartz

### 山岩由英安岩夹火山碎屑岩组成,特征如下:

灰绿色英安岩(图 3b~e):斑状结构,块状构 造。斑晶以石英为主,多呈他形粒状,粒径 0.5~3 mm,干涉色至一级灰白(局部可达一级黄白),裂理 发育,边部常见熔蚀反应边,含量约 8%~10%;斜 长石斑晶多呈半自形一自形板状,粒径 0.5~2.5 mm,干涉色一级灰白,含量约 2%~10%,沿解理、 裂理缝发生绢云母化,未见明显钾长石斑晶。基质 为霏细结构、球粒结构,主要由隐晶长英质组成,一 级灰白干涉色,含量约 80%~85%。 英安质角砾集块岩(图 3f、g):角砾集块呈灰黄 色、灰白色,基质呈紫红色,火山角砾集块构造。英 安质角砾集块多呈棱角状一次棱角状,分选性差,大 小 2~20 cm 不等,含量为 60%~80%;基质主要由 铁氧化物、细粒状碎屑石英和岩屑组成,含量为 20%~40%。

晶屑凝灰岩(图 3h、i):呈紫红色,凝灰结构,块 状构造。含少量英安质角砾,砾径多为 3~10 mm, 约 15%;晶屑主要为石英,多呈棱角状一次棱角状, 碎裂现象明显,粒径 0.1~0.5 mm,无色透亮,低突 起,干涉色至一级黄白,含量约70%;基质为铁氧化物,半透明,锥光镜下多呈红褐色,含量约15%。

### 2.2 矿床地质特征

### 2.2.1 矿体特征

据野外调查,主要发现有两类矿体(图 2b),一 类为块状、砾间充填状构造的矿体赋存于火山碎屑 岩中,呈层状产出;另一类为分布于下伏英安岩中的 网脉状、脉状矿体。

层状矿体主要赋存于攀天阁组 $(T_{1-2}p)$ 火山角 砾集块岩及凝灰岩层中(图 4a),BT1 剥土(位置见 图 2)揭露矿体真厚 4 m,平均品位 Pb 8.06%、Zn 0.24%、Ag 58 g/t,矿体产状 50° $\angle$ 45°~58°;BT3 剥土揭露矿体真厚 3.5 m,平均品位 Pb 1.13%、Zn 0.23%、Ag 23 g/t,矿体产状 58° $\angle$ 71°。

脉状矿体赋存于层状矿体下伏英安岩中,在老 硐 LD1 中见多条脉状矿体,矿体厚度 0.7~3.9 m 不等,平均品位 Pb 3.1%、Zn 0.3%、Ag 15.3 g/t, 倾向南东,倾角 48°~66°。脉状矿体大体被层状矿 体不整合覆盖,两者产状在剖面上近直交(图 2b), 靠近层状矿体的下盘围岩角砾岩化明显。

矿体结构具有垂直分带性(图 2b),由上至下: 上覆英安岩微弱蚀变,赤铁矿硅质岩、重晶石岩等喷 流岩呈似层状分布于矿体上盘(图 4a,图 5g、h),层 状铅锌矿体矿石呈砾间充填状、块状、浸染状分布于 火山集块岩、角砾岩及凝灰岩中(图 4b、c),其下网 脉状、脉状矿体分布于角砾岩化、绿泥石化、绢云母 化、硅化英安岩中(图 4h、j、k)。

由于该矿为新发现矿床,目前层状矿体和脉状 矿体仅有稀疏工程揭露,走向和倾向延伸尚无系统 工程揭露,基于有限的样品数据估算铅锌金属量为 7.1万t,具有中型矿床远景。

### 2.2.2 矿石特征

金属矿物主要为方铅矿,其次为闪锌矿、赤铁 矿、黄铁矿,及少量黄铜矿、斑铜矿、针铁矿。脉石矿 物是石英、绿泥石、重晶石和少量方解石。

矿石结构主要为自形粒状、半自形粒状(图 4e),次为交代结构(图 4f)、针状结构等。矿石构造 以块状(图 4b)、砾间充填(图 4c、d)、脉状(图 4i~ k)、浸染状为主,次为胶壳状构造(图 5e、f)。

### 2.2.3 围岩蚀变

围岩蚀变以硅化、绿泥石化、绢云母化、赤铁矿 化为主,次为黄铁矿化、碳酸盐化。

硅化是矿区主要的蚀变类型(图 4i,图 5b、i、k),主要有两种形式:① 在矿体上部可形成赤铁矿

硅质喷流岩,呈似层状分布,矿物组合为石英+重晶 石,共生的金属矿物为赤铁矿+针铁矿。②呈脉状 分布在层状矿体下部,呈脉状、网脉状分布,在空间 上与绿泥石化、绢云母化、弱碳酸盐化共存,与之共 生的金属矿物为方铅矿+闪锌矿+黄铁矿±黄铜 矿。硅化是矿区最明显的找矿标志。

绿泥石化与脉状矿体关系极为紧密(图 5i),并 伴随硅化、绢云母化,是重要的找矿标志。矿物组合 为石英+绿泥石+绢云母,共生金属矿物为方铅矿 +闪锌矿+黄铁矿。热液蚀变绿泥石颗粒细小,单 偏光下为绿色,呈隐晶集合体,干涉色多被自身岩石 影响而显绿色,交代英安岩长石斑晶和长英质基质 而形成,是喷流热液的自变质产物。

绢云母化分布在层状矿体下盘英安岩中(图 5j),靠近矿体则过渡为绿泥石化,干涉色为二至三 级,呈淡黄色、淡绿色,蚀变弱时多沿斜长石斑晶的 解理、裂理缝分布,蚀变强时斜长石完全蚀变为绢 云母。

碳酸盐化蚀变较弱(图 51),分布在脉状矿体和 火山集块角砾岩的基质中,或呈细脉状穿切火山角 砾,金属矿物组合为方铅矿+闪锌矿+黄铁矿。

赤铁矿化分布在赋存层状矿体的火山碎屑岩和 矿体上部的铁硅质喷流岩中(图 5a),多呈胶壳状产 出(图 5e,f),常与石英+重晶石+碳酸盐共生。

黄铁矿化蚀变弱,呈自形、半自形粒状(图 4g), 浸染状分布,与硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化 共生,金属矿物组合为方铅矿+闪锌矿+黄铁矿。

### 3 样品采集与分析方法

#### 3.1 样品采集

本次研究所选样品采自弱风化或未风化的地表 露头和老硐中(取样位置见图 2),样品 D208-1、 D209-1、D0202-3采自层状矿体下盘英安岩,D208-2 采自英安岩中网脉状矿石,D209-2采自层状矿体块 状矿石,D209-3采自凝灰岩中浸染状矿石,D208-6 采自赤铁矿硅质岩,D209-4、D0202-6、D210-1采自 层状矿体上盘英安岩。对样品 D208-2和 D209-4英 安岩作了锆石 U-Pb 年代学研究,对上述 10件样品 进行了主微量元素分析。

### 3.2 分析方法

锆石 U-Pb 定年样品经粗碎、淘洗、电磁选、重 液分选后,在双目显微镜下挑选出锆石晶体。将待 测锆石和标样粘在环氧树脂上制靶、抛光,然后进行 阴极发光(CL)、透反射照相,选择晶型好、无裂纹的



#### 图 4 月亮坪铅锌矿矿体及矿石特征

#### Fig. 4 Orebody and ore characteristics of Yueliangping Pb-Zn deposit

(a) 一层状矿体野外露头,被喜马拉雅期煌斑岩切穿;(b) 一块状硫化物矿石;(c) 一砾间充填构造;(d) 一方铅矿被硅质胶壳环绕;(e) 一块状 方铅矿镜下特征,黑三角孔发育(反射光);(f) 一方铅矿沿边部交代闪锌矿(反射光);(g) 一方铅矿+闪锌矿+黄铁矿矿石镜下特征(反射 光);(h) 一网脉状矿体;(i) 一方铅矿+闪锌矿+石英脉状矿石;(j) 一方铅矿+闪锌矿脉状矿石;(k) 一方铅矿呈脉状产出,脉体边部发育少量 闪锌矿(反射光);Gn 一方铅矿;db 一英安质角砾;Sph 一闪锌矿;Py 一黄铁矿;Qz 一石英

(a)—The layered orebody outcrops in the field and is cut through by Himalayan lamprophyre; (b)—massive sulfide ore; (c)—gravel filling structure; (d)—galena surrounded by siliceous rubber shell; (e)—microscopic characteristics of massive galena, black triangular pore development (reflected light); (f)—galena metasomatism of sphalerite (reflected light); (g)—microscopic characteristics of galena + sphalerite+pyrite ore (reflected light); (h)—stockwork ore body; (i)—galena+sphalerite+sphalerite Ore+quartz vein ore; (j)—galena+sphalerite vein ore; (k)—galena is in vein shape, and a small amount of sphalerite is distributed at the edge of vein (reflected light); Gn—galena; db—dacitic breccia; Sph—sphalerite; Py—pyrite; Qz—quartz

锆石颗粒作为测定对象(图 6)。锆石 U-Pb 定年在 中国地质科学院地质研究所矿物/包裹体微区分析

实验室使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICPMS)完成。激光剥蚀平台采用 NWR 193<sup>wc</sup>



图 5 月亮坪铅锌矿喷流岩及围岩蚀变特征

The characteristics of exhalative rock and altered rock in Yueliangping Pb-Zn deposit Fig. 5

(a)一赤铁矿硅质岩野外露头;(b)一条纹状赤铁矿硅质岩;被后期石英脉穿插;(c)一含石英角砾的块状赤铁矿;(d)一条带状赤铁矿硅质岩镜 下特征,纹层具有被强烈揉皱的滑动软变形构造(正交偏光);(e)一胶壳状赤铁矿(反射光);(f)一赤铁矿多呈胶壳状产出,具深红色内反射色 (反射光);(g)一重晶石手标本;(h)一重晶石岩镜下特征(正交偏光);(i)一硅化、绿泥石化镜下特征(单偏光);(j)一长石斑晶均被绢云母化 (正交);(k)一石英砾屑发生硅化作用,呈放射状结构(正交偏光);(1)一方解石脉穿插石英(正交偏光);Hm一赤铁矿;Qz一石英;Bar一重晶 石;Chl一绿泥石;Ser一绢云母;Cal一方解石

(a)-Hematite siliceous rock outcrop in the field; (b)-striated hematite siliceous rock, intercalated by later quartz vein; (c)-massive hematite containing quartz breccia; (d)-banded hematite silicalite with strong crumpled sliding soft deformation structure(orthogonal polarized); (e)-colloidal hematite(orthogonal polarized); (f)-hematite is mostly produced in rubber shell with deep red internal reflection color (reflected light); (g)-barite hand specimen; (h)-microscopic characteristics of barite (orthogonal polarized); (i)-microscopic characteristics of silicification and chloritization (plane polarized); (j)-feldspar phenocrysts are sericitized (orthogonal polarized); (k)quartz gravels are silicified with radial structure (orthogonal polarized); (1)-calcite vein interspersed with quartz (orthogonal polarized); Hm-hematite; Qz-quartz; Bar-barite; Chl-chlorite; Ser-sericite; Cal-calcite

型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统,配备双体积 样品池。质谱仪采用 Agilent 7900 型电感耦合等离 Hz、能量密度 3.5 J/cm<sup>2</sup>、扫描速度 3 μm/s 的激光

子体质谱仪。采用束斑直径 50 µm、剥蚀频率 10



图 6 月亮坪铅锌矿锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 6 Cathodoluminescence (CL) images of the analyzed zircon grains in Yueliangping Pb-Zn deposit
 (a)—D208-2 英安岩(层状矿体下盘);(b)—D209-4 英安岩(层状矿体上盘);白色圆圈及数字为年龄测点位置及对应<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U
 加权平均年龄值,直径 35 μm

(a)—D208-2 dacite (from the footwall of the stratiform orebody); (b)—D209-4 dacite (from the hanging wall of the stratiform orebody); white circles with diameter of 35  $\mu$ m and associated numbers indicate the positions for U-Pb analysis and the <sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U ages

参数剥蚀 NIST 612,调节气流以获得高的信号强度 ( $^{238}$ U~5×10<sup>5</sup> 次/s)、低的氧化物产率(ThO/Th< 0.2%)。选用 100 μm 束斑线扫 NIST 610 对待测
 元素进行 P/A 调谐。锆石样品固定在环氧树脂靶

上,抛光后在超纯水中超声清洗,分析前用分析纯甲 醇擦拭样品表面。在束斑直径 30  $\mu$ m、剥蚀频率 5 Hz、能量密度 2 J/cm<sup>2</sup>的激光条件下分析样品。数 据处理采用 Iolite 程序(Paton et al.,2010),错石 91500 作为主标,GJ-1 作为副标,每隔 10~12 个样 品点分析 2 个 91500 标样及一个 GJ-1 标样。通常 采集 20 s 的气体空白,35~40 s 的信号区间进行数 据处理,按指数方程进行深度分馏校正(Paton et al.,2010)。以 NIST 610 作为外标,<sup>91</sup> Zr 作为内标 计算微量元素含量。详细的测试过程参见 Yu Chao et al. (2019),年龄计算和谐和图绘制采用 Ludwig 的 Isoplot 3.0(Ludwig,2003)完成。本次实验过程 中测定的 91500(1062.5±4.4 Ma,2 $\sigma$ )、GJ-1(604± 6 Ma,2 $\sigma$ )年龄在不确定度范围内与推荐值一致。 分析结果见表 1。

全岩分析在广州澳实矿物实验室完成。选取新 鲜样品,破碎后缩分出 300 g,研磨至 200 目后用于 化学分析。主量元素分析样品取一份试样于105℃ 烘干后,置入铂金坩锅,与四硼酸锂-偏硼酸锂-硝酸 锂混合熔剂充分混溶,于1050℃条件下熔融,熔浆 倒入铂金模冷却为熔片,用 X 射线荧光光谱仪测定 主量;同时精确称取另一份干燥后的试样,马弗炉 1000℃有氧灼烧,试样灼烧前、后的重量差即是烧失 量(LOI);再取一份样品用氢氟酸-硫酸分解,用基 准重铬酸钾溶液滴定 Fe<sup>2+</sup> 的含量,计算出 FeO 含 量。微量、稀土分析样品称取两份试样,一份试样用 高氯酸、硝酸、氢氟酸消解,蒸至近干后用稀盐酸溶 解定容,进行等离子体发射光谱与等离子体质谱分 析;另一份试样与偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂混合均 匀,在1025℃以上的熔炉中熔化,熔液冷却后,用硝 酸、盐酸和氢氟酸定容,用等离子体质谱仪分析,根 据样品的实际情况和消解效果,综合取值即是检测 结果。常规岩石样品主量元素测试仪器为 PANalytical PW2424 型 X 射线荧光光谱仪 (XRF),分析精度优于5%,矿石样品主量元素测试 仪器为 PANalytical Axios Max 型 X 射线荧光光谱 仪(XRF),分析精度优于7.5%;微量和稀土元素测 试仪器为 Agilent 5110 型电感耦合等离子体发射光 谱和 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS),分析精度优于10%。分析结果见表2。

4 结果

### 4.1 锆石 U-Pb 年龄

研究区 2 件样品的锆石 U-Pb 测试结果详见

表1。

样品 D208-2 采自产层状矿体下盘的英安岩中 (图 2b)。阴极发光图像(CL)显示(图 6a), 锆石自 形程度较好, 晶形大多为长柱状, 长 120~200  $\mu$ m, 长宽比为 2:1~3:1, 具岩浆振荡环带, 锆石的 Th 含量为 64.3 × 10<sup>-6</sup> ~ 202.0 × 10<sup>-6</sup>, U 含量为 244.3×10<sup>-6</sup> ~ 781.0 × 10<sup>-6</sup>, Th/U 比为 0.13~ 0.39, 属于典型的岩浆成因锆石(Wu Yuanbao et al., 2004)。选取的 25 颗锆石分析点均位于环带发 育完整部位, 获得的结果谐和度超过 96%, <sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄分布在 242.0~255.8 Ma 之间, 所有分析点均 在谐和线上分布(图 7b), <sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄的加权平 均值为 249.0 ±1.1 Ma(2 $\sigma$ , MSWD=1.09), 代表 了层状矿体下盘英安岩的形成年龄。

样品 D209-4 采自层状矿体上盘英安岩中(图 2b)。阴极发光图像(CL)显示(图 6b),锆石自形程 度较好,晶形大多为长柱状,长 100~250 μm,长宽 比为 2:1~3:1,具岩浆振荡环带,锆石的 Th 含量 为 68.1 × 10<sup>-6</sup>~258.3×10<sup>-6</sup>,U 含量为 342.1× 10<sup>-6</sup>~1022×10<sup>-6</sup>,Th/U 比为 0.07~0.36,属于典 型的岩浆成因锆石((Wu Yuanbao et al.,2004)。 选取的 25 颗锆石分析点均位于环带发育完整部位, 剔除 1 个 Pb 信号较差的分析数据(D209-4-14),其 余 24 个分析点获得的结果谐和度超过 97%,表面 年龄接近,<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup>U 年龄分布在 243.1~252.6 Ma 之间,所有分析点均在谐和线上(图 7b),<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup>U 年龄的加权平均值为 247.8±1.1 Ma(2σ,MSWD= 0.83),代表了层状矿体上盘英安岩的形成年龄。

### 4.2 岩石地球化学特征

### 4.2.1 英安岩

主量元素方面,英安岩样品具有偏高的 SiO<sub>2</sub> (63.76%~71.55%,平均 68.00%),Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(11.59% ~15.95%,平均 13.80%)和 K<sub>2</sub>O(2.83%~ 6.94%,平均 5.14%)含量以及较低的 MgO (0.42%~1.90%,平均 0.70%),CaO(0.06%~ 1.83%,平均 0.41%),Na<sub>2</sub>O(0.06%~1.83%,平 均 0.41%)。在 TAS 图解(图 8a)和 Nb/Y-SiO<sub>2</sub>分 类图解(图 8b)中,样品基本落在流纹英安岩/英安 岩区,均落入亚碱性区,总体为酸性;全碱含量(K<sub>2</sub>O +Na<sub>2</sub>O)为 2.82%~8.18%,均值为 5.94%,K<sub>2</sub>O/ Na<sub>2</sub>O 均值 46.62,为钾质岩;里特曼指数  $\sigma$  为 0.32 ~3.13,为钙碱性;铝饱和指数 A/CNK 为 1.1~ 3.6,在铝饱和指数图解中投入过铝质岩类(图 8c); 在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解中(图 8d),多数样品落在钾玄岩

### 表 1 月亮坪铅锌矿英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄数据 Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of dacite from the Yueliangping Pb-Zn deposit

测片中	Pb Th		U	Th/II	比值		比值		比值		年龄(Ma)		年龄(Ma)	
例尽与	含	量(×10 <sup>-</sup>	-6)	111/0	$^{207}{ m Pb}/^{206}{ m Pb}$	2σ	$^{207}\mathrm{Pb}/^{235}\mathrm{U}$	2σ	$^{206}\mathrm{Pb}/^{238}\mathrm{U}$	2σ	$^{207}Pb/^{235}U$	$2\sigma$	$^{206}{Pb}/^{238}{U}$	$2\sigma$
样品 D208-2,英安岩(层状矿体下盘)														
D208-2-01	19.7	98.8	475.0	0.21	0.0509	0.0019	0.2762	0.011	0.03909	0.00084	246.7	8.4	247.2	5.2
D208-2-02	14.5	113.1	359.2	0.31	0.0528	0.0024	0.2790	0.013	0.03826	0.00096	248.5	10.0	242.0	6.0
D208-2-03	16.1	113.3	385.7	0.29	0.0526	0.0024	0.2840	0.013	0.03922	0.00096	252.7	10.0	247.9	6.0
D208-2-04	19.7	131.9	499.0	0.26	0.0523	0.0022	0.2770	0.012	0.03841	0.00099	247.1	9.4	242.9	6.2
D208-2-05	17.0	98.8	405.4	0.24	0.0527	0.0020	0.2880	0.011	0.03951	0.00089	256.8	9.2	249.7	5.5
D208-2-06	18.7	75.8	464.0	0.16	0.0512	0.0020	0.2810	0.011	0.03982	0.00092	250.5	9.0	251.7	5.7
D208-2-07	18.1	118.3	431.8	0.27	0.0521	0.0022	0.2830	0.012	0.03925	0.00090	251.5	9.5	248.1	5.6
D208-2-08	31.4	202.0	781.0	0.26	0.0525	0.0019	0.2818	0.011	0.03897	0.00100	251.4	8.6	246.4	6.4
D208-2-09	11.9	64.3	280.6	0.23	0.0500	0.0026	0.2770	0.015	0.03993	0.00099	246.0	12.0	252.4	6.1
D208-2-10	19.9	101.7	474.0	0.21	0.0502	0.0020	0.2773	0.011	0.03992	0.00100	247.6	8.8	252.3	6.2
D208-2-11	14.3	120.4	349.0	0.34	0.0537	0.0025	0.2890	0.014	0.03904	0.00100	256.7	11.0	246.8	6.4
D208-2-12	13.5	79.8	327.2	0.24	0.0524	0.0021	0.2818	0.011	0.03911	0.00084	250.7	8.9	247.3	5.2
D208-2-13	22.3	68.4	545.0	0.13	0.0517	0.0021	0.2900	0.012	0.04049	0.00093	257.4	9.3	255.8	5.8
D208-2-14	10.6	87.7	244.3	0.36	0.0505	0.0026	0.2820	0.015	0.04000	0.00096	250.0	12.0	252.8	5.9
D208-2-15	17.5	114.9	414.4	0.28	0.0514	0.0021	0.2800	0.012	0.03960	0.00093	249.5	9.5	250.3	5.8
D208-2-16	17.5	130.9	415.9	0.31	0.0522	0.0021	0.2810	0.012	0.03919	0.00087	249.9	9.1	247.8	5.4
D208-2-17	23.6	128.3	584.0	0.22	0.0519	0.0019	0.2793	0.011	0.03888	0.00086	249.1	8.6	245.9	5.3
D208-2-18	21.5	147.0	545.0	0.27	0.0526	0.0025	0.2810	0.013	0.03922	0.00110	251.2	9.9	248.0	6.5
D208-2-19	20.6	185.9	474.0	0.39	0.0509	0.0021	0.2790	0.012	0.03944	0.00082	248.7	9.5	249.3	5.1
D208-2-20	17.0	106.4	404.8	0.26	0.0510	0.0020	0. 2812	0.011	0. 03969	0.00095	250.6	8.6	250.9	5.9
D208-2-21	25.6	130.0	626.0	0.21	0.0518	0.0020	0. 2839	0.011	0.03973	0.00085	253.7	8.9	251.1	5.3
D208-2-22	10.4	73.3	248.4	0.30	0.0522	0.0027	0. 2850	0.015	0. 03982	0.00095	252.0	12.0	251.7	5.9
D208-2-23	19.7	130.5	468.3	0.28	0.0507	0.0020	0.2777	0.011	0.03953	0.00086	247.9	8.5	249.9	5.3
D208-2-24	17.0	115.3	399.0	0.29	0.0510	0.0021	0. 2760	0.011	0.03926	0.0009	246.6	9.0	248.2	5.6
D208-2-25	15 0	132.3	350.9	0.38	0.0507	0.0021	0 2757	0.011	0.03931	0.00086	246 3	9.0	248 5	5 4
0200 2 20	10.0	102.0	000.0	0.00	- 0.0007	员 D209-4		小小	0.00001  - 舟)	0.00000	210.0	0.0	210.0	0.1
D209-4-01	31.8	159 0	790.0	0.20	0.0512	0 0018	0 2746	0 0096	0.03881	0 00081	245 7	7 7	245 4	5.0
D200-4-02	17 0	110.3	398 7	0.20	0.0502	0.0021	0.2740	0.0120	0.03075	0.00083	245.7	9.1	251 3	5.2
D209-4-03	30.2	161 3	766 0	0.30	0.0502	0.0021	0.2740	0.0110	0.03874	0.00000	245 1	9.0	245 0	6.2
D209-4-04	20.0	137 9	481 0	0.21	0.0507	0.0018	0.2726	0.0099	0.03902	0.00085	244 8	7 7	246 7	5 3
D200-4-05	20.0	97.8	567 0	0.17	0.0506	0.0018	0.2720	0.010	0.03916	0.00078	245 2	8 3	240.7	1.8
D200-4-06	20.0	164 7	725 0	0.17	0.0521	0.0010	0.2751	0.010	0.03844	0.00070	246 1	7 8	243.1	5 5
$D_{200-4-07}$	14 5	74.6	252 7	0.23	0.0507	0.0019	0.2732	0.0033	0.03036	0.00086	240.1	0.0	243.1	5.3
D209 4 07	24.7	152 4	601 0	0.21	0.0514	0.0022	0.2740	0.0100	0.03930	0.00077	240.4	9.0 8 1	240.0	1.8
D209-4-00	24.7	162 8	530 0	0.20	0.0503	0.0019	0.2700	0.0100	0.03094	0.00077	247.3	0.1 8 2	240.3	4.0 5.3
D209 4 09	30.3	258 3	711 0	0.30	0.0503	0.0019	0.2726	0.0100	0.03920	0.00083	243.4	7.6	240.2	5.1
D209-4-10	14 4	230.3	246 0	0.30	0.0503	0.0018	0.2720	0.0090	0.03927	0.00087	254.2	0.1	240.3	5.1
$D_{209}^{-4-11}$	14.4	102 1	340.9 207 2	0.29	0.0510	0.0022	0.2070	0.0120	0.03922	0.00087	234.0	9.1	240.0	5.4
D209-4-12	16.0	103.1	207 4	0.27	0.0510	0.0023	0.2700	0.0110	0.03037	0.00083	241.0	9.1 0 C	244.5	5.5
D209-4-13	10.0	157.1	397.4	0.34	0.0500	0.0020	0.2734	0.0110	0.03899	0.00089	244.4	0.0	240.0	0.0
D209-4-14	10.4	95.5	300.9	0.25	0.0542	0.0025	0.3450	0.0130	0.04000	0.0012	300.0	12.0	293.9	
D209-4-15	10.0	90.0	392.0	0.23	0.0501	0.0022	0.2790	0.0130	0.03983	0.00100	248.7	10.0	201.7	0.3
D209-4-16	16.9	143.3	604.0	0.24	0.0509	0.0018	0.2740	0.0095	0.03918	0.00087	240.2	7.0	247.7	5.4
D209-4-17	10.2	104.3	389.0	0.27	0.0508	0.0021	0.2770	0.0120	0.03931	0.00091	247.3	9.4	249.1	0.8
D209-4-18	11.4	109.2	412.0	0.27	0.0511	0.0026	0.2800	0.0140	0.03996	0.00100	249.2	7.0	252.0	0.3
D209-4-19	40.Z	09.3	1022.0	0.07	0.0510	0.0010	0.2789	0.0092	0.03916	0.00093	249.2	1.J	247.0	5.8 5.7
D209-4-20	23.8	133.2	580.0	0.23	0.0512	0.0019	0.2761	0.0100	0.03929	0.00092	246.7	8.1	248.4	5.7
D209-4-21	16.Z	100.4	407.1	0.17	0.0508	0.0021	0.2740	0.0120	0.03914	0.00090	244.7	9.2 7 7	247.5	5.6
D209-4-22	Z1.7	122.6	525.0	0.23	0.0516	0.0018	0.2763	0.0098	0.03895	0.00089	246.9	1.7	246.3	5.5
D209-4-23	13.9	68.1	342.1	0.20	0.0512	0.0021	0.2769	0.0110	0.03973	0.00089	247.2	8.6	251.1	5.5
D209-4-24	16.0	69.3	386.3	0.18	0.0516	0.0020	0.2816	0.0110	0.03979	0.00094	250.7	9.0	251.5	5.8
D209-4-25	20.4	150.2	486.0	0.31	0.0511	0.0019	0.2754	0.0100	0.03909	0.00091	246.1	8.3	247.1	5.6

表 2

### 月亮坪铅锌矿英安岩、赤铁矿硅质岩、铅锌矿石的主量元素(%)、微量元素(×10<sup>---</sup>)分析结果

Table 2 Analytical results of major (%), trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) data of dacite, hematite siliceous rock

and lead-zinc ore in Yueliangping Pb-Zn deposit

岩石类型	层状	矿体下盘英	安岩	层状	:矿体上盘英	安岩	赤铁矿硅质岩	块状矿石	浸染状矿石	网脉状矿石
样号	D208-1	D209-1	D0202-3	D209-4	D0202-6	D210-1	D208-6	D209-2	D209-3	D208-2
$SiO_2$	71.55	69.93	68.32	67.93	66.52	63.76	58.28	63.00	65.70	56.50
${\rm TiO}_2$	0.55	0.51	0.28	0.41	0.41	0.55	0.01	0.33	0.20	0.41
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	14.66	14.41	13.76	11.59	12.45	15.95	0.23	8.58	6.33	10.65
$Fe_2O_3$	3.23	4.29	4.64	8.19	7.30	1.17	26.13	4.06	18.85	4.45
FeO	0.58	0.76	0.66	2.81	0.88	3.56	0.54	0.63	0.63	12.20
MnO	0.08	0.05	0.03	0.40	0.11	0.08	0.03	0.02	0.07	0.16
MgO	0.45	0.42	0.47	0.49	0.46	1.90	0.04	0.28	0.26	1.78
CaO	0.15	0.15	0.19	0.06	0.09	1.83	0.04	0.04	0.12	0.91
$Na_2O$	0.49	0.09	0.14	0.03	0.10	3.96	0.01	0.03	0.01	0.07
$K_2O$	5.24	6.83	6.94	2.83	4.77	4.22	0.05	2.71	2.04	3.22
$P_2O_5$	0.13	0.13	0.15	0.13	0.11	0.18	<0.01	0.10	0.57	0.13
BaO	_	—	_	_	_	_	9.66	—	_	—
$SO_3$	_	_	_	_	_	_	5.36	0.06	0.17	1.30
PbO	_	_	_	_	_	_	_	16.00	2.70	3.16
ZnO	_	_	_	_	_	_	—	0.10	0.21	0.06
LOI	2.31	1.83	2.64	3.28	4.08	1.89	0.53	4.54	2.38	4.31
Totle	99.42	99.40	98.22	98.15	97.28	99.05	100.91	100.48	100.24	99.31
Rb	298.0	384.0	353.8	213.0	285.7	198.0	3.0	171.0	166.5	112.5
Ba	568	921	1081	1545	5148	738	86518	360	90	730
Th	25.80	28.20	27.47	23.70	27.41	22.80	0.11	16.60	10.90	22.00
U	6.0	4.4	4.2	5.3	4.16	6.5	2.6	4.1	10.6	3.9
Ta	1.04	0.91	1.22	0.83	1.08	1.25	< 0.05	0.62	0.39	0.83
Nb	12.4	13.4	12.1	10.7	11.1	13.0	0.2	7.4	4.8	9.6
Pb	17.1	68.3	134.1	2100.0	272.7	91.9	414.0	96000.0	23400.0	27500.0
Sr	41.1	16.7	23.25	11.2	95.3	289.0	1900.0	5.9	11.2	23.9
Nd	40.1	18.0	21.1	33.9	40.0	32.0	5.5	20.9	17.1	30.9
Zr	229.0	281.0	152.3	216.0	175.6	169.0	<2.0	44.8	31.5	68.5
Hf	5.9	7.3	4.1	5.5	4.7	4.5	0.1	1.5	1.0	2.0
La	45.8	18	23.0	43.8	47.7	41.0	7.2	29.0	23.0	36.7
Ce	87.3	35.8	46.4	77.9	94.3	80.9	11.1	58.4	44.4	71.0
Pr	10.30	4.48	5.516	9.06	10.94	9.48	1.17	6.04	4.74	8.23
Nd	40.10	18.00	21.11	33.9	39.96	32.00	5.50	20.90	17.10	30.90
Sm	8.74	4.46	5.51	7.24	8.86	6.14	2.12	4.30	3.89	6.20
Eu	1.39	0.85	1.04	2.87	2.38	1.20	1.61	1.01	1.03	1.22
Gd	7.85	4.68	5.41	7.29	7.24	4.57	2.04	3.27	4.02	5.07
Tb	1.27	0.81	0.89	1.18	1.02	0.67	0.34	0.51	0.68	0.81
Dv	7.05	5.19	5.48	6.63	5.44	3.66	1.78	2.77	4.08	5.14
Ho	1.42	1.13	1, 15	1.30	1.03	0.75	0.34	0.56	0.83	1.08
Er	3. 86	3. 32	3, 20	3. 36	2, 81	2.00	0.85	1.52	2, 22	3.07
Tm	0.57	0.51	0.47	0.47	0.40	0.29	0.12	0.22	0.32	0.45
Yh	3, 58	3.15	3, 122	2.89	2, 52	1.81	0.79	1. 39	1.94	2, 93
Lu	0. 55	0.50	0.46	0.44	0.38	0.28	0.13	0.21	0.28	0.44
Y	36.1	2.9.4	27.0	38.9	23.7	18.4	10.5	14.2	21.7	27.6
SRFF	219 78	100 88	122 73	198 33	225 05	184 75	35.09	130 10	108 53	173.24
LRFF	193 63	81, 59	102 55	174 77	204 22	170 72	28.70	119 65	94.16	154. 25
HRFF	26 15	19 29	20.18	23 56	20.84	14 02	6 30	10.45	14 37	18 99
I RFF/HRFF	7 40	4 22	5 08	7 19	9 80	12 17	4 19	11 45	6 55	8 19
Lay/Vhy	0 1 S	4 10	5 28	10.87	13 61	16 25	6 54	14 07	8 50	8 98
λFu	0.51	0.57	0.58	1 91	0.01	0.60	2 27	0.82	0.00	0.50
٥Eu گC	0.01	0.07	1 01	0.06	1 01	1 01	0.04	1 02	1.04	1.00
ote	0.99	0.98	1.01	0.90	1.01	1.01	0.94	1.08	1.04	1.00

注:"一"为未检测项。



图 7 月亮铅锌矿英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图 Fig. 7 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams of dacite from the Yueliangping Pb-Zn deposit (a)-D208-2 英安岩(层状矿体下盘);(b)-D209-4 英安岩(层状矿体上盘)

(a)-D208-2 dacite (from the footwall of the stratiform orebody); (b)-D209-4 dacite (from the hanging wall of the stratiform orebody)

系列区;固结指数 SI=3.4~12.8,分异指数 DI= 80.95~90.38,表明分异程度较高。综上,样品为中 高硅、高钾、过铝质钾玄岩系列。

稀土元素含量总量较高( $\Sigma REE = 157.44 \times 10^{-6} \sim 191.75 \times 10^{-6}$ ,平均175.25×10<sup>-6</sup>),轻重稀 土比值(LREE/HREE)为4.23~12.17,均值为 7.68,模式斜率(La/Yb)<sub>N</sub>为4.10~16.25,均值为 9.88,表明轻、重稀土分异明显,分馏程度较高,而层 状矿体上盘英安岩((La/Yb)<sub>N</sub>均值为13.58,较下 盘英安岩((La/Yb)<sub>N</sub>均值为6.18)轻重稀土分异程 度更高。稀土配分曲线表现为右倾模式(图9a),轻 稀土富集较强,重稀土富集弱;层状矿体下盘英安岩 负 Eu 异常明显(0.51~0.58),这可能与斜长石的 分离结晶作用有关;层状矿体上盘英安岩自下而上 δEu 变化为1.21→0.96→0.69(图2b、图9a),Eu 异 常由 正变负,模式斜率(La/Yb)<sub>N</sub>变化为10.87→ 13.61→16.25,分馏程度由低变高,可能反映岩浆演 化程度逐渐变高的过程。

微量元素蛛网图(图 9b)显示,富集 Rb、Th、U、 K、Pb等大离子亲石元素(LILE)和 Zr、Hf、Sm,而 Ta、Nb、P、Ti等高场强元素(HFSE)和 Sr 显示有不 同程度亏损。Nb/Ta 为 10.3~14.7,平均值为 11.7,与大陆地壳 Nb/Ta 值(11~12)相同,明显小 于交代地幔中 Nb/Ta 值(>17.5;Kalfoun et al., 2002);Plank et al. (1998)指出由板片脱水流体交 代过的源区形成的岩浆 Ba/Th 比值通常大于 170, 矿区英安岩 Ba/Th 比值(22~188,平均值 63)进一 步显示并非来源于俯冲板片脱水流体交代过的地幔 楔的部分熔融; Zr/Hf 为 37.4~39.3, 平均值为 38.1, 与地壳中 Zr/Hf 比值(约为 36)接近, 明显小 于地幔中 Zr/Hf 比值(约为 50; Anderson, 1983); 岩 石高的 Rb/Sr 值(平均值 11.4)和 低的 Ti/Zr 值 (10.9~11.5; 幔源物质中>30; Wedepohl, 1995)等特征同样表明显示英安岩为陆壳岩石部分熔融的产物。因此, P、Ti 相对亏损, 可能是成岩过程中钛铁矿、磷灰石、榍石等矿物的早期结晶分离所致; Sr 具明显的负异常, 说明源区斜长石分离结晶作用较强; 地壳部分熔融过程中, Nb、Ta 等高场强元素不易进入熔体,导致了这些元素的相对亏损。

#### 4.2.2 赤铁矿硅质岩

主量元素方面,赤铁矿硅质岩高 SiO<sub>2</sub>(58.28%)、 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(26.13%)、BaO(9.66%)、SO<sub>3</sub>(5.36%),低 FeO(0.54%)及其他造岩元素,这与镜下观察到的 含有大量石英、赤铁矿和重晶石矿物的现象是吻 合的。

稀土具有总含量低(ΣREE 为 35.09×10<sup>-6</sup>)、 LREE 富集(LREE/HREE 为 4.49)、高的正 Eu 异 常(δEu 为 2.37)的特点,其正 Eu 异常表明其并非 正常沉积岩。稀土配分模式(图 9c)既不同于矿区 (含矿)英安岩和含矿火山碎屑岩的稀土配分模式, 也不同于现代海水的 LREE 亏损、显著的负 Ce 异 常的稀土配分模式。海底热流体调查表明,海底高 温热流体普遍具有轻稀土富集、高的正 Eu 异常的 特点(Crane et al.,1991)。目前大西洋中脊 Snake Pit、东太平洋海隆、加利福尼亚湾 Guaymas basin、 西北太平洋 Endeavor 段和 Escanaba 海槽、马里亚





(c, based on Maniar et al., 1989), K2O-SiO2(d, based on Peccerillo et al., 1976) of the dacite from Yueliangping Pb-Zn deposit

纳岛弧后扩张中心等区域的海底热液喷流口喷出的 热水沉积物均具有明显的正 Eu 异常特征 (Klinkhammer et al.,1994),前寒武纪条带状含铁 建造(BIF)的热水沉积硅质岩也具有类似特征 (Kato et al.,1998)。月亮坪喷流岩正 Eu 异常的存 在,表明了该地区海底热液喷流系统的存在,高的正 Eu 异常形成原因可能是循环海水下渗过程中交代 斜长石从而形成富集 Eu 的热液流体。

微量元素蛛网图(图 9d)与矿区内火山岩均有 较大差别,富集 Ba、U、Pb、Sr 等元素,而相对亏损 Rb、Th、Ta、Nb、P、Zr、Ti 等。Zr 是陆源元素代表 之一,样品 Zr 含量<2×10<sup>-6</sup>,反映了无陆缘碎屑参 与沉积作用。正常沉积岩 U/Th<1,而热水沉积岩 U/Th>1(Rona et al.,1988,1993;Peng Jun et al., 1999,2000a,2000b;Tao Gang et al.,2016),这是因为热水沉积速率高的特点有利于 U 的富集。样品 U/Th 达 23.6,比值大,表现出热水沉积岩的地化 特征。Co/Ni 的值小于 1 时也反映热水沉积作用成 因的特征(Pan Jiayong et al.,2001),样品 Co/Ni 比 值为 0.17,明显小于 1,进一步证明为热水沉积。

### 4.2.3 铅锌矿石

矿区铅锌矿石稀土总量(ΣREE)为108.53× 10<sup>-6</sup>~173.24×10<sup>-6</sup>,LREE/HREE 比值为6.55~ 11.45,富集轻稀土元素,模式斜率(La/Yb)<sub>N</sub>为8.50~14.97,配分曲线呈右倾式(图9c);δEu为0.67~0.82,为负Eu异常。微量元素蛛网图(图9d)显示,富集Rb、Th、U、K、Pb,亏损Sr、Ba、Ta、Nb、P、Ti等。稀土配分曲线模式和微量元素蛛网





图 9 月亮坪铅锌矿英安岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b),铅锌矿石及赤 铁矿硅质岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(c)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(d)(标准值据 Sun et al.,1989) Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns (a, c); primitive mantle-normalized trace element patterns (b,d) diagrams of the dacite, Pb-Zn ore and hematite siliceous rock from Yueliangping Pb-Zn deposit (normalization values after Sun et al.,1989)

图曲线(图 9c、d)均与下盘英安岩曲线相似,暗示成 矿元素主要来自下伏英安岩。

## 5 讨论

### 5.1 矿床成因类型及成矿时代

### 5.1.1 矿床成因类型

火山成因块状硫化物矿床(VMS)是在水下环 境中由火山活动加热的循环热液流体形成的贱金属 矿床(Tornos et al.,2015),具有独特的地质特征 (Hannington,2014;Ye Tianzhu et al.,2014):① 矿 石围岩为火山岩及火山岩系中的沉积岩;② 层状矿 体下伏多有脉状、网脉状矿体产出,形成"上层下脉" 二元结构,各自的发育程度有所不同,如新疆阿舍勒 铜锌矿、可可塔勒铅锌(银)矿、云南鲁春铜矿、青海 德尔尼铜矿、四川嘎衣穷多金属矿、甘肃小铁山、四 个圈多金属矿以层状矿体为主(Zheng Yi et al., 2013;Li Xiaohu et al.,2014;Yang Fuquan et al., 2016;Deng Jun et al.,2016),容矿围岩为火山碎屑 岩,甘肃折腰山、火焰山、铜厂沟铜锌矿、石居里沟铜 矿、青海银灿铜锌矿以脉状矿体为主(Li Wenyuan et al., 1999; Guo Zhouping et al., 2018), 容矿围岩 主要为火山熔岩;③脉状、网脉状等补给带脉状、网 脉状矿体赋存于筒状热液蚀变火山岩中,蚀变岩筒 普遍硅化、绿泥石化、绢云母化,主要由于热液流体 蚀变火山岩所形成的,而上盘火山岩蚀变微弱;④ 常含有铁(锰)硅质岩或碧玉岩,以及重晶石、硬石膏 等硫酸盐矿物等形成的喷流岩,主要分布在层状矿 体之上,如日本黑矿化学沉积岩为重晶石岩、赤铁矿 硅质岩,冲绳矿床为重晶石岩、硅质烟囱、重晶石-非 晶质硅结壳,呷村锌铅铜矿化学沉积岩为纯硅质岩、 重晶石岩、磁铁矿硅质岩(Hou Zengqian et al., 1991,1996a);⑤ 矿床显示有矿物-化学分带,下部 为富铜硫化物,上部为富铅锌硫化物,即"下黄上 黑",如日本黑矿、四川呷村(Hou Zengqian et al., 1993,1996a);⑥ 金属主要来源于下伏火山岩的淋 滤,同时代岩浆亦具有潜在的重要作用 (Hannington, 2014);⑦ 矿体与火山机构关系密切, 如甘肃折腰山矿床不仅发现管道相次火山岩,还常

1000

/球粒陨石 /100

品

见角砾集块岩,由火山机构中心向四周可见集块和 角砾逐渐减少、粒度变细的特点(Guo Kaifeng et al.,2018)。

与上述特征对比,首先,月亮坪铅锌矿体赋存于 火山岩系中,并具有"上层下脉"的空间样式。含矿 岩系是一套英安岩夹火山碎屑岩,岩矿石组合从下 至上(图 2b),由英安岩(层状矿体下盘)一网脉状铅 锌矿体(英安岩容矿)一层状铅锌矿体(火山角砾集 块岩容矿)一块状赤铁矿和赤铁矿硅质岩—不含矿 英安岩(上盘)。由于矿体规模尚未得到有效控制, 据现有稀疏探矿工程推断层状矿体走向长近 500 m,脉状矿体深部延伸长度大于 200 m,该矿可能为 "层矿"和"脉矿"并重的矿床。

其次,月亮坪铅锌矿围岩蚀变不对称。下盘火 山岩蚀变强烈,脉状、网脉状矿体与绿泥石化、硅化、 绢云母化蚀变相伴出现,为成矿流体运移的通道系 统;层状矿体在空间上与火山角砾集块岩、凝灰岩等 火山碎屑岩同层位,上覆火山岩蚀变微弱,这与 Lydon(1984)总结的典型 VMS 矿床描述模型具有 一致性。

再次,月亮坪铅锌矿层状矿体上部产有赤铁矿 硅质岩及重晶石等热水沉积作用产物。赤铁矿硅质 岩与上覆火山岩呈整合状接触(图 5a),发育条纹状 沉积构造(图 5b);赤铁矿矿物普遍发育胶状结构, 可能是成矿时温度下降过速的缘故。硅质岩 Zr 含 量<2×10<sup>-6</sup>,反映为非陆源;U/Th达23.6,Co/Ni 为 0.17,具有热水沉积岩相应元素比值特征, Ba 含 量 86517.8×10<sup>-6</sup>,与镜下鉴定有重晶石分布的现 象相吻合;稀土配分模式 δEu 为 2.37,具有明显的 正 Eu 异常,这是因为 Eu 在高温还原热液流体中以 2<sup>+</sup>价态可以有效地迁移富集于成矿溶液中(Bau, 1991);在 Al-Fe-Mn 三角图解(图 10a)中投点于 [ 区,属海底喷流作用形成的喷流岩。层状矿体产于 该喷流岩层之下,上盘火山岩未见明显矿化蚀变,由 层状矿体至喷流岩的矿物变化为硫化物→硫酸盐和 黄铁矿→赤铁矿,形成了明显的酸-碱地球化学界面 和氧化-还原地球化学界面。

另外,矿区内火山机构由于受后期岩浆活动和 造山作用的破坏难以观察,但一般而言,火山角砾集 块岩离火山喷口最近,大体可以指示火山机构中心 的位置,矿区分布的角砾集块岩带与层状矿体同层 位(图 2),是矿床附近存在火山机构的标志,可知火 山机构是本矿最重要的成矿地质体。

然而,与一般 VMS 矿床"下黄上黑"矿石分带

性相比,本矿矿石以 Pb 为主,Zn 次之,Cu 品位多在 基本化学分析检出限之下,即以"黑矿"为主,不发育 "黄矿"。Pb 和 Zn 内生地球化学性质极为相似,但 原生分布不同,Pb 在长英岩类富集,Zn 在基性岩中 富集(Lyolon,1988),本矿 Pb 与(Pb+Zn)质量比为 0.83~0.97,反映金属组分主要来自长英质岩类。 矿石稀土配分曲线和微量元素蛛网曲线均与下盘英 安岩相似,暗示成矿元素主要来自下伏长英质岩石。 原因可能是当时该地区弧后区"基底"为陆壳,形成 大量长英质岩石,而缺乏玄武岩系,从而导致富 Pb 低 Zn 贫 Cu。

以上证据表明,月亮坪铅锌矿床属 VMS 型。 而 VMS 型矿床按矿石组成、围岩性质和构造环境 一般分为塞浦路斯型、别子型、黑矿型和诺兰达型等 4 种类型(Sangster et al.,1976;Franklin et al., 1981),其中黑矿型产于汇聚板块边缘的岛弧火山带 和弧后盆地的拉斑玄武岩、钙碱性火山熔岩套、火成 碎屑岩中,主要为 Pb-Zn-Cu(Ag-Au)矿。本矿大地 构造背景为陆缘弧的弧后拉张环境(讨论见下文), 未出现洋壳,尚属地壳背景,容矿岩石为双峰式火山 岩组合系列的长英质火山岩,成矿环境上可与现代 冲绳海槽矿床和中新世日本黑矿类比(Hou Zengqian et al.,1996b),将3个单工程各自的平均 品位数据投影在 Cu-Pb-Zn 三角图解上(图 10b),均 落在冲绳海槽矿床(现代黑矿)范围内,进一步表明 为黑矿型 VMS 矿床。

### 5.1.2 成矿时代

月亮坪铅锌矿床属火山岩块状硫化物矿床,成 矿时代上与同期火山作用关系密切。层状矿体是从 海底热液沿火山机构喷流排放到古水/岩界面而沉 淀形成的硫化物堆积物,与火山碎屑岩层位相同,具 有同生矿床性质,其与上覆或上旋回英安岩为整合 接触,成矿时间不晚于上覆火山岩成岩时间;脉状矿 体为补给通道产物,填充于层状矿体下伏英安岩的 裂隙中,在一定程度上具有后生矿床的特点,成矿时 间不早于赋矿围岩成岩时间。本次工作测得层状矿 体上覆英安岩和赋存脉状矿体的英安岩 U-Pb 年龄 分别为 247.8±1.1 Ma 和 249.0±1.1 Ma,月亮坪 铅锌矿床即形成于这两次火山活动间歇期,指示矿 床的形成时代为早三叠世。

综上,月亮坪火山硫化物矿床产于陆缘弧弧后 伸展背景,具有典型的"上层下脉"二元结构和矿化 蚀变特征,成矿地质体为火山机构和火山岩,成矿金 属主要来自下伏长英质岩石,成矿时代为早三叠世,



图 10 月亮坪赤铁矿硅质岩 Al-Fe-Mn 三角图解(a,底图据 Adachi et al.,1986)和 矿体品位 Cu-Pb-Zn 三角图解(b,底图据 Hou Zenggian et al.,1996b)

Fig. 10 Al-Fe-Mn ternary diagram of the siliceous rocks (a, based on Adachi et al. ,1986) and ternary diagram Cu-Pb-Zn of orebody (b, based on Hou Zengqian et al. ,1996b) from Yueliangping Pb-Zn deposit





A--变质泥岩部分熔融;B--变质杂砂岩部分熔融;C--变质玄武岩到变质英云闪长岩部分熔融

 $A-Partial\ melts\ from\ metapelitic\ sources; B-partial\ melts\ from\ metapesitic\ sources; B-partial\ meltapesitic\ sources; B-partial\ melta$ 

初步认为矿床类型属 VMS 黑矿型。

### 5.2 矿区火山岩构造环境

矿区英安岩具有中高 SiO<sub>2</sub> 含量, A/CNK > 1.1, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值高, 以及富集 K、Zr 等微量元 素,在 SiO<sub>2</sub>-Zr 图解(图 11a)中, 样品落入 S 花岗岩 区,在 C/MF-A/MF 图解(图 11b)中, 样品落在或者 靠近 A 区(变质泥质岩部分熔融), 反映岩浆主要来 自硅铝质地壳。在 logτ-logδ 图解中(图 12a), 样品 均落入 B 区, 为造山带(岛弧及活动大陆边缘区)火 山岩, 而且主要分布在 B 区 J 线附近, 与日本岛弧火 山岩相当;在 Rb/30-Hf-3Ta 图解和 Nb-Y 及 Ta-Yb 图解(图 12b、c、d)上,构造环境得到进一步区 分,英安岩基本落在岛弧火山岩区。因此矿区英安 岩具有明显的岛弧火山岩的色彩,并且可能是硅铝 质地壳深熔作用而形成。

与该火山带空间上紧密相伴分布有上兰组 (T<sub>1-2</sub>s)(图 1b),是一套滨浅海陆缘碎屑沉积、浅海 陆棚碳酸盐岩台地沉积和深海-半深海复理石沉积 组合,该组地层层序、岩性组合反映出从下至上水体 逐渐变深的沉积组合序列(Mou Chuanlong et al.,



图 12 月亮坪铅锌矿英安岩 log-logo 图解(a), Rb/30-Hf-3Ta 图解(b,底图据 Harris et al., 1986), Nb-Y 图解(c)和 Ta-Yb 图解据(d,底图据 Pearce et al., 1984)

Fig. 12 Diagram of  $\log_{\tau}$ -log $\delta$  (a); diagram of Rb/30-Hf-3Ta (b, after Harris et al. ,1986); diagram of Nb-Y (d);

diagram of Ta-Yb (d, after Pearce et al. ,1984) for the dacite from Yueliangping Pb-Zn deposit

(a)一A区:非造山带地区火山岩,B区:造山带地区火山岩,C区:A区、B区派生的碱性、富碱岩;J:日本火山岩;(c、d)一WPG:板内花岗岩, VAG:火山弧花岗岩,Sys-COLG:同碰撞花岗岩,ORG:大洋中脊斜长花岗岩

(a)—A: volcanic rocks in non orogenic zone,B: volcanic rocks in orogenic belt,C: alkaline and alkali rich rocks derived from zone A and B, J: japanese volcanic rocks; (c, d)—WPG: within-plate granite, VAG: volcanic arc granite, Sys-COLG: syncollision granite, ORG: middle oceanic ridge plagiogranite

1999; Pan Guitang et al., 2003; Mao Jingwen et al., 2006)。本组在剑川上兰一带厚度达 3162 m, 与火山岩为断层接触或喷发不整合接触。云南省地 矿局(1996)据该组化石组合判断时代属 Anisian 期,因此长久以来将其时代划归中三叠世。根据 Liang Mingjuan et al. (2015)对上兰组的最新研究, 于剑川马登地区获得该组下部凝灰岩碎屑锆石 U-Pb 年龄为 257.9~247.7 Ma,结合生物化石地层时 代,笔者认为该组与早一中三叠世"双峰式"火山岩

### 为同时期产物。

攀天阁组(T<sub>1-2</sub> *p*)酸性火山岩与崔依比组(T<sub>1-2</sub> *c*) 基性火山组成的双峰式火山岩组合所代表的伸展背 景的观点,被大多数学者所接受。上兰组沉积岩和 "双峰式"火山岩的空间配套组合与弧后盆地填充物 组合可类比(Peng Yongming et al.,1999),加之其 未有洋壳出现,沉积相环境上与弧后盆地拉张的幼 年期相吻合,因此认为攀天阁组(T<sub>1-2</sub> *p*)是弧后伸展 环境"双峰式"火山岩的酸性端元。

该套火山岩东侧毗邻金沙江结合带,该结合带 从晚古生代到三叠纪经历了金沙江洋俯冲、弧-陆碰 撞、碰撞后等一系列连续的演化过程(Wang Xiaofeng et al., 2000; Zi Jianwei et al., 2013)。前 人资料显示,金沙江洋可能形成于早石炭世(Jian Ping et al., 2009; Zi Jianwei et al., 2012b), 早二叠 世开始向西俯冲消减于昌都-兰坪地块之下(Jian Ping et al., 2008; Zi Jianwei et al., 2012b)。维西陆 缘火山弧的形成与金沙江弧后洋盆的俯冲消减具有 很好的时空对应关系,弧火山岩分布于金沙江结合 带西侧,部分直接叠覆于金沙江构造混杂岩带之上, 时代上从早二叠世一直延续至晚三叠世早期(Wang Liquan et al., 2000)。二叠纪弧火山岩的铅同位素 显示属岛弧火山岩,组成靠近兰坪地块东侧的金沙 江玄武岩区,而远离兰坪地块西侧的澜沧江玄武岩 区(Wang Liquan et al., 2000)。另外维西陆缘弧早 二叠纪火山岩岩石组合和地球化学特征表明,属活 动大陆边缘安第斯型火山岩,明显不同与兰坪盆地 西侧分布的西太平洋岛弧型早二叠纪火山岩(Wu Genyao et al., 2000)。以上表明维西陆缘火山弧的 形成是金沙江洋壳向西俯冲消减作用的产物。

结合区域有关资料,认为在二叠纪末期金沙江 洋壳继续向西俯冲,进入早三叠世后,俯冲角度可能 变陡,导致出现弧后拉张构造背景,形成了攀天阁组 +崔依比组"双峰式"岛弧型火山岩和上兰组海相沉 积岩组成的弧后拉张环境火山-沉积物,它们是洋壳 俯冲事件的产物。本矿区及周围地区未出现崔依比 组(T<sub>1-2</sub>c)基性端元,而大量爆发攀天阁组(T<sub>1-2</sub>p)酸 性岩,其原因可能是二叠纪时期受金沙江洋俯冲而 致使本地区地壳缩短增厚,在三叠纪早期由于过厚 的地壳阻止了俯冲作用形成的玄武岩质岩浆喷发, 但深部岩浆房对地壳不断的加热而形成长英质岩 浆,之后长英质岩浆在伸展背景中上升并喷发到 地表。

随后,金沙江洋在中三叠世开始闭合(Zhang Qi et al.,1996;Zhong Dalai,1998;Wang Xiaofeng et al.,1999;Zeng Pusheng et al.,2015,2018),发生 以白马雪山岩体和鲁甸岩体等花岗岩(图 1b,239~ 214 Ma;Jian Ping et al.,2003;Gao Rui et al.,2010) 以及羊拉地区的贝吾、里农、路农花岗岩等岩体(239 ~213 Ma;Zhu Jingjing et al.,2011;Zeng Pusheng et al.,2018)侵位为代表的碰撞造山事件,之后处于 碰撞后伸展环境,依次沉积了上三叠统磨拉石建造、 海相碳酸盐岩建造及海陆交互相碎屑岩建造。

#### 5.3 成矿模式

VMS型形成方式与现代海底热水硫化物极为 相似,用洋底热水沉积模式阐明 VMS 的形成几乎 不存在异议(Tu Guangchi et al., 1997)。现在发现 的海底热液成矿作用的喷流活动点多集中在于红 海、大西洋中脊、东太平洋隆起、西南印度洋中脊、西 太平洋消减带等五大区域(Fu Wei et al., 2005),其 主要发生在板块构造的边界、洋脊扩张中心、弧后扩 张中心以及板内火山活动中心,是岩石圈物质排放 和能量转换的重要途径(Rona P A, 1984; Zhong Dakang et al., 2005; Zhao Jing et al., 2015), 这些 环境处于高渗透性的大断裂中,底部岩浆房可以持 续稳定地与海水形成对流循环,不断提取基底岩石 中的成矿元素,促进成矿元素的汇集喷出(Xue Haori,2017)。现代海底热液硫化物的成矿物质来 源主要来自于热液流体对洋壳的淋滤和深部岩浆房 挥发分的直接释放(Wang Yejian et al., 2012)。矿 床主体以沉积方式形成于水-岩界面之上的水体中, 以交代和充填的方式形成界面以下的筒状、锥状或 面型热液含矿蚀变体,两者可共生或分别出现(Tu Guangchi,1989)。因此,成矿物质在水-岩界面以下 的喷流补给通道中则形成了网脉状、筒状的通道相 矿体,之上则形成与围岩整合的层状、透镜状的沉积 相矿体,即"上层下脉"或"上层下筒"的二元结构。

综合野外实际现象和上述讨论,初步认为月亮 坪其成矿模式(图13)如下:①循环的海水在海底之 下,受深部岩浆热和流体驱动,与下伏的火山岩发生 一系列反应,形成了携带大量金属的含矿热液流体; ②该矿区以火山角砾集块岩为代表的喷发中心的 火山机构,为流体的排泄提供了通道,形成了近直立 的、切穿英安岩地层的绿泥石-石英-绢云母蚀变 "管",由于成矿流体压力的释放引起沸腾,导致了围 岩的隐爆角砾岩化和碎裂岩化,在有利的火山机构 和裂隙中沉淀了大量网脉状方铅矿-闪锌矿-黄铁矿-石英脉体;③温度较高的还原性热液流体喷到海底 后,迅速与周围冷的海水混合,Eh、pH、温压等物化 条件突变,形成了铅锌矿块状矿石、块状赤铁矿、赤 铁矿硅质岩、重晶石堆积物。

### 5.4 地质意义

对于大多数 VMS 矿床的构造背景,一种被广 泛接受的模式是夭折的弧裂谷,例如日本中新世黑 矿的构造背景(Cathles et al.,1983)。这些环境中, VMS 矿形成地区最初经过弧有关的海底火山作用 而快速伸展和沉降到达深海条件,弧后扩张期间形



图 13 月亮坪铅锌矿成矿模式图 Fig. 13 The mineralization model diagram of Yueliangping Pb-Zn deposit Hm-赤铁矿;Qz-石英

Hm-Hematite; Qz-quartz

成矿床,随着盆地的闭合和抬升而受到挤压。呈带 状的弧后地壳被拼贴在弧-弧、弧-陆碰撞带上,或者 夹在活动边缘和大陆之间,从而有利于保存块状硫 化物矿床(Hannington,2014)。

区域上,该套火山岩代表的弧后扩张背景下岩 浆活动时间跨度在7 Ma 左右,喷发时间较短,且伴 随的上兰组上部沉积物显示该区沉降到达了深海-半深海条件,矿区英安岩显示成矿年龄约为 247.8 Ma,处于该带火山活动的活动峰期(247 Ma 左右)。 随之金沙江洋盆闭合,该火山岩带被快速拼贴到了 兰坪地块和扬子地块碰撞带上。由于其弧后拉伸演 化过程中,一直未出现洋壳,具有岛弧裂谷特点,而 且演化时限短,因此就构造演化方面而言,该火山岩 本矿的发现是维西火山弧早一中三叠世火山活 动时期存在 VMS 型矿床的实证,而且该火山岩带 表现出有利保存 VMS 型矿床的地质条件。而以往 该区的矿产地质工作多集中在火山岩上覆的上三叠 统沉积岩及西侧毗邻的兰坪盆地中新生代沉积岩 区,而对火山岩的成矿重要性认识不足,甚至将其作 为钻探终孔标志层,找矿工作一直未有突破。因此, 本文认为本带火山岩是一个重要的找矿层位,在今 后工作中有必要对其矿产资源价值给予重视。

### 6 结论

(1)该区经过了完整的古特提斯洋壳俯冲和碰 撞事件,金沙江洋在二叠纪时期向西俯冲,形成了安 第斯型俯冲型消减构造,早一中三叠世随俯冲角度 变陡而形成了双峰式火山岩为特征的弧后伸展环境,中三叠世兰坪地块与扬子地块碰撞引发岩浆侵位,晚三叠世进入碰撞后伸展环境,形成了残余海相断陷盆地沉积。

(2)攀天阁组(T<sub>1-2</sub> *p*)英安岩兼具"S"花岗岩和 岛弧火山岩特征,是早一中三叠世陆缘弧弧后伸展 环境中产生的一套与硅铝质地壳深熔作用有关的中 高硅、高钾、过铝质长英质喷出岩。

(3)月亮坪 VMS 铅锌矿是赋存于同期"双峰 式"火山岩之长英质岩系的 VMS 黑矿型铅锌矿床, 成矿年龄约为 247.8 Ma,成矿金属元素源自下伏的 长英质岩系。

(4)本矿的发现对维西陆缘弧找矿空间的开辟 具有重要的指示意义,早一中三叠世火山岩可作为 本区重要的 VMS 矿床找矿层位。

**致谢:**感谢中国地质科学院地质研究所的于超 老师在样品分析测试过程中提供的大量帮助,对共 同参与野外工作的云南省地质矿产勘查院洪钟明、 赵超等同事一并表示感谢。

#### References

- Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication od ocean ridge activity. Sedimentary Geology, 47(1-2): 125~148.
- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. Highpotassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). Lithos, 50(1): 51~73.
- Anderson D L. 1983. Chemical composition of the mantle. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 88(S1):  $41 \sim 52$ .
- Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. Chemical Geology, 93: 219~230.
- Cathles L M, Guber A L, Lenagh T C, Dudas F O. 1983. Kurokotype massive sulfide deposits of Japan: products of an aborted island-arc rift. Economic Geology Monograph, 5: 96~114.
- Crane K, Hecker B, Golubev V. 1991. Hydrothermal vents in Lake Baikal. Nature, 350: 281.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian, Li Chunsi, Wang Changming. 2014a. Tethys tectonic evolution and its bearing on the distribution of important mineral deposits in the Sanjiang region, SW China. Gondwana Research, 26(2): 419~ 437.
- Deng Jun, Wang Qingfei, Li Gongjian, Santosh M. 2014b. Cenozoic tectonomagmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, Southwestern China. Earth-Science Reviews, 138: 268~299.
- Deng Jun, Li Wenchang, Mo Xuanxue. 2016. Complex Orogeny and Mineralization of Sanjiang Tethys. Beijing: Science Press: 480~524 (in Chinese).
- Editorial Board of the Handbook of Industrial Requirements for Mineral Resources. 2010. Handbook of Industrial Requirements for Mineral Resources. Beijing: Geological Publishing House, 121~136 (in Chinese).
- Franklin J M, Sangster D F, Lydon J W. 1981. Volcanic-associated massive sulfide deposits. Economic Geology, (75th Anniv): 485~627.

- Fu Wei, Zhou Yongzhang, Yang Zhijun, Zhang Chengbo, Yang Xiaoqiang, He Junguo, Yang Haisheng, Luo Chunke. 2005. Modern seafloor hydrothermal system and its scientific implications. Advances in Earth Sciences, 20(1): 81~88 (in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Xiao Long, He Qi, Yuan Jing, Ni Pingze, Du Jingxia. 2010. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of granites in Weixi-Deqin, west Yunnan. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 35(2): 186 ~ 200 (in Chinese with English abstract).
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system. Chemical Geology, 120(3-4): 347~359.
- Guo Kaifeng, Chen Shouyu. 2018. Progress of geochemical research in Baiyinchang Cu-polymetallic ore field. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 33(4): 517~526(in Chinese with English abstract).
- Guo Zhouping, Zhao Xinmin, Wang Yuxi, Bai Yun, Zhang Jiangwei, Gao Yongwei, Zhang Haisong. 2018. Geochronological and geochemical study of volcanic rocks from the Yincan Cu-Zn deposit in North Qilian. Acta Geologica Sinica, 92(6): 1297~1312(in Chinese with English abstract).
- Hannington M D. 2014. Volcanogenic massive sulfide deposits. Treatise on Geochemistry, 47(5): 463~488.
- Harris N B W, Pearce J A, Tendle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward M P, Ries A C, eds. Collision Tectonics. Geological Society, London, Special Publication, 67~81.
- Hou Zengqian. 1991. Ore fluid chemistry, thermal evolution history and ore-forming process of the Gacun Kuroko type polymetallic deposit in western Sichuan. Mineral Deposits, 10(4): 313~324 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue. 1993. Geology, geochemistry and genetic aspects of kuroko-type volcanogenic massive sulfide deposits in Sanjiang region, Southwestern China. Exploration and Mining Geology, 2(1): 17~29.
- Hou Zengqian, Urabe T. 1996a. Hydrothermal alteration of orebearing volcanic rocks and mass chemical change in the Gacun kuroko-type deposit, weatern Sichuan. Mineral Deposits, 15 (2): 97~108(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Urabe T. 1996b. A comparative study on geochemistry of sulfide ores from the Kuroko-type deposits on ancient and modernsea-floor. Geochimica, 25(3): 228~241(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zaw K, Pan Guitang, Mo Xuanxue, Xu Qiang, Hu Yuzhaong, Li Xingzhen. 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in SW China: tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types. Ore Geology Reviews, 31(1-4): 48~ 87.
- Hou Zengqian, Zhang Hongrui. 2015. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain. Ore Geology Reviews, 70: 346~384.
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Lu Zhanwu, Xu Bo, Wang Changming, Zhang Hongrui. 2020. Growth, thickening and evolution of the thickened crust of the Tibet Plateau. Acta Geologica Sinica, 94(10): 2797~2815(in Chinese with English abstract).
- Huang Yufeng, Cao Dianhua, Wang Zhijun, Li Yike, Wang Anjian. 2011. Sedex deposit genesis of the Pb-Zn deposits in the northeastern margin of Lanping basin in Yunan: evidence from mineralogical and sulfur isotopic studies. Journal of Geomechanics, 17 (1): 91 ~ 102 (in Chinese with English abstract).
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8(5): 523~548.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Sun Xiaomeng. 2003. SHRIP dating of Baimaxueshan and Ludian granitoid batholiths, northwestern Yunnan Pronvince, and its geological implications. Acta

Geoscientia Sinica, 24(4):  $337 \sim 342\,($  in Chinese with English abstract).

- Jian Ping, Liu Dunyi, Sun Xiaomeng. 2008. SHRIMP dating of the Permo-Carboniferous Jinshajiang ophiolite, Southwestern China: geochronological constraints for the evolution of Paleo-Tethys. Journal of Asian Earth Sciences, 32(5-6): 371~384.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Kr? ner A, Zhang Qi, Wang Yizhao, Sun Xiaomeng, Zhang Wei. 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in Southwest China (II): insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province. Lithos, 113(3-4): 767~784.
- Kalfoun F, Ionov D, Merlet C. 2002. HFSE residence and Nb/Ta ratios in metasomatised, rutile-bearing mantle peridotites. Earth & Planetary Science Letters, 199(1-2): 49~65.
- Kato Y, Ohta I, Tsunematsu T, Watanabe Y, Isozaki Y, Maruyama S, Imai N. 1998. Rare earth element variations in mid-Archean banded iron formations: implications for the chemistry of ocean and continent and plate tectonics. Geochimica et Cosmochimica Acta, 62(21-22):3475~3497.
- Klinkhammer G P, Elderfied H, Mitra A. 1994. Geochemical implications of rare earth element patters in hydrothermal fluids from mid-ocean ridges. Ceochimica et Cosmochimica Acta, 58 (23): 5105~5113.
- Li Huan, Xi Xiaoshuang, Wu Chengming, Di Chunxia. 2011. Geology and metallogenesis of the Zhaokalong iron-copperpolymetallic ore deposit in Yushu, Qinghai Province. Geology and Exploration, 47(3): 380 ~ 387 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenchang, Pan Guitang, Hou Zengqian. 2010. Metallogenic Theory and Exploration Technology of Sanjiang Multi Island Lake Basin Collision Orogeny in Southwest China. Beijing: Geological Publishing House, 50~250(in Chinese).
- Li Wenyuan. 2007. Classification, distribution and forming setting of massive sulfide deposits. Journal of Earth Sciences and Environment, 29 (4):  $331 \sim 344$  (in Chinese with English abstract).
- Li Wenyuan, Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Yang Hequn, Zhao Donghong, Sun Zhongbao. 1999. On Shijuligou copperenriched massive sulfide deposit, Sunun Gansu, China: implications for volcanism and metallization of Early Palaeozoic back-arc basin, the North Qilian Mountains. Geological Review, 45 (S1): 1047 ~ 1053 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaohu, Chu Fengyou, Lei Jijiang, Tu Xing, Zhang Bengping. 2014. The copper isotopic composition of sulfide ores and deposit genesis of the Dur'ngoi Cu(Zn-Co) deposit in Qinghai Province, China. Earth Science Frontiers, 21(1): 196~204(in Chinese with English abstract).
- Liang Mingjuan, Yang Tiannan, Shi Pengliang, Xue Chuandong, Xiang Kun, Liao Cheng. 2015. U-Pb geochronology, Hf isotopes of zircons from the volcanic rocks along the eastern margin of Lanping basin, Sanjiang orogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 31 (11): 3247 ~ 3268 (in Chinese with English abstract).
- Lü Yu, Rang Hao, Chang Hong. 2017. The feature and prospecting criteria of Lirenka Pb-Zn deposit in Deqin, Yunnan. Yunnan Geology, 36(1): 58~62(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center.
- Lydon J W. 1988. Volcanogenic massive sulfide deposits(Part 2). Geoscience Canada, (15): 43~65.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101: 615  $\sim$ 643.
- Mao Jingwen, Hu Ruizhong, Chen Yuchuan. 2006. Large Scale Mineralization and Large Ore Concentration Areas (Volume I). Beijing: Geological Publishing House, 443~533(in Chinese).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, Dong Guochen, Zhou Su,

Guo Tieying, Zhang Shuangquan, Wang Liangliang. 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision. Earth Science Frontiers, 10 (3): 136  $\sim$  149 (in Chinese with English abstract).

- Mou Chuanlong, Wang Jian, Yu Qian, Zhang Lisheng. 1999. The evolution of the sedimentary basin in Lanping area during Mesozoic-Cenozoic. Journal of Mineralogy and Petrology, 19 (3): 30~36(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xu Qiang, Hou Zengqian. 2003. Metallogenic System and Resource Evaluation of the Sanjiang Multi Island Arc Orogenic Process in Southwest China. Beijing: Geological Publishing House, 30~58(in Chinese).
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, Hergt J M, Greig A, Maas R. 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. Geochemistry Geophysics Geosystems, 11: Q0AA06.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discirimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25: 956~983.
- Peccerillo R, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. Contributions to Mineralogy and Peorology, 58: 63  $\sim$ 81.
- Peng Jiayong, Zhang Qian, Ma Dongsheng, Li Chaoyang. 2001. Characteristics of siliceous rocks and their relationship with mineralization in Yangla copper deposit, western Yunnan. Science in China(Series D), 31(1): 10~16 (in Chinese).
- Peng Jun, Xia Wenjie, Yi Haisheng. 1999. Geochemical characteristics and depositional environments of the late Precambrian bedded siliceous rocks in western Hunan. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 19(2):  $29 \sim 37$  (in Chinese with English abstract).
- Peng Jun, Tian Jingchun, Yi Haisheng, Xia Wenjie. 2000a. The late Precambrian hot water sedimentation of the southeast Yangtze plate continental margin. Acta Sedimentologica Sinica, 18(1): 107~113(in Chinese with English abstract).
- Peng Jun, Yin Haisheng. 2000b. Geochemical criteria of the upper Sinian hydrothermal chert on the southeast continental margin of the Yangtze plate. Journal of Chengdu University of Technology, 27(1): 8~14(in Chinese with English abstract).
- Peng Yongmin, Pan Guitang. Luo Jianning. 1999. The volcanicsedimentary characteristics of back-arc basins. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 19(5):  $65 \sim 72$  (in Chinese with English abstract).
- Plank T, Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. Chemical Geology, 145(3-4): 325~394.
- Rona P A. 1984. Hydrothermal mineralization at seafloor spreading centers. Earth Science Reviews, 20:  $1{\sim}104$ .
- Rona P A. 1988. Hydrothermal mineralization at oceanic ridges. Canadian Mineralogist, 26(3): 431~466.
- Rona P A, Scott S D. 1993. A special issue of seafloor hydrothermal mineralization: new perspecitive. Economic Geology, 88(8): 1935~2078.
- Sangster D F, Scott S D. 1976. Precambrian statabound, massive Cu-Zn-Pb sulfide deposits of North America. In: Wolf K A, ed. Cu, Zn, Pb and Ag Deposits. Amsterdam: Elsevier, 129~ 222.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publication, 42 (1): 313~345.
- Tang Jing, Xue Chuandong, Yang Tiannan, Liang Mingjuan, Xiang Kun, Liao Cheng, Jiang Lili, Xin Di. 2016. Late Permian to Early Triassic tectonostratigraphy of Madeng area, northwestern Yunnan, SW China: volcanics zircon U-Pb dating. Acta Petrologica Sinica, 32(8): 2535~2554(in Chinese with English abstract).
- Tang Yufei, Liu Xiaochun, Dong Hongguo. 2013. Thezonation

feature of Jianji Fe deposit in Jianchuan, Yunnan. Yunnan Geology, 19(1): 397 $\sim$  399(in Chinese with English abstract).

- Tao Gang, Yang Wenguang, Zhu Lidong, Li Zhiwu, Xie Long, Fan Wei, He Yuan, Liu He, Li Chao. 2016. Lithological characteristics and sedimentary models of the lacustrine hydrothermal sedimentary rocks of the Neogene Suonahu Formation on the southern edge of Qiangtang. Journal of Mineralogy and Petrology, 36 (1): 72 ~ 81 (in Chinese with English abstract).
- Tornos F, Peter J M, Allen R, Conde C. 2015. Controls on the siting and style of volcanogenic massive sulphide deposits. Ore Geology Reviews, 68.  $142 \sim 163$ .
- Tu Guangchi. 1989. Several special hydrothermal sedimentary deposits in Southern China. In: Institute of Deposit Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, ed. Chinese Mineral Deposit Science: in Memory of the 90th Anniversary of Xie Jiarong's Birth. Beijing: Academic Books and Periodicals Press, 189~198(in Chinese).
- Tu Guangchi, Wang Zhonggang, Wang Xiuzhang. 1997. Geochemistry of Ore Deposits. Beijing: Geological Publishing House, 248~265 (in Chinese).
- Wang Baodi, Wang Liquan, Wang Dongbing, Zhang Wanping. 2011. Zircons U-Pb dating of volcanic rocks from Renzhixueshan Formation in Shangdie rift basin of Sanjiang area and its geological implications. Acta Petrologica et Mineralogica, 30 (1): 25 ~ 33 (in Chinese with English abstract).
- Wang Baodi, Wang Liquan, Chen Jianlin, Yin Fuguang, Wang Dongbing, Zhang Wanping, Chen Lingkang, Liu Han. 2014. Triassic three-stage collision in the Paleo-tethys: constraints from magmatism in the Jiangda-Deqen-Weixi continental margin arc, SW China. Gondwana Research, 26(2): 475~491.
- Wang Liquan, Pan Guitang, Li Dingmou, Xu Tongrui. 2000. The evolution and mineralization of the Jomda-Weixi continental marginal volcanic arc, Southwestern China. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 20(2): 1~17(in Chinese with English abstract).
- Wang Liquan, Li Dingmou, Guan Shiping, Xu Tongrui. 2001. The evolution of the Luchun-Hongponiuchang superimposed rifting basin, Deqin County, Yunnan Province. Journal of Mineralogy and Petrology, 21 (3): 81 ~ 89 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liquan, Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Wang Mingjie, Xu Qiang. 2002a. The post-collisional crusta extension setting: an important mineralizing environment of volcanic massive sulfide depositsin Jinsha orogenic belt. Acta Geologica Sinica, 76(4): 541~556(in Chinese with English abstract).
- Wang Liquan, Li Dingmou, Guan Shiping, Xu Tongri. 2002b. The Rb-Sr age determinations of the "bimodal" volcanic rocks in the Luchun-Hongponiuchang superimposed rift basin, Deqen, Yunnan. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 22(1): 65~71(in Chinese with English abstract).
- Wang Liquan, Li Dingmou, Pan Guitang. 2015. Mineral and Metallogenic Geological Background Map and Description of Qinghai Tibet Plateau. Chengdu: Chengdu Map Publishing House, 1~188(in Chinese).
- Wang Xiaofeng, Metcalfe I, Jian Ping, He Longqing, Wang Chuanshang. 1999. The division and age determination of the structural strata in Jinshajiang suture zone. Science in China (Series D), 29(4): 289~297 (in Chinese).
- Wang Xiaofeng, Metcalfe I, Jian Ping, He Longqing, Wang Chuanshan. 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: tectonostratigraphy, age and evolution. Journal of Asian Earth Sciences, 18(6): 675~690.
- Wang Xiaohu, Yang Aiping, Li Wenhui, Yang Shusheng, Fan Zhuguo, Xie Zhipeng, Zhuo Weifeng. 2018. Geochronology and geochemical characteristics of the Guola complex intrusion in the Hongponiuchang Cu-Au mining area of Deqin area, Yunnan Province, and its tectonic and prospecting significance.

Geological Bulletin of China, 39(2-3):  $279 \sim 295$  (in Chinese with English abstract).

- Wang Xuewu, Liu Fengxiang, Li Xinren, Yan Chengmin, Zhou Xilin, Wang Changbing. 2017. Division and characteristics of the geotectonic units of Yunling epicontinental arc in northwest Yunnan. Geology and Resources, 26(3): 229~233(in Chinese with English abstract).
- Wang Yejian, Han Xiqiu, Jin Xianglong, Chu Fengyou, Qiu Zhongyan. 2012. Formation of hydrothermal sulfides precipitates in the Edmond field, Central Indian Ridge: lead and sulfur isotope constraints. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(3): 234~242(in Chinese with English abstract).
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59: 1217~1232.
- Wen Ligang, Zeng Pusheng, Dai Yanjuan, Wang Zhaoquan. 2017. Major bimodal volcanic rocks and associated mineral resources in Yunnan Province, Southwest China. Acta Geologica Sinica, 91 (11): 2493~2520(in Chinese with English abstract).
- Winchester J A, Floyd P A. 1997. Geochemical discrimination of different magmas series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20: 325~343.
- Wu Genyao, Wang Xiaopeng, Zhong Dalai, Nie Zetong, Liang Dingyi, He Fuxiang. 2000. Two arc volcanics suites of Permian-Early Triassic bordering Sichuan, Yunnan and Xizang, China. Scientia Geologica Sinica, 35(3): 350~362(in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Zircon genetic mineralogy and its constrains on the explaning of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589~1604 (in Chinese).
- Xin Di, Yang Tiannan, Liang Mingjuan, Xue Chuandong, Han Xue, Liao Cheng, Tang Jing. 2018. Syn-subduction crustal shortening produced a magmatic flareup in middle Sanjiang orogenic belt, southeastern Tibet Plateau: evidence from geochronology, geochemistry, and structural geology. Gondwana Research, 62: 93~111.
- Xiong Yongzhu, Xia Bin, Lin Li, Pang Yanchun, Zhu Dicheng. 2005. Advances in the research on hydrothermal sedimentary mineralization. Mineral Resources and Geology, 19(3): 233~ 238(in Chinese with English abstract).
- Xue Haori. 2017. Research progress of ancient and modern sea? oor hydrothermal mineralization. Jilin Geology,  $36(1): 1 \sim 5$  (in Chinese with English abstract).
- Xue Shunrong. 2000. A discussion on the feature and genesis of Jinshantao Pb-Zn deposit of Jianchuan. Yunnan Geology, 19 (1): 29~35(in Chinese with English abstract).
- Yang Fuquan, Wu Yufeng, Yang Junjie, Zheng Jiahao. 2016. Metallogenetic model for VMS type polymetallic copper deposits in the Ashele ore dense district of Altay, Xinjiang. Geotectonica et Metallogenia, 40(4): 701 ~ 715 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tiannan, Zhang Hongrui, Liu Yanxue, Wang Zhaolin. Song Yucai, Yang Zhusen, Tian Shihong, Xie Hangqiang, Hou Kejun. 2011. Permo-Triassic arc magmatism in central Tibet: evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry. Chemical Geology, 284: 270~282.
- Yang Tiannan, Xue Chuandong, Xin Di, Liang Mingjuan, Liao Cheng, 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).
- Yang Xian, Liu Jiajun, Han Siyu, Chen Siyao, Zhang Hongyu, Li Jiao, Zhai Degao. 2013. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the Luchun volcanic rocks, and its geological implications in the Luchun Cu-Pb-Zn deposit, Yunnan, China. Acta Petrologica Sinica, 29(4): 1236~1246(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Xu Jifeng, Bian Xiongfei, Wang

Guiren, Yang Zhusen, Tian Shihong, Liu Yingchao, Wang Zhaolin. 2014. Geology and origin of the post-collisional Narigongma porphyry Cu-Mo deposit, southern Qinghai, Tibet. Gondwana Research, 26: 536~556.

- Yao Fengliang, Sun Fengyue. 2006. A Course of Ore Deposit Science. Beijing: Geological Publishing House, 132~153 (in Chinese).
- Ye Tianzhu, Lü Zhicheng, Pang Zhenshan. 2014. Prospecting Prediction Theory and Method in Exploration Area (General). Beijing: Geological Publishing House, 371~375(in Chinese).
- Yin Fuguang, Wang Dongbing, Wang Baodi, Ren Fei. 2017. Stratigraphic classification in the Nujiang-Lancangjiang-Jinshajiang orogenic zone in Southwestern China. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 37(4): 1~8(in Chinese with English abstract).
- Yin Guanghou, Zhu Jun, Yin Jing. 2018. Metallogenic Exploration Technology and Prospecting Potential of Yangla Large Copper Polymetallic Deposit in Sanjiang Orogenic Belt. Kunming: Yunnan Science and Technology Publishing House, 1~222(in Chinese).
- Yu Chao, Yang Zhiming, Zhou Limin, Zhang Liangliang, Li Zhenqing, Zhao Miao, Zhang Jiayu, Chen Weiyan, Suo Mingshi. 2019. Impact of laser focus on accuracy of U-Pb dating of zircons by LA-ICPMS. Mineral Deposits, 38(1): 21 ~28(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Bureau of Geology and Mineral Resources. 1996. Lithostratigraphy of Yunnan Province. Wuhan: China University of Geosciences Press, 227~228(in Chinese).
- Zeng Pusheng, Yin Guanghou, Li Wenchang. 2015. Tectonic Magmatic Metallogenic System in Deqin Yangla Ore Concentration Area, Jinshajiang Orogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House, 1~229(in Chinese).
- Zeng Pusheng, Wang Yanbin, Ma Jing, Wang Zhaoquan, Wen Ligang. 2018. Diachronous collision-closure of the Jinshajiang paleo-ocean basin in the Yangla area: constraints from ages of the granites. Earth Science Frontiers, 25(6): 92 ~ 105(in Chinese with English abstract).
- Zhai Yusheng, Yao Shuzhen, Cai Keqin. 2011. Metallogeny (3rd Edition). Beijing: Geological Publishing House, 216~221(in Chinese).
- Zhang Qi, Zhou Dejin, Zhao Dasheng, Peng Xingjie, Luo Wanlin, Liu Xiangpin. 1996. Wilson cycle of the Paleo-Tethyan orogenic belt in western Yunnan: record of magmatism and discussion on mantle processes. Acta Petrologica Sinica, 12(1): 17~28(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zixiong, Li Lide. 1985. Discussion on the tectonic setting of the volcanic rock series at Sanchahe distict, Lanping County. Yunnan Geology, 4(3): 209 ~ 307 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Dasheng, Liu Xiangpin. 1994. Geochemical characteristics of collision type volcanic rocks from northwestern Yunnan. Geochimica, 23 (3): 235 ~ 244 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jing, Liang Jinlong, Han Bo. 2015. A review and prospect of research on sedimentary exhalative deposits. Geology of Chemical Minerals, 37(5): 236~244(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yi, Zhang Li, Chen Yanjing, Pete Hollings, Chen Huayong. 2013. Metamorphosed Pb-Zn-(Ag) ores of the Keketale VMS deposit, NW China: evidence from ore textures, fluid inclusions, geochronology and pyrite compositions. Ore Geology Reviews, 54: 167~180.
- Zhong Dakang, Jiang Zhenchang, Guo Qiang, Sun Haitao. 2015. A review about research history, situation and prospects of hydrothermal sedimentation. Journal of Palaeogeography, 17 (3): 285~296(in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai. 1998. PaleoTethys Orogenic Belt in Western Yunnan and Sichuan. Beijing: Science Press, 94~212(in Chinese).

Zhu Jingjing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Zhong Hong, Chen Heng.

2011. Zircon U-Pb ages, Hf-O isotopes and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of granitoids in the Jinshajiang suture zone, SW China: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the Paleo-Tethys Ocean. Lithos, 126: 248~264.

- Zi Jianwei, Peter A C, Fan Weiming, Wang Yuejun, Tohver E, McCuaig T C, Peng Touping. 2012a. Triassic collision in the Paleo-tethys ocean constrained by volcanic activity in SW China. Lithos, 144-145(7): 145~160.
- Zi Jianwei, Cawood P A, Fan Weiming, Wang Yuejun, Tohver E, McCuaig T C, Peng Touping. 2012b. Contrasting rift and subduction-related plagiogranites in the Jinshajiang ophiolitic melange, Southwest China, and implications for the Paleo-Tethys. Tectonics, 31(2): 1~18.
- Zi Jianwei, Cawood P A, Fan Weiming, Tohver E, Wang Yuejun, McCuaig T C, Peng Touping. 2013. Late Permian-Triassic magmatic evolution in the Jinshajiang orogenic belt, SW China and implications for orogenic processes following closure of the Paleo-Tethys. American Journal of Science, 313(2): 81~112.

### 参考文献

- 邓军,李文昌,莫宣学.2016. 三江特提斯复合造山与成矿作用.北 京:科学出版社,480~524.
- 矿产资源工业要求手册编委会.2010.矿产资源工业要求手册.北 京:地质出版社,121~136.
- 付伟,周永章,杨志军,张澄博,杨小强,何俊国,杨海生,罗春科. 2005.现代海底热水活动的系统性研究及其科学意义.地球科 学进展,20(1):81~88.
- 高睿,肖龙,何琦,袁静,倪平泽,杜景霞. 2010. 滇西维西-德钦一带 花岗岩年代学、地球化学和岩石成因. 地球科学(中国地质大学 学报),35(2):186~200.
- 郭凯凤,陈守余.2018.白银厂铜多金属矿田地球化学研究进展.地 质找矿论丛,33(4):517~526.
- 郭周平,赵辛敏,王育习,白赟,张江伟,高永伟,张海松.2018.北祁 连银灿铜锌矿床有关火山岩年代学及地球化学研究.地质学 报,92(6):1297~1312.
- 侯增谦.1991.川西呷村黑矿型多金属矿床成矿流体化学和热演化 历史与成矿过程.矿床地质,10(4):313~324.
- 侯增谦, Urabe T. 1996a. 川西呷村黑矿型矿床含矿火山岩系热液蚀 变与物质-化学变化. 矿床地质, 15(2):97~108.
- 侯增谦,浦边郎.1996b.古代与现代海底黑矿型块状硫化物矿床矿 石地球化学比较研究.地球化学,25(3):228~241.
- 侯增谦,郑远川,卢占武,许博,王长明,张洪瑞.2020. 青藏高原巨厚 地壳:生长、加厚与演化. 地质学报,94(10):2797~2815.
- 黄玉凤,曹殿华,王志军,李以科,王安建.2011. 云南兰坪盆地北部 东缘铅锌矿床喷流沉积成因的厘定——来自矿物学和硫同位 素证据.地质力学学报,17(1):91~102.
- 简平,刘敦一,孙晓猛. 2003. 滇西北白马雪山和鲁甸花岗岩基 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 地球学报,24(4):337 ~342.
- 李欢,奚小双,吴城明,狄春霞.2011.青海玉树赵卡隆铁铜多金属矿 床地质特征及成因探讨.地质与勘探,47(3);380~387.
- 李文昌,潘桂棠,侯增谦.2010.西南三江多岛湖盆-碰撞造山成矿理 论与勘查技术.北京:地质出版社,50~250.
- 李文渊.2007. 块状硫化物矿床的类型、分布和形成环境. 地球科学 与环境学报,29(4):331~344.
- 李文渊,夏林圻,夏祖春,徐学义,杨合群,赵东宏,宋忠宝.1999.北 祁连山早古生代弧后盆地火山作用及成矿特点——以肃南石 居里沟富铜块状硫化物矿床为例.地质论评,45(增刊):1047 ~1053.
- 李小虎,初凤友,雷吉江,余星,张平萍.2014. 青海德尔尼铜(锌钴) 矿床硫化物 Cu同位素组成及矿床成因探讨. 地学前缘,21(1): 196~204.
- 梁明娟,杨天南,史鹏亮,薛传东,向坤,廖程.2015. 三江造山带兰坪 盆地东缘火山岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成. 岩石学报, 31(11):3247~3268.

- 吕玉,让昊,常鸿.2017.云南德钦县里仁卡铅锌矿特征及找矿标志. 云南地质,36(1):58~62.
- 毛景文,胡瑞忠,陈毓川.2006.大规模成矿作用与大型矿集区(上册).北京:地质出版社,443~533.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,董国臣,周肃,郭铁鹰,张双全,王亮亮. 2003.印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应.地学前缘,10 (3):136~149.
- 牟传龙,王剑,余谦,张立生.1999.兰坪中新生代沉积盆地演化.矿 物岩石,19(3):30~36.
- 潘桂棠,徐强,侯增谦.2003.西南"三江"多岛弧造山过程成矿系统 与资源评价.北京:地质出版社,30~58.
- 潘家永,张乾,马东升,李朝阳.2001. 滇西羊拉铜矿区硅质岩特征及 与成矿的关系.中国科学(D辑),31(1):10~16.
- 彭军,夏文杰,伊海生.1999. 湘西晚前寒武纪层状硅质岩的热水沉 积地球化学标志及其环境意义. 沉积与特提斯地质,19(2):29 ~37.
- 彭军,田景春,伊海生,夏文杰.2000a.扬子板块东南大陆边缘晚前寒 武纪热水沉积作用.沉积学报,18(1):107~113.
- 彭军,伊海生.2000b.扬子板块东南大陆边缘上震旦统热水成因硅 质岩的地球化学标志.成都理工学院学报,27(1):8~14.
- 彭勇民,潘桂棠,罗建宁.1999.弧后盆地火山-沉积特征.岩相古地 理,19(5):65~72.
- 唐靓,薛传东,杨天南,梁明娟,向坤,廖程,姜丽莉,信迪.2016. 滇西 马登地区晚二叠世一早三叠世地层组合及年代学:火山岩锆石 U-Pb 定年证据.岩石学报,32(8):2535~2554.
- 唐玉飞,刘小春,董红国.2013.云南剑川建基铁矿分带特征.云南地 质,19(1):397~399.
- 陶刚,杨文光,朱利东,李智武,解龙,范维,和源,刘和,李超.2016. 羌塘地块南缘新近系唢呐湖组湖相喷流岩岩石学特征及沉积 模式.矿物岩石,36(1):72~81.
- 涂光炽.1989.中国南方几个特殊的热水沉积矿床.中国地质科学院 矿床地质研究所编.中国矿床学——纪念谢家荣诞辰 90 周年文 集.北京:学术书刊出版社,189~198.
- 涂光炽,王中刚,王秀璋.1997. 矿床地球化学.北京:地质出版社, 248~265.
- 王保弟,王立全,王冬兵,张万平.2011.三江上叠裂谷盆地人支雪山 组火山岩锆石 U-Pb 定年与地质意义.岩石矿物学杂志,30(1): 25~33.
- 王立全,潘桂堂,李定谋,须同瑞.2000.江达-维西陆缘火山弧的形成 演化及成矿作用.沉积与特提斯地质,20(2):1~17.
- 王立全,李定谋,管士平,须同瑞.2001.云南德钦鲁春-红坡牛场上叠 裂谷盆地演化.矿物岩石,21(3):81~89.
- 王立全,侯增谦,莫宣学,汪明杰,徐强.2002a.金沙江造山带碰撞后 地壳伸展背景——火山成因块状硫化物矿床的重要成矿环境. 地质学报,76(4):541~556.
- 王立全,李定谋,管士平,须同瑞.2002b. 云南德钦鲁春-红坡牛场上 叠裂谷盆地"双峰式"火山岩的 Rb-Sr 年龄值. 沉积与特提斯地 质,22(1):65~71.
- 王立全,李定谋,潘桂棠.2015. 青藏高原矿产及成矿地质背景图及 说明书.成都:成都地图出版社,1~188.
- 汪啸风, Ian Metcalfe, 简平, 何龙清, 王传尚. 1999. 金沙江缝合带构 造地层划分及时代厘定. 中国科学(D辑), 29(4): 289~297.
- 王小虎,杨爱平,李文辉,杨淑胜,范柱国,谢志鹏,卓伟峰.2018.云 南省德钦县红坡牛场铜金矿区果腊复式岩体年龄、地球化学特 征及其构造与找矿意义.地质通报,39(2-3):279~295.
- 王学武,刘凤祥,李新仁,严城民,周喜林,王长兵.2017. 滇西北云岭 陆缘弧大地构造单元的划分与特征.地质与资源,26(3):229

 $\sim 233.$ 

- 王叶剑,韩喜球,金翔龙,初凤友,邱中炎.2012.中印度洋脊 Edmond 区热液硫化物的形成——来自铅和硫同位素的约束.吉林大学 学报(地球科学版),42(3):234~242.
- 温利刚,曾普胜,代艳娟,王兆全.2017.云南主要双峰式火山岩及相 关矿产资源.地质学报,91(11):2493~2520.
- 吴根耀,王晓鹏,钟大赉,聂泽同,梁定益,何馥香.2000.川滇藏交界 区二叠纪-早三叠世的两套弧火山岩.地质科学,35(3):350 ~362.
- 吴元保,郑永飞.2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报,49(16):1589~1604.
- 熊永柱,夏斌,林丽,庞艳春,朱弟成.2005. 热水沉积成矿研究现状 与展望. 矿产与地质,19(3):233~238.
- 薛昊日.2017.现代与古代海底热液成矿作用研究进展.吉林地质, 36(1):1~5.
- 薛顺荣. 2000. 剑川金山桃铅锌矿床特征及成因探讨. 云南地质, 19 (1):29~35.
- 杨富全,吴玉峰,杨俊杰,郑佳浩.2016.新疆阿尔泰阿舍勒矿集区铜 多金属矿床模型.大地构造与成矿学,40(4):701~715.
- 杨天南,薛传东,信迪,梁明娟,廖程.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.
- 杨喜安,刘家军,韩思宇,陈思尧,张红雨,李娇,翟德高.2013.云南 鲁春铜铅锌矿床鲁春火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其地 质意义.岩石学报,29(4):1236~1246.
- 姚凤良,孙丰月.2006.矿床学教程.北京:地质出版社:132~153.
- 叶天竺,吕志成,庞振山.2014. 勘查区找矿预测理论及方法(总论). 北京:地质出版社,371~375.
- 尹福光,王东兵,王保弟,任飞. 2017.西南三江造山带地区区划.沉 积与特提斯地质,37(4):1~8.
- 尹光侯,朱俊,尹静.2018.三江造山带羊拉大型铜多金属矿成矿勘 查技术及找矿潜力.昆明:云南科技出版社,1~222.
- 于超,杨志明,周利敏,张亮亮,李振清,赵苗,张佳钰,陈微言,索明石.2019. 激光焦平面变化对 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年准确度的影响. 矿床地质,38(1):21~28.
- 云南省地质矿产局.1996.云南省岩石地层.武汉:中国地质大学出版社,227~228.
- 曾普胜,尹光候,李文昌.2015.金沙江造山带德钦-羊拉矿集区构造-岩浆-成矿系统.北京:地质出版社,1~229.
- 曾普胜,王彦斌,麻菁,王兆全,温利刚.2018. 滇西北羊拉地区金沙 江古洋盆的穿时碰撞闭合:来自花岗岩年龄的制约. 地学前缘, 25(6):92~105.
- 翟裕生,姚书振,蔡克勤.2011.矿床学(第三版).北京:地质出版社: 216~221.
- 张旗,周德进,赵大升,彭兴阶,罗万林,刘祥品.1996. 滇西古特提斯 造山带的威尔逊旋回:岩浆活动记录和深部过程讨论. 岩石学 报,12(1):17~28.
- 张子雄,李立德.1985.兰坪三岔河一带火山岩系构造背景的讨论. 云南地质,4(3):209~307.
- 赵大升,刘祥品.1994. 滇西北碰撞型火山岩的地球化学特征. 地球 化学,23(3):235~244.
- 赵静,梁龙,韩波.2015.海底喷流成矿作用研究现状及展望.化工矿 产地质,37(5):236~244.
- 钟大康,姜振昌,郭强,孙海涛.2015. 热水沉积作用的研究历史、现 状及展望. 古地理学报,17(3):285~296.
- 钟大赉.1998. 滇川西部古特提斯造山带.北京:科学出版社,94 ~212.

# Discovery and significance of Early Triassic VMS type Pb-Zn deposit in Yueliangping, Weixi continental margin, northwestern Yunnan

LI Shoukui<sup>1,2)</sup>, LIU Xuelong  $^{\ast\,1)}$ , LIU Sihan  $^{1)}$ , ZHANG Shitao  $^{1)}$ ,

ZHAO Qinghong<sup>2)</sup>, YANG Xuexiong<sup>2)</sup>

Faculty of Land Resource Engineering, Kunning University of Science and Technology, Kunning, Yunnan 650032, China;
 Yunnan Institute of Geology & Mineral Resources Exploration, Kunning, Yunnan 650051, China

\* Corresponding author: xuelongliu@foxmail.com

#### Abstract

The Weixi continental margin arc, sandwiched between the Yangtze block and the Lanping block, is a volcanic arc formed during the Paleo-Tethys period. The bimodal volcanic rocks composed of the acidic end members of the Middle-Lower Triassic Pantiange Formation and the basic endmember of the Cuiyib Formation are the main components of the Weixi continental margin arc, which is regarded as a key zone for the study of the subduction and closure process of the Paleo-Tethys ocean. In this paper, a VMS type deposit, named the Yueliangping Pb-Zn deposit, has been discovered for the first time in the felsic volcanic rocks of the Pantiange Formation in this volcanic belt. Preliminary field investigation shows that the leadzinc ore body has a double-layer structure of "upper layer and lower vein", associated with exhalative rocks, such as hematite siliceous rock, barite rock. The wall rock alteration is asymmetric, and the volcanic rock in the hanging wall of the ore body is slightly altered, while the lower vein ore body is closely associated with wall rock alteration such as silicification, chloritization and sericitization. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of dacite in the upper and lower wall of the layered orebody are 247.  $8 \pm 1.1$  Ma and 249.0  $\pm 1.1$  Ma, respectively, indicating that the diagenetic and metallogenic age is Early Triassic. The geochemical characteristics show that dacite belongs to medium high silicon, high potassium and peraluminous felsic rocks, with the characteristics of S-type granite and island arc volcanic rocks, suggesting that the basement of island arc is continental crust. Hematite silicalite is characterized by stripe structure, low REE content, LREE enrichment, high positive Eu anomaly ( $\delta Eu=2.37$ ), U/Th=23.6, Co/Ni=0.17, which is a typical submarine hydrothermal exhalation rock. The patterns of REE and trace element of the ore are very similar to those of the footwall dacite, indicating that the ore-forming elements are mainly from the underlying felsic rock series. Based on regional geology and previous research data, it is proposed that the subduction of the Paleo-Tethys Ocean during the Permian period led to the formation of an Andean-type subduction zone on the continental margin of the Deqin-Weixi-Qiaohou area on the east side of the Lanping block. The Early Triassic oceanic crust subduction angle became steeper, resulting in back arc extension. The Yueliangping Pb-Zn deposit is a Kuroko-type VMS Pb-Zn deposit formed in the felsic volcanic rocks under the extensional background. Regionally, the peak period of bimodal volcanic rocks in the belt is 247 Ma, with a time span of about 7 Ma. Under the submarine volcanism related to the arc, the bimodal volcanic rocks rapidly extended and subsided to the deep-sea conditions. With the closure and uplift of the basin, the bimodal volcanic rocks were collaged together on the arc-continent collision zone, with the characteristics of aborted arc rift. It is an ideal place to preserve VMS type deposits. At present, the research on VMS type deposits hosted by volcanic rocks in this belt is low, and the prospecting work has not made a breakthrough for a long time. The discovery of Yueliangping Pb-Zn deposit is of important significance for the exploration of the Weixi continental margin arc. The Early-Middle Triassic volcanic rocks can be regarded as the important exploration and research objects of VMS deposits in this area.

**Key words**: Weixi continental margin arc; geochemical characteristics; zircon U-Pb age; VMS type deposit; bimodal volcanic rock; Yueliangping Pb-Zn deposit