

论云南个旧锡铜钨三稀金属矿集区叠加成矿系统与垂向构造岩相学结构的关系

方维萱¹, 郭玉乾¹, 贾润幸¹, 童祥², 马振飞²

FANG Weixuan¹, GUO Yuqian¹, JIA Runxing¹, TONG Xiang², MA Zhenfei²

1. 有色金属矿产地质调查中心矿山生态环境资源创新实验室, 北京 100012;
2. 云南锡业集团(控股)有限责任公司, 云南个旧 661000

1. *Innovation Laboratory of Mine, Environment and Mineral, China Non-Ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China;*
2. *Yunnan Tin Group (Holding) Company Limited, Gejiu 661000, Yunnan, China*

FANG W X, GUO Y Q, JIA R X, et al., 2021. On relationship between the superimposed mineralization systems and the zoning patterns of vertical tectonic lithofacies in the Gejiu concentration area of Sn-Cu-W and three rare metals in Yunnan [J]. Journal of Geomechanics, 27 (4): 557–584. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.048

Abstract: Based on the zoning pattern and the deformation sieving of tectonic lithofacies, as well as the macroscopic and microscopic studies of tectonic lithofacies, the superimposed mineralization systems and the Gejiu ore-concentrated area in Yunnan has been studied. The relationship among the enrichment mechanism of strategic key minerals, the superimposed mineralization, and the pattern of tectonic lithofacies has been uncovered. It was believed that the Triassic arc-back rift basin at the pre-magmatic intrusive stage, the tectonic system of magmatic intrusion at the syn-magmatic intrusive stage, and the karstic tectonic system at the post-magmatic intrusive stage, all of them are of syn-space superimposing lithofacies and mineralizations within different time domains and syn-time lithofacies differentiation. All of them had different controls on the Gejiu superimposed mineral system and Sn-Cu-W-Co-Cs-Rb mineralization. There are 9 vertical tectonic lithofacies zones (VTZs) in different patterns of VTZs around the Gejiu superimposed mineralization system. Firstly, the light-colored granite (VTZ8) and crystal-nucleus lithofacies of magmatic pneumatolytic hydrotherm (VTZ9), being the tectonic lithofacies of syn-magmatic intrusive stage for the biotite granite (γK_2a-b-c), was formed at the top and on the edges of the granite intrusion. Secondly, skarn alteration lithofacies to skarn lithofacies (VTZ7) in the magma-contact metasomatic tectonic lithofacies zone is the tectonic lithofacies zone for coupling reaction by the strata and the magmatic system at the syn-magmatic intrusion. Thirdly, on the one hand, cryptoexplosive brecciation of magmatic pneumatolytic hydrotherm enriching in residual magma was forced into the Middle Triassic Gejiu Group, resulted in the magmatic hydrothermal plume and lithofacies zones of tourmaline-hydrothermal cryptoexplosive breccias (VTZ6). On the other hand, the upper part of the fault-fold-type carbonate layer (VTZ4), the marble lithofacies with

基金项目: 科技部转制科研院所专项资金项目(2008EG115074); 云南省省院省校科技合作项目(2000YK-05); 全国危机矿山接替资源勘查项目([2005]027); 公益性行业科研专项项目(201511016-1); 云南锡业股份有限公司科研项目(LC-ZGB-2021007)

This research is financially supported by the Special Fund Project of the System-transforming Scientific Research Institute, the State Ministry of Science and technology (Grant No. 2008EG115074), the Scientific and Technological Cooperation Project of Yunnan provincial-colleges-universities (Grant No. 2000YK-05), the National Project for Exploration of Succeed Resources in Crisis Mines (Grant No. [2005] 027), the Scientific Research Project of Public Welfare Industry (Grant No. 201511016-1), and the Scientific Research Project of Yunnan Tin Industry Co. Ltd. (Grant No. LC-ZGB-2021007)

第一作者简介: 方维萱(1961—), 男, 博士, 研究员, 从事沉积盆地和造山带、矿产普查与勘探研究。E-mail: 569026971@qq.com

收稿日期: 2021-04-13; **修回日期:** 2021-06-20; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 方维萱, 郭玉乾, 贾润幸, 等, 2021. 论云南个旧锡铜钨三稀金属矿集区叠加成矿系统与垂向构造岩相学结构的关系 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 557-584. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.048

cataclastic facies and the cataclastic tourmaline-marble lithofacies (VTZ5), and stratiform-like Sn-bearing dolomite with cataclastic facies (VTZ3) in the farthest-end part, were formed by tectonic hydrothermal coupling derived in the syn-magmatic intrusive stage from the underlying magmatic hydrothermal plume. Fourthly, the alkaline picritic rocks and alkaline volcanicrocks, and their volcanic erupting structure in the Triassic arc-back rift basin were the tectonic lithofacies at the pre-magmatic intrusive stage. Fifthly, the erosion-level in the Yungui plateau (VTZ1) and the supergene karstic tectonic system (VTZ2) were formed in the post-magmatic intrusive stage; however, they (VTZ1, VTZ2) were superimposed on the tectonic system of the syn-magmatic intrusion (VTZ3, VTZ4, VTZ5, VTZ6, VTZ7, VTZ8, VTZ9). The above achievements are foundations of innovated theory for the deep-probe and the modeling prediction for the buried tectonic lithofacies in the area.

Key words: superimposed mineralization system; zone of tectonic lithofacies; syn-magmatic intrusive stage; alkaline magma; strategic key mineral; Cu-Sn-W-Co

摘要: 采用构造岩相学分带和变形筛分、宏观与微观构造岩相学研究相结合的方法,对云南个旧矿集区构造和叠加成矿系统进行研究,深入揭示了该矿集区内锡铜钨钴铀多金属战略矿产富集机制、叠加成矿作用与构造岩相学结构样式之间的内在关系。研究认为,该区发育前岩浆侵入期三叠纪弧后裂谷盆地、同岩浆侵入期岩浆侵入构造系统和构造样式、后岩浆侵入期岩溶构造样式,它们在不同时间域内发生了异时同位叠加成矿成矿与同时异相分异作用,对个旧叠加成矿系统和锡铜钨钴铀多金属成矿作用具有显著不同的控制作用。锡铜钨钴铀多金属叠加成矿系统具有9个垂向构造岩相分带结构样式,从深到浅依次为:浅色花岗岩相(VTZ8)和岩浆气成热液结晶核相(VTZ9)为黑云母花岗岩(γK_2a-b-c)同岩浆侵入期构造岩相带,分布在花岗岩侵入体顶部和边部;岩浆接触交代构造岩相带砂卡岩化相-砂卡岩相带(VTZ7),是同岩浆侵入期地层-岩浆系统耦合反应的构造岩相带;富含残余岩浆的高温气液体系发生了岩浆-气液隐爆角砾岩化,形成进入个旧组内岩浆热流柱构造和电气石热液隐爆角砾岩相带(VTZ6);同岩浆侵入期在个旧组内构造-流体耦合作用,形成了上覆褶皱式碳酸盐岩层(VTZ4)和碎裂岩化大理岩化相-电气石碎裂岩化大理岩相带(VTZ5)、远端的似层状碎裂岩化相含锡白云岩(VTZ3);三叠纪弧后裂谷盆地内碱性苦橄岩-碱性火山岩相带和火山喷发机构为前岩浆侵入期构造;云贵高原侵蚀面(VTZ1)和表生岩溶构造系统(VTZ2)为后岩浆侵入构造系统,它们叠加在同岩浆侵入构造系统(VTZ3、VTZ4、VTZ5、VTZ6、VTZ7、VTZ8、VTZ9)之中。这些新成果为该矿集区深部探测和隐伏构造岩相的预测建模提供了新的理论依据。

关键词: 叠加成矿系统; 构造岩相分带; 同岩浆侵入期; 碱性岩浆; 战略关键矿产; 铜锡钨钴

中图分类号: P586 **文献标识码:** A

0 引言

传统的岩浆热液成矿理论受到了很多质疑(罗照华等, 2011; 张旗, 2012),但从新视角研究取得了成果(毛景文等, 2012; 罗照华等, 2014; 张旗等, 2014; 黑慧欣等, 2015; 张宝林等, 2015),如中国大陆环境斑岩型矿床与岩浆热液系统(侯增谦和杨志明, 2009)、叠加成矿系统理论与多成因成矿作用研究(翟裕生等, 2009)等。对中国复杂大陆成矿环境和成矿系统的研究和探测也取得了新进展(胡瑞忠等, 2010; 张连昌等, 2021),发展了岩浆热液成矿系统新领域。从地球系统、成矿系统到勘查系统(翟裕生, 2007)相结合的层面仍然需探索研究,叠加成矿系统仍面

临诸多理论挑战和技术难题。云南个旧锡铜钨钴铀多金属矿集区和叠加成矿系统、火山喷发-岩浆侵入构造系统具有密切关系,发育印支期火山喷流沉积成矿和构造变形改造富集,燕山晚期岩浆热液成矿系统发育良好,新生代岩溶成矿和表生成矿作用强烈,因此,对该叠加成矿系统进行构造岩相学和地球化学岩相学解剖研究,将为矿集区深地探测、深部预测和综合勘查技术创新提供新的理论依据。

目前对云南个旧锡铜多金属矿床的成因认识分歧较大,如岩浆热液型(Jiang et al., 1997; 毛景文等, 2008; Guo et al., 2018)、多期叠加成矿(秦德先等, 2006)、热水喷流沉积型(张欢等, 2007; 钱志宽等, 2011)、玄武岩成矿(黎应书等, 2006)和海相火山岩型锡铜矿床(方维萱和贾润

幸,2011;方维萱等,2011)。层间氧化矿和玄武岩型铜矿床仍为成因分歧的焦点(庄永秋,1996;黎应书等,2006;秦德先等,2006;张欢等,2007;毛景文等,2008;方维萱和贾润幸,2011;方维萱等,2011;钱志宽等,2011;Zhang et al.,2015)。个旧三叠纪弧后裂谷盆地(方维萱等,2002,2011;方维萱和贾润幸,2011)发育了火山岩系和侵入岩系,主要特征是:①以碱性苦橄岩-碱玄岩系列为主;②碱性玄武岩系列;③壳幔混源系列以碱性辉长岩-碱性辉长闪长岩-霞石正长岩-碱性正长岩为主;④壳源重熔岩浆系列以个旧东区斑状花岗岩-粒状黑云母花岗岩-细晶岩为主(庄永秋等,1996)。这些火山-侵入岩系和相关构造在表生岩溶构造系统中具有特殊作用,但它们参与表生岩溶成矿的作用却被忽视了。研究岩浆侵入构造系统和叠加成矿系统的构造岩相学分带规律,需要对该矿集区表生岩溶构造和岩溶作用给予高度重视,重视叠加成矿系统后期保存条件和表生成矿叠加作用,有助于建立隐伏岩浆侵入构造系统和成矿中心识别标志,提升深部构造岩相体探测和预测建模的准确性。个旧矿集区内发育三叠纪弧后裂谷盆地、燕山期岩浆侵入构造和新生代侵蚀岩溶构造等3类不同成因的构造系统,由于对其构造样式研究不足,制约了对它们与锡铜钨铍多金属成矿作用关系的深入研究。因此,从构造岩相学变形筛分新视觉的角度,研究叠加成矿系统与垂向构造岩相学分带相互关系,促进构造岩相在该矿集区深地探测、深部隐伏构造岩相预测建模研究水平,为战略关键金属矿产预测服务。

文章以构造岩相学分带、构造岩相学变形筛分等新方法为手段(方维萱等,2018),对个旧锡铜钨铍多金属矿集区进行叠加成矿系统的垂向构造岩相学分带结构研究。研究认为3类不同成因的构造系统,对多金属成矿作用具有显著不同的控制作用,在不同时间域内形成了异时同位叠加成矿和同时异相分异作用。叠加成矿系统具有9个垂向构造岩相带,三叠纪弧后裂谷盆地内碱性苦橄岩-碱性火山岩相和火山喷发机构为前岩浆侵入期构造;云贵高原侵蚀面(VTZ1)和表生岩溶构造系统(VTZ2)为后岩浆侵入构造,它们叠加在同岩浆侵入构造系统(VTZ3、VTZ4、VTZ5、VTZ6、VTZ7、VTZ8、VTZ9)之中,这些最新研究成果为该矿集区深部探测和预测建模提供了新

理论依据。

1 个旧-建水三叠纪弧后裂谷盆地系统

个旧-建水地区3个基底构造层对二叠-三叠纪沉积盆地-造山带-岛弧带的转换与演替过程具有较强的制约作用(方维萱等,2011)。金平县龙脖子铜矿床内的中元古代变钠质火山岩的Pb-Pb等时线年龄为 1596 ± 140 Ma,铁铜金(IOCG型)矿床的变钠质火山岩和磁铁矿Sm-Nd等时线年龄为 1330 ± 150 Ma(常向阳等,1998),叠加了个旧组硅质白云岩中的火山热水沉积型铜矿床(高俊和崔银亮,2004)。龙脖子铁铜矿床为康滇地区元古宙IOCG矿床,三叠纪成矿特征也很显著(郭健,2020),它们以及个旧海相火山岩型锡铜多金属矿床成因的关系仍待深入解析研究。

1.1 个旧-建水三叠纪弧后裂谷盆地系统与构造演化

个旧-建水三叠纪弧后裂谷盆地系统的沉积相序列具有“下细夹火山岩、中变粗后变细且发育火山岩,上粗”3层结构特征,具有3种“源-汇”系统,包括海底扩张中心火山喷发和岛弧带提供的火山物质、陆源碎屑物和盆地内源碳酸盐岩,与盆地热沉降作用有关(方维萱等,2011)。

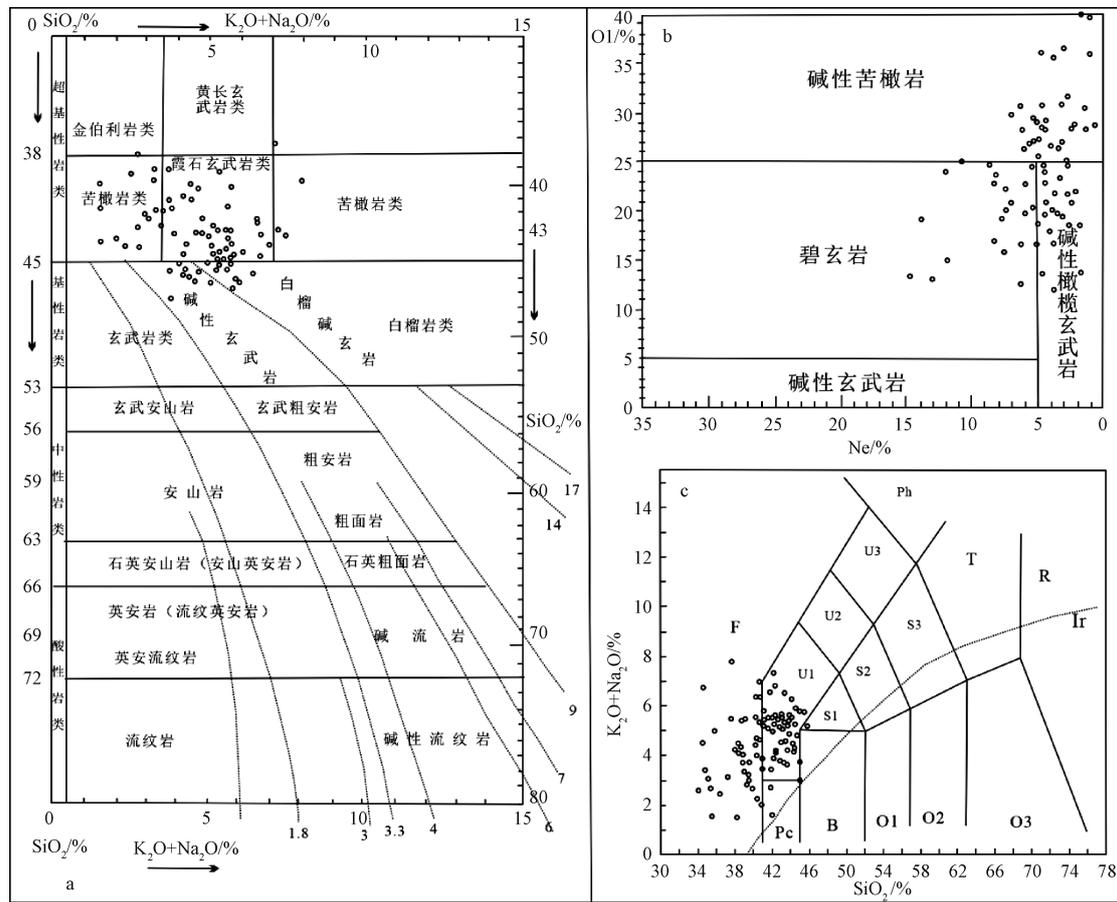
(1)三叠纪3期火山岩分布规律和金属成矿规律关系密切。碱性苦橄岩-碱玄岩类的岩浆源区来自软流圈地幔和岩石圈地幔,这些深源成矿物质沿小江岩石圈断裂南段个旧断裂与甲界山断裂和次级北东向同生断裂带,经火山喷发和次火山岩侵入作用,直接进入个旧-建水三叠纪弧后裂谷盆地内,形成了火山岩系和火山热水喷流沉积矿床(方维萱等,2011)。①中三叠世安尼期碱性钾质火山岩产于个旧组卡房段底部,由1~5层碱性苦橄岩+碱玄岩组成,一般厚在20~50 m,最厚可达百余米,呈北东向隐伏或出露在个旧东区麒麟山-老厂-卡房田心坝子。岩石组合主要为阳起石变碱玄岩、金云母阳起石变碱玄岩和金云母变碱性苦橄岩,局部为阳起石岩或金云母岩。卡房矿田内的安尼期碱性玄武岩形成年龄为 244.4 ± 2.8 Ma,在晚白垩世(98.5~78.7 Ma,锆石SIMS U-Pb法;Zhang et al.,2015)遭受了热液叠加成矿事件。在个旧东区安尼期碱性苦橄岩和碱玄岩中赋存变海

相火山岩型铜钴矿床, 习称“变基性火山岩”铜矿床 (庄永秋等, 1996)。在卡房矿田大白岩和老厂矿田塘子凹等矿段, 受晚白垩世花岗岩叠加成矿作用, 形成了金云母矽卡岩型锡铜铈多金属矿床。②中三叠世拉丁早期碱性火山岩产于法郎组下部, 单层厚 10~20 m, 分布在个旧西区水塘寨-保和-木花果-木卜岭, 以碱性玄武岩为主。③晚三叠世诺利克期火山岩规模最大, 分布在贾沙复式向斜轴部林河村-尼得-德胜村, 火山活动中心位于个旧他白村以南, 熔岩可分 7 层, 单层厚达 200~300 m, 向东、西两侧的火山岩系变薄, 以凝灰岩为主。火山岩分异作用最为强烈, 碱性玄武质熔岩相为杏仁状玄武岩、块状玄武岩和橄榄玄武岩等, 发育中酸性凝灰岩, 少量安山玄武质凝灰岩。林河村-孟宗和他白-裴枯龙的磁铁矿-铅锌矿带、白显-他白的水热沉积型锰矿带等, 与该期火山岩密切相关。

(2) 个旧组内的安尼期海相火山岩原岩恢复与形成构造环境。卡房矿田出露的中三叠世安尼期变火山岩, 主要产于个旧组卡房段底部中, 岩石大多数已遭强烈变质为金云母岩、阳起石金云母岩和阳起石岩等。变火山岩中含 SiO_2 34.16%~45.62%, 属硅不饱和系列; TiO_2 含量为 1.35%~3.53%, 平均值为 2.62%, 属高钛系列; 含 Na_2O 0.21%~3.60%, 平均值为 1.39%, K_2O 含量为 0.90%~7.50%, 平均值为 3.21%, 总体呈现钠质偏低而钾质高, 具有碱性钾质火山岩和碱性苦橄岩特征 (方维萱和贾润幸, 2011; 张贵山等, 2019)。①在 SiO_2 - K_2O + Na_2O 判别图中 (图 1a), 样品投影在超基性岩类和基性岩类区内。原岩恢复为苦橄岩类、霞石玄武岩、石榴碱玄武岩、霞石岩类和碱性玄武岩, 少数样品为玻基纯橄岩类。②在 CIPW (标准矿物) OI-Ne 图解中 (图 1b), 样品位于碱性苦橄岩、碧玄武岩、碱性橄榄玄武岩内, 均属碱性系列, 碱性苦橄岩比例较大。③在火山岩的硅碱 (TAS) 分类图中, 区内样品均落在 Irvine 分界线上部碱性火山岩范围内, 原岩恢复为碱性火山岩系 (图 1c)。原岩类型为碱玄武岩类、碧玄武岩类、副长石岩和苦橄岩。④在卡房和老厂矿田内, 碱性苦橄岩和碱玄武岩类中富集 Sn-Cu-Li-Rb-Cs, 与板内钾质火山岩类似, 具有高钾、富集大离子亲石元素 (LILE)、高场强元素 (HFSE) 和轻稀土元素 (LREE) 特征, 形成年龄为 $214.5 \pm$

2.2 Ma (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法; 张贵山等, 2019), 推测岩浆源区可能来自金云母尖晶石石榴石二辉橄榄岩和金云母石榴石二辉橄榄岩, 曾遭受地幔流体交代作用, 估算其熔融平衡温度为 1554 °C、平衡压力 3.6 GPa, 推测其形成于熔融平衡温压条件较高的地幔热点轴部。一般认为, 低钛系列玄武岩起源于岩石圈地幔, 其地幔部分熔融程度较高且经历了较强的地壳混染; 而高钛系列玄武岩起源于软流圈地幔, 其部分熔融程度和地壳混染程度均较低 (Xu et al., 2001; Xiao et al., 2004)。岛弧构造中的钾质火成岩与俯冲板块析出的流体交代地幔岩密切相关, 岩浆源区遭受了富含挥发份的地幔流体交代作用, 少量出露于板内的钾质火成岩与铜金矿床和战略性矿产关系密切, 深受关注 (Hudgins et al., 2015; Müller and Groves, 2019)。个旧地区富集 Sn-Cu-Li-Rb-Cs 的碱性苦橄岩类+碱玄武岩、碧玄武岩+碱性玄武岩形成于个旧三叠纪弧后裂谷盆地, 它们是火山喷流沉积成因锡铜矿床的成矿相体 (方维萱和贾润幸, 2011; 方维萱等, 2011; 张贵山等, 2019), 受印支运动的影响, 该弧后裂谷盆地萎缩封闭并卷入造山带中, 进而遭受了晚白垩世高钾钙碱性花岗岩的叠加再造, 对锡铜铈多金属矿床形成十分有利。

(3) 个旧西北侧的康滇古陆和东侧屏马-越北陆块, 分别向个旧-建水地区输送了陆源碎屑物。在开远-师宗地区, 下三叠统飞仙关组中发育了河流相-滨浅海相含铜紫色和灰绿色砂岩夹泥灰岩, 该组地层沉积厚度从东到西逐渐增大, 从石屏 (300 m) → 个旧西区渣腊 (800 m) → 揽盘寨 (1200 m) (庄永秋等, 1996), 个旧东侧的越北-屏马为陆源蚀源岩区, 推测甲界山和个旧两支近南北走向的阶梯状同生断裂的断陷成盆作用显著。在个旧-建水南侧飞仙关组呈近东西向平行不整合分布在大新寨-白龙潭龙潭组、阳新组和峨眉山玄武岩组之上。越南北部早三叠世韧性剪切带 (250~240 Ma, 白云母和黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar; Lepvrier et al., 2004) 和墨江韧性剪切带 (251.90±4.32 Ma, 糜棱岩全岩 K-Ar 法; 方维萱等, 2002) 揭示哀牢山强烈的挤压隆升作用, 导致个旧-建水南缘近东西向挤压抬升作用和近南北向纵张作用, 深部软流圈地幔上涌与个旧近南北向同生断裂带耦合作用显著。个旧-建水地区早三叠世沉积盆地动力学表现为软流圈地幔上拱+同生断陷+地壳拗陷沉降



a—变质火山岩的岩石化学图解; b—超基性岩类 Ne-O1 图解 (底图据池际尚, 1988); c—火山岩类的 SiO₂-K₂O+Na₂O (底图据 IUGS, 1989)

(Pc—苦橄玄武岩; B—玄武岩; O1—玄武安山岩; O2—安山岩; O3—英安岩; R—流纹岩; S1—粗面玄武岩; S2—玄武质粗面安山岩; S3—粗面安山岩; T—粗面岩、粗面英安岩; F—副长石岩; U1—碱玄岩、碧玄岩; U2—响岩质碱玄岩; U3—碱玄质响岩; Ph—响岩; Ir—Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性)

图1 个旧地区卡房-老厂矿田变质火山岩岩石类型和原岩恢复

Fig. 1 Rock types and reconstructed protolith for meta-volcanic rocks in the Kafang-Laochang ore field in the Gejiu area. (a) Petrochemical diagram for metavolcanites. (b) Ne-O1 diagram for ultrabasic rocks (the original diagram after Chi, 1988). (c) SiO₂-K₂O+Na₂O diagram for volcanic rocks (the original diagram after IUGS, 1989).

Pc—Picritic basalt; B—Basalt; O1—Basaltic andesite; O2—Andesite; O3—Dacite; R—Rhyolite; S1—Trachytic basalt; S2—Basaltic-trachytic andesite; S3—Trachytic andesite; T—Trachyte, trachytic dacite; F—Feldspathoidite; U1—Tephrite, basanite; U2—Phonolitic tephrite; U3—Tephritic phonolite; Ph—Phonolite; Ir—Irvine boundary, the above is alkalinity, the below is sub-alkalinity.

过程, 推测个旧-建水弧后裂谷盆地向南东延伸到金平县。在个旧-建水西北部, 下三叠统飞仙关组和嘉陵江组呈北东向分布在大落水洞-磨黑地区, 蚀源岩区来自康滇古陆。

(4) 盆内同生断裂带和盆地内源碳酸盐岩沉积与盆地热沉降作用密切相关。在麒麟山-老厂-卡房田心坝子地区, 北东向碱性火山岩带受北东向和南北向同生断裂带控制, 这些同生断裂带是碱性岩浆形成的海相火山喷溢通道, 与碱性火山岩厚度较大的部分相对应, 它们也是中三叠世海

底火山喷流成矿构造通道, 变海相火山岩中铜矿床分布在同生断裂带两侧 (图2)。中三叠世安尼期盆内同生断裂带附近, 在个旧组卡房段内发育碱玄质火山角砾岩和角砾凝灰岩相, 钙屑硅质岩和凝灰质硅质岩薄层、白云质凝灰质同生角砾岩、凝灰质白云岩、白云质滑塌角砾岩、同生滑移褶皱和同生变形组构, 它们是火山地震岩席的构造岩相学标志。远离该同生断裂带, 在凝灰质白云岩和泥质灰岩中也发育砾屑结构和地震岩席。总之, 与碱性苦橄岩+碱玄质火山岩相伴的同生断裂

带和地震事件较为强烈,中三叠世热沉降作用较为强烈,碳酸盐岩大规模沉积于该热沉降期。

(5) 个旧-建水三叠纪(印支期)的区域构造演化,继承了二叠纪末期山-弧-盆耦合转换过程,在三叠纪耦合了软流圈地幔上涌形成的地幔热点,这种区域构造与盆地内三向“源-汇”效应有利于成矿物质的大规模聚集和保存。建水腊里河玄武岩中高镁火山岩(259 ± 2 Ma, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法)属峨眉山地幔柱的分支地幔(刘德民等, 2019)。腊里河早三叠世奥伦尼克阶(ωT_1 , 249.5~245.5 Ma)二辉橄榄岩的形成年龄为 246 ± 5.2 Ma (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法),经历了中侏罗世早期(169.6 ± 2.0 Ma)热液蚀变事件,但与流纹岩(261.9 ± 2.2 Ma)-安山岩(264.8 ± 1.7 Ma)-高镁火山岩(258.7 ± 2.2 Ma),均为晚二叠世—早三叠世形成的产物(刘娇等, 2016)。推测它们与东川铁铜金矿集区深部二叠纪构造-岩浆热事件(269.9 ± 3.4 Ma, 方维萱等, 2013)具有密切相关性,均受小江-个旧近南北向岩石圈断裂带控制,该断裂带在二叠纪穿切了康滇地区和滇东南金平地区,南接越南黑水河二叠纪裂谷盆地,属峨眉山地幔柱构造的分支系统和统一重大地质事件:①在建水地区茅口组古岩溶与晚二叠世玄武岩之间,形成了荒田大型铅锌矿床,它们赋存在火山喷发-火山热水岩溶不整合构造带中,火山岩从晚二叠世(βP_3)延续到早三叠世奥伦尼克阶(ωT_1),建水高镁火山岩是峨眉山地幔柱一个地幔分支在地幔柱热流体侧向扩展下形成的产物(刘德民等, 2019),小江-个旧二叠纪近南北向岩石圈断裂带可能是地幔柱尾部减压熔融喷发到地表的构造通道;②三叠纪碱性玄武岩+碱玄岩+碱性苦橄岩类是个旧弧后裂谷盆地形成的重大地质事件标志,这些岩石富集大离子亲石元素,形成了 Sn-Cu-Li-Rb-Cs 的初始富集层位和矿化层;③受印支期哀牢山造山带侧向碰撞挤压作用的影响,小江岩石圈断裂带南段个旧近南北向同生断裂带活动较为强烈,中三叠世拉丁早期碱性火山岩和晚三叠世诺利克期碱性火山岩集中出现在个旧西区和建水地区,火山活动呈现东西向和北西西向展布的趋势;④在个旧北西地段个旧组碳酸盐岩中,推测同生褶皱褶皱相带是北东向的同生断裂带强烈活动地段。

1.2 个旧三叠纪弧后裂谷盆地内火山喷流沉积-叠加改造成矿系统

海相火山岩型(VMS)铜铅锌矿床可形成于弧

后盆地和陆缘裂谷盆地内(Large, 1992; Franklin et al., 2005; Gally et al., 2007; Groves and Bierlein, 2007)。个旧三叠纪弧后裂谷盆地具有形成大型海相火山岩型(VMS)铜铅锌矿床的条件(方维萱等, 2002; 方维萱和贾润幸, 2011),主要依据如下。

(1) 构造背景方面,三叠纪弧后裂谷盆地在印支晚期近南北向挤压收缩作用下,形成了近东西向断褶构造带,燕山早期叠加变形构造带以北东向褶皱-断裂带为主,有利于形成锡铜钨铀多金属叠加成矿。个旧-建水三叠纪弧后裂谷盆地向南东方向延伸到金平龙脖子铜矿区,与哀牢山二叠纪—三叠纪岛弧带向北东方向的扬子地块俯冲碰撞密切相关,在陆壳基底之上形成了三叠纪弧后裂谷盆地,对于形成块状硫化物矿床十分有利。个旧变海相火山岩型锡铜钨铀多金属矿床(金云母砂卡岩型),受到燕山晚期伸展深成岩浆弧叠加改造作用强烈,岩浆侵入机制以热穹隆式底劈侵位为主导。

(2) 卡房-老厂矿田的储矿层位和储矿岩相(图2),具有较为完整的火山喷气沉积成矿→热水喷流沉积成矿→构造改造-准同生蚀变成矿→岩浆热液叠加成矿结构:①个旧组卡房段底部($T_2g_1^1$)中厚层灰岩和厚层灰岩,夹1~5层碱性火山岩,凝灰质白云质同生角砾岩相发育,同生断裂活动强烈,海底火山喷气同生蚀变相和火山热水角砾岩相为海底火山喷气-热水沉积成矿标志相(图2a),形成了赋存于卡房段底部海相火山岩型铜矿床,卡房段下部($T_2g_1^1 \rightarrow T_2g_1^3$)具有沉积水体增深序结构,流变蠕虫状灰岩和瘤状灰岩($T_2g_1^3$)指示了同生断裂活动增强、半深水—深水沉积环境;②卡房段上部($T_2g_1^4 \rightarrow T_2g_1^6$)同生凝灰质砾屑灰岩(图2a)和同生砾屑灰岩(图2b)为同生断裂活动和地震-震积风暴流沉积标志。似层状岩溶角砾岩、方解石溶孔状白云质灰岩(图2c)、膏模和汤团构造发育,揭示古岩溶作用较为强烈;③在个旧组马拉格段中同生滑塌角砾岩(同生断裂)和古岩溶构造也揭示同生断陷和准同生抬升作用较为强烈,个旧组累计厚度达3415 m,在海相火山喷发作用后,以稳定热沉降和同生断裂断陷沉积为主,有利于形成海相块状硫化物矿床;④金云母砂卡岩型铜硫化物矿床赋存在安尼期变海相碱性火山岩层内(图2),与个旧组卡房段碱性苦橄岩→碱玄岩→碱玄质火山岩→凝灰质碳酸

盐岩层密切相关,金云母矽卡岩型锡铜钨多金属矿床赋存在个旧组卡房段,与安尼期火山喷气沉积-热水同生交代蚀变作用密切相关。个旧组储

矿层位与拉丁早期—诺利克期热水沉积成矿作用密切相关,在个旧西区发育了热水沉积型含锰质硅质岩相+铁锰碳酸盐岩相。

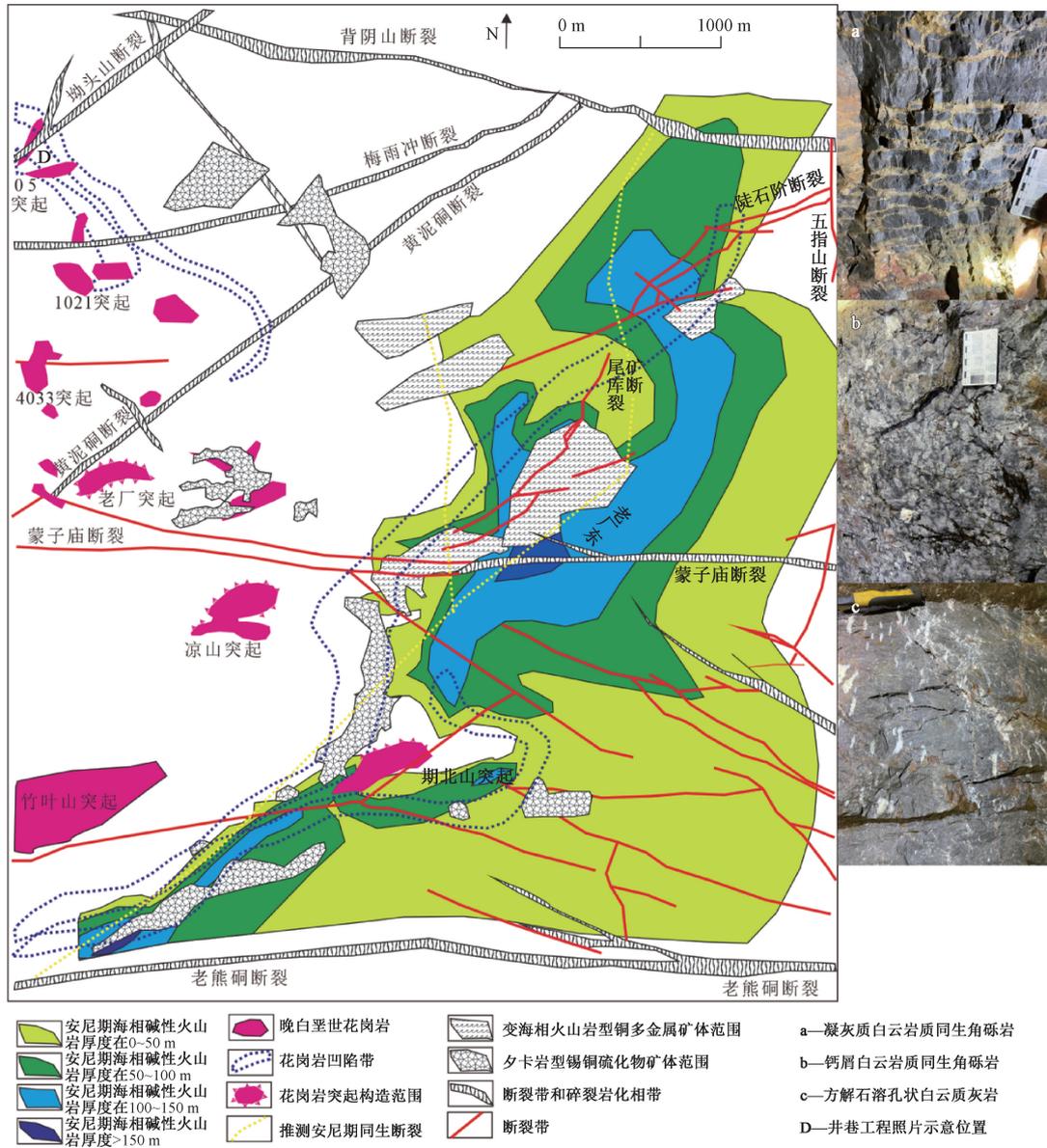


图2 老厂矿田内碱性火山岩厚度与成矿关系图

Fig.2 Relationship between the alkaline volcanic rock thickness and the mineralization in the Laochang ore-field

(3) 竹叶山和大白岩矿段锡铜和铜矿体与矿石组构表明受海相火山岩和同生构造控制显著,岩浆叠加成矿作用形成了W、Bi和Mo叠加成矿。在竹叶山、老厂东和期北山(图2)、大白岩、塘子凹等矿段,海相碱性火山岩层中铜矿体呈层状和层间透镜状,主矿产为铜,共伴生金和锡。铜矿体具有4种不同类型的赋存规律:①铜矿体赋存在碱性火山岩层与上覆大理岩和凝灰质大理岩层之间,可多达5个似层状矿体,长300~650 m,宽

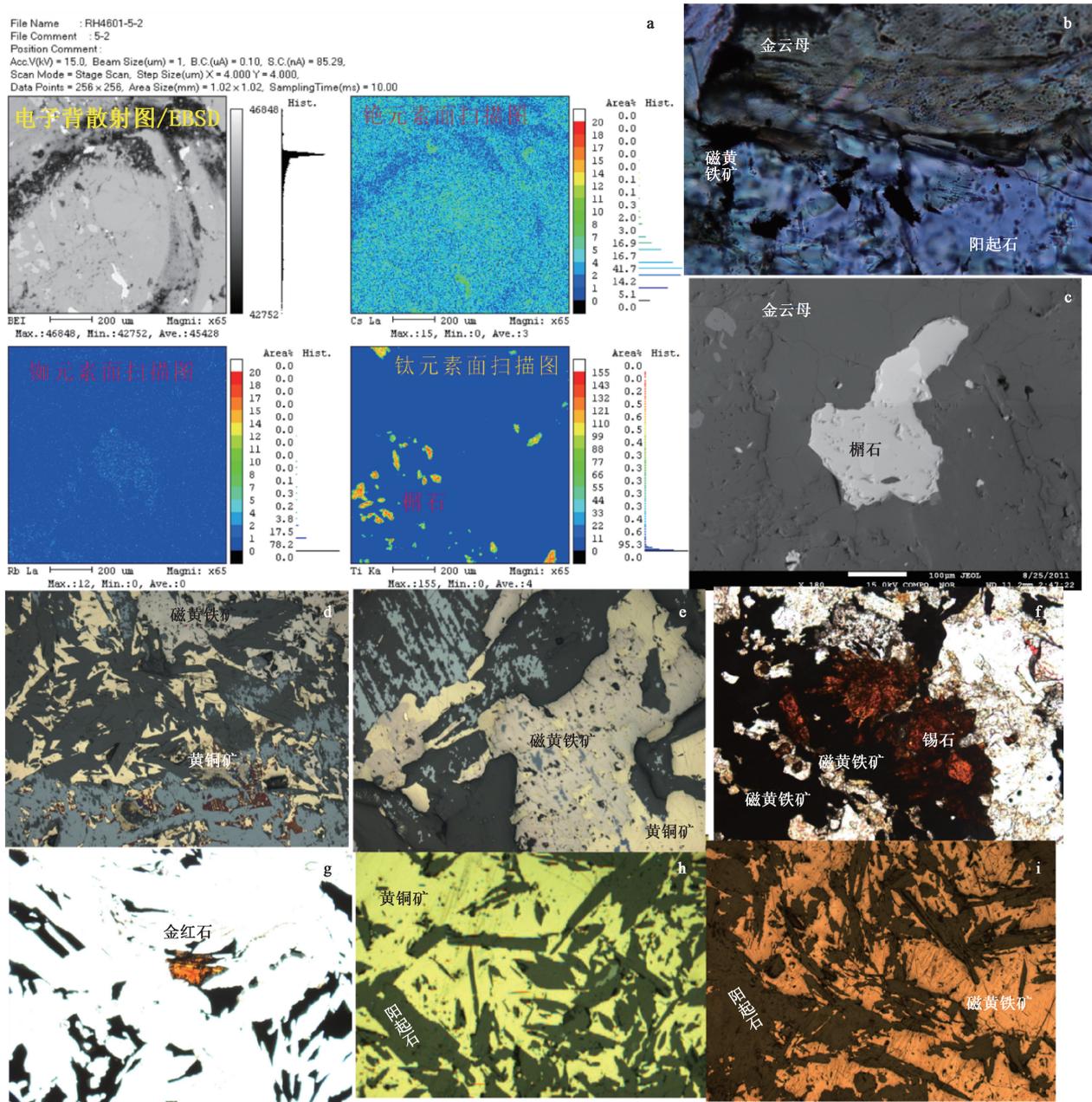
100~300 m,厚0.5~5 m;②铜矿体赋存在变碱性火山岩层内,由层间陡倾斜脉状和缓倾斜透镜状矿体组成,矿体长度可达百余米,延伸可达400 m,厚度3~10 m,局部铜品位高(>5%),共伴生Cs、Rb、Au、Co、金红石;③铜矿体赋存在变碱性火山岩层之下的大理岩层内,呈似层状和透镜状的缓倾斜矿体,长度为100~300 m,宽100余米,厚度1.7~10 m,最厚达34 m;④在接近花岗岩接触带部位,锡铜矿体厚度增加,呈似层状

或不规则囊状, 锡铜共生矿石品位显著增富, 叠加富集了 W、Bi、Mo 和 Au 矿体。在含锡铜钨铍钼多金属萤石金云母矽卡岩相中, 形成钼铍共生矿体, 如老厂竹叶山 13-2-3 矿体、卡房 1-9 矿体等, 呈整合状产于海相碱性火山岩中, 储矿岩相为金云母阳起石岩和透闪石金云母岩, 矿石矿物以黄铁矿和黄铜矿为主。

(4) 含矿蚀变岩的构造岩相学、成矿流体与火山热水蚀变体系特征, 揭示发育了火山同生蚀变和同生沉积作用等火山热水同生蚀变岩相和火山热水沉积-改造岩相 (图 3)。①海底火山热水同生蚀变相, 由电气石钠长石相、金云母相 (图 3a—3e)、透闪石阳起石相、绿泥石大理岩化相、电气石阳起石金云母相、钛铁矿-金红石 (图 3g) - 黑云母相、黄铜矿-磁黄铁矿相 (图 3f—3i) 等组成, 它们与 F-B-Ti-Sn-Cu-Co-Au-Cr-Ni 化探异常和锡铜成矿关系密切。磁黄铁矿-黄铜矿呈连晶状, 沿金云母斑晶和团斑周缘呈环状富集; 磁黄铁矿和黄铜矿与阳起石呈交织共生结构。新山层状一似层状透辉石岩与铜富集成矿密切相关, 属热水同生交代蚀变岩 (钱志宽等, 2011)。F-B-Ti-Sn-Cu-Co-Au-Cr-Ni 化探异常分布在蚀变碱性苦橄岩-蚀变碱玄岩带上, 在铜矿体和矿化体中, F 含量 $> 2000 \times 10^{-6}$, 金云母和黑云母相中 F 含量在 $5000 \sim 20000 \times 10^{-6}$ (含量高于检出限), Cr 含量 $> 500 \times 10^{-6}$, Ni 含量 $> 400 \times 10^{-6}$, Co 含量在 $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ (含量高于检出限), Au 含量在 $100 \times 10^{-9} \sim > 1000 \times 10^{-9}$ (含量高于检出限), Sn 含量 $> 200 \times 10^{-6}$, 以磁黄铁矿、黄铜矿和黄铁矿为主, 少量锡石、黝锡矿和闪锌矿; 海底热水蚀变体系以碱性超基性岩中发育了富集 F 和 B 组分 (金云母-电气石-方柱石等) 等酸性成矿流体为特征。②在卡房段安尼期碱性火山岩之上, 火山热水喷流沉积构造通道相为中心相, 为碧玉状电气石钠长石与钠长石阳起石透辉石岩, 两侧分布了灰黑色钙屑凝灰质同生角砾岩和同生热液角砾岩。③穿层脉带状萤石-电气石相、辉钼矿-辉铋矿-黑钨矿和 W-Sn-Bi-Mo-F-B 化探异常等, 是隐伏花岗岩叠加成矿的标志。④磁黄铁矿属老厂-卡房矿田内 (老卡式) 海相火山岩型硫化物矿床的主要蚀变矿物, 磁黄铁矿、黄铁矿和黄铜矿中富集 Co 和 Au, 局部共生钴体, 为老卡式海相火山岩型铜 (钴金) 矿床。原生楣石中富集 Sn, 形成楣石 (15%) 黑云

母岩, 经海底火山热水同生蚀变作用后形成了白钛矿和铌金红石富集, 建议对铌金红石型钛资源 (图 3g) 进行富集规律和综合利用研究。④在隐伏花岗岩的接触带部位, 以接触交代作用形成的萤石金云母矽卡岩相+电气石萤石金云母矽卡岩相为主, 主矿产为锡铜钨, 伴生萤石、电气石、Mo、Bi、Ag、Pb 和 Zn 等, As 以毒砂形式赋存。随着远离花岗岩侵入体, 角岩相逐渐增加, 接触交代作用逐渐减弱, 最终变为阳起石金云母角岩相+金云母角岩相+黑云母阳起石角岩相 (变矽卡岩相), 以铜为主且共伴生 Co、Au、Ti。

(5) 构造岩相学分带揭示老厂-卡房矿田内发育火山机构中心。对三叠纪火山机构恢复与识别, 是战略关键金属超常富集机制和深部找矿预测的关键科学问题, 非常值得进行深入研究探索。总体上看, 现今地表构造岩相学记录揭示了如下特征, ①晚二叠世碱性火山岩和峨眉山幔柱分支具有近南北向分布特征, 沿小江岩石圈断裂带呈近南北向分布, 延伸到越南北部, 受北西向哀牢山造山隆升事件的影响, 遭受了切断, 在个旧南缘以近东西向展布的上二叠统龙潭组为标志。②中三叠世安尼期火山机构位置呈北东向分布在卡房-老厂矿田内, 在北东向和近南北向厚度较大的碱性火山岩分布区, 如卡房矿田大白岩矿段 1800 m 中段内, 斑状辉石碱玄岩+橄榄金云母角砾岩+角砾状角闪石岩+斑状钛辉石火山角砾岩等岩石组合为火山喷发通道相标志, 它们指示了火山喷发中心位置, 推测也是火山喷气沉积成矿中心位置 (图 2), 分别为卡房矿田大白岩矿段和竹叶山矿段、老厂矿田期北山和老厂东矿段等, 从下到上, 火山岩相序结构为碱玄岩类→碱性苦橄岩类→碱玄质火山角砾岩+碱玄岩类→碱玄岩类, 成矿相体结构为碱玄质火山角砾岩+火山喷流通道相 (电气石钠长石岩+方柱石钠长石阳起石同生角砾岩+钙屑凝灰质同生角砾岩)。在卡房矿田大白岩矿段 1820 m 中段 17 穿脉, 保留的同生断裂和热水喷流通道相体走向北东, 倾向南东, 倾角 $50^\circ \sim 60^\circ$, 视厚度 60 m, 同生角砾为碳酸盐岩、硅质钠长石岩和凝灰质熔岩等, 发育火山地震形成的流变褶皱和同生褶皱, 角砾大小在 5~8 cm、0.2~0.3 cm 不等, 同生断裂穿切了不同火山岩相体, 向上过渡为条带状碳酸盐质凝灰质同生角砾岩, 消失于碳酸盐岩层之下。火山喷气-喷流同生沉积-同生交



a—金云母和榍石电子背衍射图 (EBSD) 和 Cs、Rb 和 Ti 面扫描图; b—金云母、阳起石和磁黄铁矿共生关系 (×20, 单偏光); c—金云母中包裹榍石 (电子背衍射图像); d—金云母中黄铜矿与磁黄铁矿呈固熔分离结构, KG-261B (×10; 反光镜下); e—包裹在金云母斑晶中的连晶状磁黄铁矿和黄铜矿, KG-300-1 (×10, 反光镜下); f—锡石与磁黄铁矿 (黑色) 呈连晶镶嵌结构, KG-27B (×10, 单偏光); g—中心红棕色为金红石, KG300-1 (×20, 聚光镜下); h—黄铜矿与阳起石呈交织状结构, KG-300-1 (×5, 反光镜下); i—棕黄色为磁黄铁矿与交织状阳起石, KG-260T (×5, 反光镜下)

图 3 卡房矿田碱性苦橄岩类特征与铜富集成矿关系

Fig.3 Relationship between the characteristics of alkaline picritic volcanic rocks and the copper mineralization in the Kafang ore-field. (a) Electron back scattering diffraction (EBSD) for phlogopite and titanite and map of surface scanning for Cs, Rb and Ti. (b) Intergrowth relationship for phlogopite, actinolite, and pyrrhotite (×20, plane-polarized light). (c) Titanite wrapped by phlogopite and EBSD for titanite and phlogopite. (d) Solid-solution separation structure of chalcopyrite and pyrrhotite in phlogopite, KG-261B (×10; reflected light). (e) Crystal stock of pyrrhotite and chalcopyrite wrapped by phlogopite phenocryst, KG-300-1 (×10, under retroreflector). (f) Crystal stock mosaic structure of cassiterite and pyrrhotite (in black), KG-27B (×10, plane-polarized light). (g) Reddish brown rutile in the centre, KG300-1 (×20, under the condenser). (h) Intertexture structure of chalcopyrite and actinolite, KG-300-1 (×5, under retroreflector). (i) Claybank pyrrhotite and intertexture structure of actinolite, KG-260T (×5, under retroreflector)

代成矿中心以金云母相和阳起石相为标志,在本区仍具有寻找新火山喷气成矿中心的潜力。③在中三叠世拉丁早期和晚三叠世诺利克期,碱性火山岩呈现东西向和北西西向分布在个旧-建水南缘,暗示哀牢山造山作用对个旧-建水地区的早一晚三叠世火山活动影响加大,改变了火山活动中心,形成了晚三叠世酸性火山岩喷发中心,具有“下碱性超基性岩,上碱性酸性火山岩”双峰式结构。④燕山早期深成岩浆弧侵入到贾沙-枯枝柏地区。燕山晚期形成了规模巨大的陆内深成伸展岩浆弧侵位;燕山最晚期,以花岗斑岩、二长斑岩、二长细晶岩、煌斑岩脉群和碱性辉绿岩墙等为特征。⑥卡房矿田 1380 m 坑道内,切层碱性辉绿岩岩墙具有高钛 (TiO_2 含量在 2.54%~3.15%之间) 钾玄岩系列特征,形成年龄在 77 ± 2 Ma (LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法平均年龄),初始岩浆熔体是形成深度介于 60~120 km (2~4 GPa) 的早二叠世岩浆活动,携带了岩浆同化地层的捕获锆石年龄为 2409 Ma、2616 Ma、290 Ma (尚志等, 2020)。这种富镁 (MgO 含量在 11.83%~13.19%之间) 苦橄质岩浆具有继承个旧地区三叠纪软流圈地幔特征,推测指示了先存三叠纪深部软流圈地幔形成的深部热点岩浆房信息。个旧卡房-老厂矿田内,碱性辉绿岩墙和钾镁煌斑岩脉群为残留火山机构中心标志,但关于火山喷发-岩浆侵入构造系统与锡铜钨铍多金属成矿系统在时间-空间-物质域的叠加成矿结构,尚待深入解析。

(6) 区域找矿预测: ①个旧组卡房段地层和碱性火山岩的厚度,在老厂和卡房矿田内呈北东向展布,推测该区域中三叠世个旧期早阶段的沉积成矿中心呈北东向展布,海相火山岩型锡铜钨铍多金属矿床主要分布在该区域内,如卡房矿田大白岩、新山、松树脚、竹林山、前进等矿段,老厂矿田塘子凹、老厂东、期北山等矿段; ②矽卡岩型锡铜钨多金属矿床、电气石细脉带型和蚀变花岗岩型钨锡矿床分布在花岗岩突起顶部,如老厂矿田梅雨冲等矿段; ③大比例尺低空磁法异常揭示深部隐伏磁性体分布范围较大,预测寻找隐伏海相火山岩型锡铜钨铍矿床仍具有巨大潜力,如卡房南部等。

1.3 滇东南印支期山弧盆耦合转换格局与区域成矿

华南地区中生代构造演化与印支板块、古特

提斯和金属成矿在全球具有特殊意义 (胡瑞忠等, 2010; 毛景文等, 2012; 张国伟等, 2013; Zhang et al., 2015; 许志琴等, 2016)。华南板块与印支板块在晚二叠世—三叠纪,沿金沙江-哀牢山-Song Ma 带-海南完成拼接碰撞造山,受新特提斯构造域和喜马拉雅山期陆内走滑造山改造强烈,对滇东南地区在二叠—三叠纪大地构造背景认识分歧较大。区域构造岩相学对比和变形筛分,有助于解析和确定区域构造岩相和成矿单元。①晚二叠世—早三叠世,哀牢山有限洋盆向东俯冲碰撞,晚二叠世末的滨海相含煤泥粉砂岩记录了古特提斯萎缩封闭;墨江地区上泥盆统金厂岩组韧性剪切 (251.90 ± 4.32 Ma) 为陆陆碰撞所形成,上三叠统歪古村组 (T_3w) 前陆磨拉石相呈角度不整合超覆在下伏地层之上 (方维萱等, 2002),是印支造山期构造岩相学记录。②云南点苍山地区辉长岩 (252.4 ± 1.6 Ma) 和闪长岩 (254.6 ± 1.8 Ma) 是华南板块与印支板块开始陆陆碰撞事件的记录,经历了弧岩浆岩 (251.7 Ma)、同碰撞高硅酸性岩 (246.7 Ma) 和碰撞后岩浆岩 (230.1 Ma) 3 期岩浆高峰 (刘汇川等, 2020)。③峨眉山玄武岩在个旧西区建水、金平、越南北部均有出露 (Zhou et al., 2002; Wang et al., 2007),受到峨眉山幔柱的显著影响 (Xu et al., 2019)。东特提斯有限洋盆 (哀牢山) 向东俯冲碰撞,俯冲持续时间为中二叠—早三叠世 (272~248 Ma),形成了哀牢山造山带东南段中二叠—早三叠世元江-金平-大象变质杂岩带 (徐文涛等, 2020)。该期俯冲碰撞事件形成了北西向哀牢山造山带隆起,并将金平-越南北部与个旧-建水地区分割,从早三叠世开始,个旧-建水-龙脖子三叠纪弧后裂谷盆地进入独立演化阶段。④广西凭祥地区三叠系北泗组英安岩 (227.8 ± 1 Ma, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权年龄),代表古特提斯洋向北俯冲于华南陆块之下形成的大陆弧产物,陆-陆开始碰撞的最晚时限为晚三叠世初 (李政林等, 2019)。⑤在云南富宁地区,晚二叠世吴家坪阶钛辉辉长辉绿岩 (258 ± 5 Ma) 与峨眉山幔柱密切相关,晚三叠世卡尼阶碱性辉长岩 (219.9 ± 6.6 Ma, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法加权平均年龄; 韦朝文等, 2018) 是个旧-建水弧后盆地构造反转期产物。云南富宁县者桑金矿床受广南-富宁断裂控制显著,金矿体呈似层状、透镜状和不规则状赋存于上二叠统吴家坪组泥质粉

砂岩、凝灰质粉砂岩夹凝灰岩中,Ⅲ号金矿体产于印支期基性岩脉与下三叠统罗楼组粉砂岩的接触带附近。者桑金矿床与载金矿物黄铁矿和毒砂共生的热液蚀变事件(215.3±1.9 Ma, 绢云母 Ar-Ar 坪年龄)和第二期辉长苏长岩(215±5 Ma, 锆石 U-Pb 年龄; 皮桥辉等, 2016) 侵位事件, 它们均与富宁-个旧-龙脖子三叠纪弧后盆地发生的构造反转事件有密切关系。⑥印支期以区域性挤压收缩为主要体制, 但富宁-个旧-龙脖子三叠纪弧后裂谷盆地的独立演化阶段, 以深部软流圈地幔上涌为主要动力学机制, 浅部耦合了区域上总体挤压收缩和走滑拉分作用。卡房矿田内, 碱性苦橄岩和碱玄岩(βvT_3 , 214.5±2.2 Ma; 张贵山等, 2019) 侵位事件, 也是富宁-个旧-龙脖子三叠纪弧后裂谷盆地发生构造反转的时期, 对于形成海相火山岩型铜钴矿床十分有利。⑦滇东南老君山地区猛洞岩群前寒武系斜长角闪岩, 在印支期变质峰期成岩平均温度和压力(646 °C、0.88 GPa) 达低角闪岩相(谭洪旗和刘玉平, 2017), 南温河片麻状花岗岩变质增生锆石年龄为 230 Ma, 属印支期构造热事件, 老君山变质核杂岩的雏形开始形成。滇东南文山地区的南秧田钨矿(209.5±1.1 Ma; 冯佳睿等, 2010; Feng et al., 2013) 和新寨锡矿属于印支期钨锡成矿带(毛景文等, 2012)。

在印支期滇东南老君山-南温河地区出现的垂向隆起事件, 逐渐向西发展到个旧-建水地区。秦德先等(2006) 报道了成矿年龄, 并划分了印支期海底基性火山-沉积矿床系列、海底沉积-喷流矿床系列和燕山期花岗岩叠加改造矿床系列等3个成矿系列。①在印支期海底基性火山-沉积矿床系列, 锡铜多金属矿体呈层状、似层状或透镜状, 并与围岩整合产出, 主要赋存在变碱性苦橄岩+碱玄岩+碱性玄武岩层内。在竹叶山矿区, 层纹状硫化矿石年龄为 96.68±15.4 Ma (石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄)、层纹状硫化物为 95.93±5.41 Ma (石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄)、变碱性苦橄岩+碱玄岩内条带状硫化矿石为 158.97±15.4 Ma (石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄), 推测后期构造成矿热事件造成了氩丢失引起成矿年龄偏新(秦德先等, 2006), 但暗示存在显著的燕山早期构造-成矿热事件。②在海底沉积-喷流矿床系列中, 中部和上部硅质灰岩与白云岩中, 矿体呈层状、似层状或透镜状, 并与围岩整合产出。在芦塘坝锡矿床中,

锡石的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄(205.11±4.38 Ma) 与 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄(192.18±2.26 Ma) 较为接近, 属于晚三叠世诺利阶-早侏罗世辛涅缪尔阶(216.5~189.6 Ma), 与金平县龙博河铜矿床中内的铜硫化物成矿年龄(213.4±3.6 Ma, Rb-Sr 等时线; 215±3 Ma, Sm-Nd 等时线; 郭健, 2020) 相近, 说明金平-个旧地区显著发育印支晚期-燕山早期铜锡成矿事件。③在燕山晚期花岗岩叠加改造矿床系列中, 锡铅锌银矿主要呈不规则状和脉状, 老厂矽卡岩型锡铜矿床内的石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 81.84±2.07 Ma, 与老厂矿田层间氧化矿体(86.7±2.8 Ma; Zhang et al., 2020) 和老卡花岗岩(85±0.85 Ma; 程彦博等, 2008) 的形成年龄具有一致性。个旧-建水三叠纪弧后裂谷盆地内的次级成矿洼地、碱性苦橄岩和碱性火山岩相带、盆内同生断裂带和盆内火山机构等构造组合属三叠纪弧后裂谷盆地构造系统, 属燕山期前岩浆侵入期的构造样式。④在个旧卡房矿田内, 金云母矽卡岩相(碱性苦橄岩) 为战略关键金属的叠加成矿储矿相体。X 射线粉晶衍射分析和岩矿鉴定结果表明, 在塘子凹锡铜多金属矿段 8 线 1830 m 中段, 矽卡岩型锡铜矿石富含菱铁矿(11%~16.93%) 和锂电气石(5.52%), 与金云母矽卡岩型锡铜铷钽矿石紧密共生。在大白岩锡铜矿段, 铜矿体内共生铷钽, 铷钽富集在金云母中, 铷与金云母矿物含量指数相关, 关系式如下:

$$\text{Rb} = 73.353e^{0.0321J}; R^2 = 0.5074 \quad (1)$$

公式中, 样品数 $N = 52$; Rb 为铷含量, $\times 10^{-6}$; J 为金云母含量, %。

含矿金云母矽卡岩原岩为碱性苦橄岩-碱玄岩(βvT_3 , 214.5±2.2 Ma; 张贵山等, 2019), 受燕山晚期细粒花岗岩(85~75 Ma; 程彦博等, 2008; Cheng and Mao, 2010; 张娟等, 2012) 侵入的影响发生了叠加成矿作用, 揭示锡铜钨铷钽多金属的同体富集成矿是碱性苦橄质火山喷发(βvT_3) - 岩浆侵入叠加成矿作用所致, 但仍需进一步研究碱性岩与战略性关键矿产大规模富集成矿机理。

2 燕山期岩浆侵入序列与垂向构造岩相学分带

2.1 个旧东区岩浆侵入构造系统的垂向分带

在时间域上, 个旧-建水地区火山喷发-岩浆岩侵入时间序列为: 晚二叠世碱性玄武岩(βP_3) +

中酸性火山岩 (λP_3) → 印支期碱性辉绿岩 ($\beta vT_{2,3}$) → 燕山早期碱性辉长岩 (vK_1) 和碱性二长岩 (ηK_1) → 燕山晚期斑状花岗岩 (γK_2a) + 粒状黑云母花岗岩 (γK_2b) → 细粒浅色花岗岩 (γK_2c) + 霞石正长岩和碱性正长岩 (ξK_2c) + 云斜煌斑岩 (χK_2c) + 碱性辉绿岩 (βvK_2c) → 似伟晶岩壳单元 (γK_2d)。

在空间域上, 燕山早期岩浆侵位方向为从西到东, 燕山晚期从北到南。在构造环境上, 从燕山期碰撞造山晚期演化为碰撞造山期后环境。在垂向构造岩相学分带上, 从顶部细粒浅色电气石花岗岩 (γK_2c) → 上部细粒黑云母花岗岩 (γK_2b) → 下部斑状花岗岩 (γK_2a) + 似伟晶岩壳

单元 (γK_2d), 新发现的似伟晶岩壳单元 (γK_2d) 位于花岗岩株边部 (图 4), 总体上花岗岩具有显著高分异特征。在时间-空间-物质域上, 矿山井巷工程在 1400 m 中段新控制了萤石长英质伟晶岩壳相和巨斑状花岗岩, 萤石长英质伟晶岩壳+萤石长英质伟晶岩脉+巨斑状萤石电气石花岗岩的组合, 可能是复式侵入岩体的浆液结晶分异中心部位或最晚期浆液富集的似伟晶岩壳单元 (γK_2d), 而似伟晶岩壳单元 (γK_2d) 与个旧组碱性苦橄岩-碱玄岩-碱性玄武岩 (βvT_3) 和碱性辉绿岩的接触带, 对战略关键矿产叠加成矿 (Cu-Co 型、Cu-Co-Rb-Cs-Li-Nb-Ta-Be) 十分有利, 今后应进一步解剖研究。

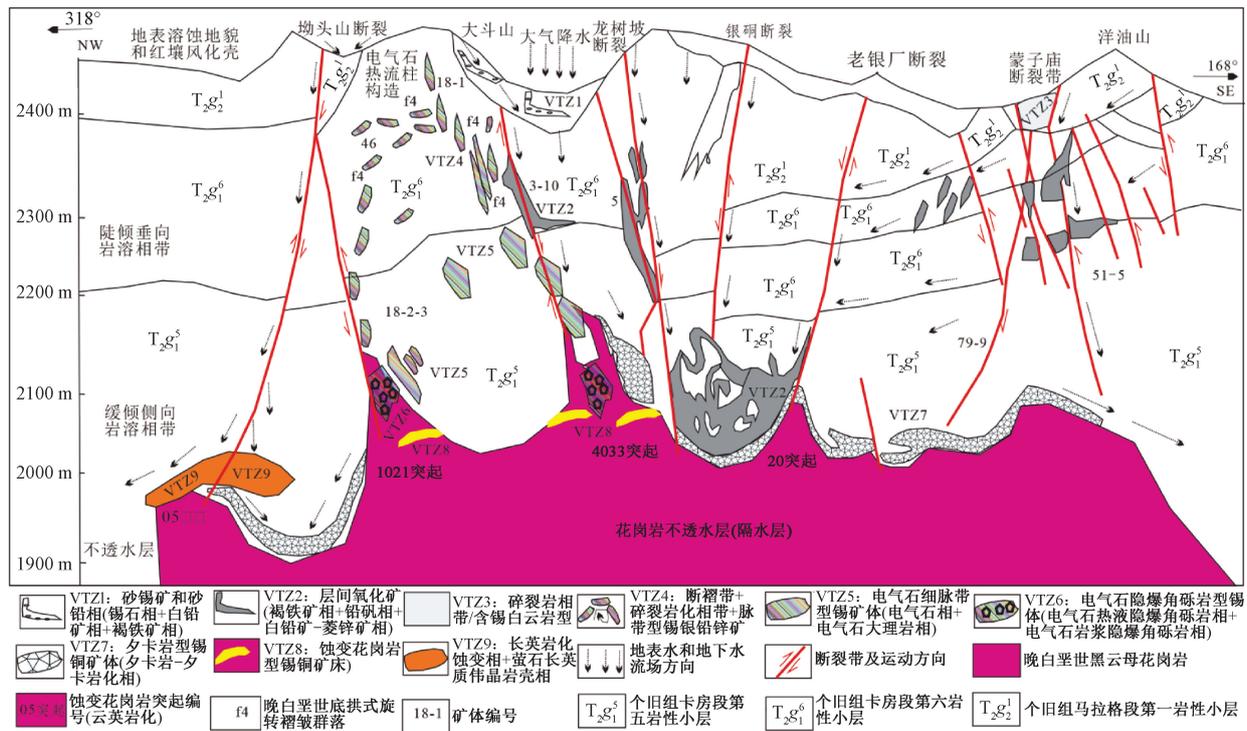


图 4 个旧老厂矿田垂向成矿分带与构造岩相学分带

Fig. 4 Vertical zones by mineralization and tectonic lithofacies in the Laochang ore-field of Gejiu

燕山期岩浆侵入构造系统对个旧-建水地区构造岩相格架的再造作用具体表现为以下特征。①燕山早期碱性辉长岩 (vK_1) 和碱性二长岩 (ηK_1) → 燕山晚期斑状花岗岩 (γK_2a) + 霞石正长岩和碱性正长岩 (ξK_2c) 等岩浆侵入序列, 在个旧西区形成了岩浆穹隆构造系统, 它们接触带周缘控制了锰-锡银铅锌-铌稀土成矿系统。②燕山晚期斑状花岗岩 (γK_2a) + 粒状黑云母花岗岩 (γK_2b) → 细粒浅色花岗岩 (γK_2c) + 云斜煌斑岩 (χK_2c) → 似伟晶岩壳单元 (γK_2d) 等岩浆侵入

序列, 在个旧东区形成了岩浆底劈侵位岩突-岩凹-岩舌+岩浆热流柱构造系统, 控制了个旧东区锡铜钨多金属成矿系统; 该岩浆侵入系列在老厂-卡房矿田内与个旧组卡房段碱性火山岩带和火山机构叠加, 形成了火山喷发-岩浆侵入构造系统, 控制了个旧东区锡铜钨钼铌多金属成矿系统。在个旧东区晚白垩世岩浆侵入构造系统内, 白沙冲、马拉格、松树脚、老厂、卡房等 5 处花岗岩侵入体 (γK_2b) 与锡铜多金属成矿关系密切: 白沙冲和马拉格花岗岩侵入体具有从北西南东方向

侵入的特征(庄永秋等,1996);松树脚与卡房花岗岩侵入体(γK_2b)呈隐伏花岗岩岩体和岩株,从深部的岩体(株)顶面向上进入到个旧组内。晚白垩世岩浆侵入构造系统的构造样式和构造组合分别是:①蚀变花岗岩内热启断裂带;②花岗岩突起-岩舌凹陷→电气石岩浆隐爆角砾岩(岩浆气囊构造);③花岗岩突起-岩舌-凹陷→电气石热液角砾岩→电气石大理岩+电气石细脉带-断裂带→旋转断褶区-碎裂岩化相带(岩浆热流柱构造);④花岗岩突起-岩舌凹陷→钙镁质矽卡岩相+镁质矽卡岩相+金云母矽卡岩相(隐伏碱性火山岩);⑤花岗岩突起-凹陷→热启断裂-旋转裂褶区→碎裂岩化相带-大理岩相带(热流柱构造)。

现今个旧东区岩浆叠加侵入构造系统、新生代岩溶构造、三叠纪碱性火山岩相带和火山机构具有相互叠加的空间-物质结构,从地表向深部具有9个垂向构造岩相学分带(VTZ),分别是(图4):①云贵高原侵蚀面(VTZ1)由山顶侵蚀面、岩溶侵蚀面、砖红壤层和残坡积型砂锡矿等组成;②表生岩溶构造系统(VTZ2)由垂向岩溶构造带、缓倾斜侧向岩溶构造带和深部岩溶前锋面、洞穴沉积物、洞穴溶积沉积岩和洞穴岩溶角砾岩、层间锡氧化矿体、底部不透水层等组成(详见后述),因地下水沿断控型岩溶构造下渗和垂向岩溶构造发育,在花岗岩顶面的储水岩溶构造与硫化矿耦合部位,因硫化矿体发生了强烈的表生氧化作用,形成了氧化矿体,VTZ2可沿断控型岩溶构造穿切进入深部VTZ7中,与其他的岩相带具有异时同位镶嵌结构(图4);③似层状碎裂岩化相-碎裂岩化相碳酸盐岩相带-含锡石碎裂岩化相白云岩(VTZ3)具有后生的穿层叠置镶嵌空间拓扑学结构;④中三叠统个旧组断褶式碳酸盐岩层(VTZ4),发育底拱式旋转褶皱群落(图4)、切层断裂和脉带型锡银铅锌矿床,发育地下水渗滤对流循环热液体系;⑤碎裂岩化大理岩化相-电气石碎裂岩化大理岩相带(VTZ5),发育似层状电气石大理岩相带和切层电气石热液角砾岩相,形成细脉带型锡矿床;⑥电气石隐爆热液角砾岩相带(VTZ6,图4)由电气石热液角砾岩相系(VTZ6bb)和岩浆隐爆电气石热液角砾岩相系(VTZ6amb)组成,前者是超压岩浆热液流体体系,后者是超压浆液热流体体系;⑦矽卡岩化相-矽卡岩相带(VTZ7)呈层状、似层状、不规则状

和囊状,在黑云母花岗岩边部,向外依次发育内矽卡岩相、正矽卡岩相和外矽卡岩相(变矽卡岩相),在与碱性橄榄岩-碱玄岩-碱性玄武岩接触带分别形成阳起石金云母透闪石矽卡岩-阳起石金云母矽卡岩相(内矽卡岩相)、萤石透闪石金云母矽卡岩相(正矽卡岩相)、阳起石金云母矽卡岩相(变矽卡岩相);⑧浅色花岗岩相(VTZ8)以岩浆结晶热体系为主,在降压降温过程中,挥发组分发生富集,形成蚀变花岗岩相(VTZ8a)、碱长花岗岩-二长斑岩(VTZ8b)等;⑨萤石长英质伟晶岩壳相和巨斑状花岗岩等组成的岩浆气成热液结晶核相(VTZ9),为在相对稳定和封闭环境中,残余岩浆最晚结晶作用形成的产物。总体上,岩浆侵入构造系统的根部相(VTZ8)和结晶核(VTZ9,另文详述),与同岩浆侵入期形成的岩浆侵入构造系统中部相(VTZ5、VTZ6、VTZ7)、外缘相(VTZ4)和远端相(VTZ3)均形成于晚白垩世,也形成了同岩浆侵入期岩浆热液岩溶作用和酸性成矿热液岩溶作用。

2.2 似层状碎裂岩化相含锡石白云岩(VTZ3)与似层状白云岩型锡矿床

在老厂矿田坳头山-大斗山、蒙子庙-湾子街、龙树坡-老银厂和洋油山等矿段(图4),碎裂岩化相含锡石白云岩(VTZ3,白云岩型锡矿床或细网脉带型锡矿床)受层间和切层的近平行断裂-裂隙带和斜交断裂-裂隙带控制,储矿层位以个旧组卡房段碎裂岩化厚层和块状白云岩为主。以小型储矿断裂-裂隙带中充填米级大脉为主,脉宽(热启裂隙宽度)1.5~0.1 m,脉体密度约10条/100 m。厘米级微型储矿裂隙发育。层间滑脱构造控制了顺层发育碎裂岩化相、片理化相、张扭性构造热液角砾岩化相、细脉带型绢云母化蚀变相、铁锰碳酸盐化蚀变相、细脉状锡石-赤铁矿化等。①在碎裂岩化相白云岩中,以富集大量毫米—厘米级细网脉带型锡矿脉为特征,可形成大型锡矿床(庄永秋等,1996)。在成分特征上,毫米—厘米级细网脉以锡石褐铁矿脉、锡石赤铁矿脉、锡石绢云母脉、锡石铁锰方解石-菱锰矿脉、铁锰碳酸盐化脉等为主。②在切层的压剪性断裂-裂隙带中,充填有网状脉、羽状脉、侧羽状脉、梯状脉等,富集在白云岩质碎裂岩和碎裂岩化相白云岩中,主要与陡倾斜断裂-裂隙带控制的切层白云岩质碎裂岩(碎裂岩相)密切相关,发育锡石褐铁矿脉、

锡石赤铁矿脉、锡石铁锰方解石-菱锰矿脉、铁锰碳酸盐化脉等,含脉率高达90%。厘米和毫米级裂隙发育,裂隙密度在100~200条/m,主要以构造裂隙+热启裂隙为主。随着远离切层压剪性断裂-裂隙带,形成白云岩质碎裂岩(碎裂岩相,Sn含量>1.0%)→碎裂岩化相白云岩(Sn含量在1.0%~0.35%之间)→碎裂状白云岩分带(矿化层,Sn含量<0.2%)。③在切层的压剪性裂隙带中,发育陡倾斜褐铁矿脉和赤铁矿脉,少量绢云母细脉,两侧发育较强的铁锰碳酸盐脉和铁锰矿化脉,含矿率为62%,Sn含量约为0.35%。④在层间剪滑断裂-裂隙带中,富集缓倾斜的锡石赤铁矿脉、锡石褐铁矿脉和绢云母脉。垂直于这些缓倾斜脉体,发育铁锰方解石和铁锰化细脉和网脉,含矿率为64%,Sn含量约为0.53%。⑤在小型储矿构造岩相学样式上,出现白云岩质碎裂岩(切层的压剪性断裂-裂隙带,细网脉带型锡矿)→碎裂岩化相白云岩(切层压剪性裂隙带,平行脉带型锡矿)→碎裂岩化相白云岩(层间剪滑断裂-裂隙带,缓倾斜细网脉带型锡矿)→碎裂状白云岩(无矿带)。⑥在构造岩相学机制上,构造裂隙(米级至>毫米级)和构造裂缝(<毫米级)在白云岩中最为发育,石灰岩次之,泥灰岩中最差。

因此,在层位和水平方向上,白云岩型锡矿床富集在白云岩质碎裂岩相和碎裂岩化相白云岩中(VTZ3)。含锡石碎裂岩化相白云岩(VTZ3)发育在次级背斜核部和倾伏端,在背斜轴部和倾伏端易形成层间断裂-裂隙带、碎裂岩化相带,与深部黑云母花岗岩突起等综合构造岩相学因素具有垂向空间耦合结构,它们是燕山晚期岩浆侵入构造系统的远端相。在同岩浆侵入期增温型地热场中,形成了循环对流的中低温热液成矿体系;岩浆热液成矿体系与中三叠世热水沉积形成的初始富集层位,在空间上异时同位叠加成矿。在切层断裂-裂隙带中,白云岩质碎裂岩相-碎裂岩化相白云岩的发育程度,与切层断裂-裂隙带中热液岩溶作用和地下水流场耦合作用等因素导致了矿质沉淀,锡石铁锰化脉和锡石赤铁矿脉揭示了强氧化态相成矿流体;锡石铁锰碳酸盐化脉和菱锰矿化脉、绢云母化脉与深部岩浆热液作用有密切关系,指示了酸性还原相成矿流体;在白云岩质碎裂岩相-碎裂岩化相白云岩中的张剪性构造应力场耦合作用下,锡石富集成矿,而铜铅锌多不具

工业富集价值。

2.3 个旧组内断褶式碳酸盐岩层(VTZ4)与脉带状锡银多金属矿床

构造岩相学变形筛分表明:第四期岩浆底拱式旋转褶皱群落(f4)形成于中三叠世同生滑移褶皱群落(f1)、印支晚期东西向褶皱群落(f2)和燕山早期北东向褶皱群落(f3)之后。在中三叠统个旧组内,断褶式碳酸盐岩层(VTZ4)的构造组合为底拱式旋转褶皱群落(f4;图4)+断裂-裂隙带+电气石脉带型锡银铅锌矿床,发育旋扭性和张扭性应力场,为下渗循环对流热液体系与深部岩浆成矿热液的混合作用导致矿质富集提供了构造岩相耦合条件,属晚白垩世岩浆侵入构造系统末端相。

在岩浆侵入构造系统外缘末端相,成矿热液上升迁移和聚集具有涡旋式运动学特征,在成矿热液自下而上的上升运移聚集过程中,存在着水平方向的旋转分量;受地球自西向东自转产生形成的科里奥利力影响,在地球赤道以北地区形成逆时针旋转应力场,因此,也就可能形成逆时针旋转的成矿热液涡流场和涡流运动的构造应力场。环状矿体和帚状矿脉群的收敛端、褶皱-断裂构造组合的收敛端指向,均有助于揭示岩浆-热流体场形成的成矿热液涡流场和涡流运动的构造应力场方向。①前岩浆侵入期构造-成矿流体耦合结构。在多组不同方向和性质断裂-裂隙带内,先存断裂-裂隙带与岩浆侵入构造系统表现为岩浆热液期物理性耦合作用,断裂-裂隙带中多充填锡石电气石和锡石石英电气石脉群,与围岩具有热液反应边构造和围岩蚀变分带,以脉带型蚀变带+碎裂岩化相+弱蚀变围岩等为识别标志。矿体分布规律受先存断裂-裂隙带与成矿流体耦合作用双重控制,这种先存断裂-裂隙带在远离岩浆侵入构造系统可观测两类显著不同的胶结物,分别为热液胶结物和构造泥屑胶结物。②同岩浆侵入期构造与成矿热流体涡流场具有物理-化学多重耦合结构面。具有热流体涡旋场的成矿热液形成于岩浆上升侵位的过程中,与增温型局部地热场共生,以围岩中发育角岩化相+大理岩化相+变砂卡岩化相为局部地热场的构造岩相学识别标志。这些接触热变质相带包络了锡石电气石和锡石石英电气石脉带群,二者具有包含镶嵌的空间拓扑学结构。总体上,接触热变质相带(大理岩化相+变砂卡岩化相+角

岩化相)-碎裂岩化相(碎裂状白云岩等)是与岩浆侵入构造系统有关的增温型局部古地热场的识别标志相,断裂-裂隙带、锡石电气石和锡石石英电气石脉带是储矿构造的识别标志相。③成矿热液涡流场和涡流运动的构造应力场根部相是花岗岩侵入体接触带,由内接触带、正接触带和外接触带组成,它们是岩浆上升侵位过程中形成的增温型古地热场,高热流密度的地热场中心部位(较高压力的高热流密度中心相)是温度和内压力最高的区域(高温相+较高的压力相),受热流体内压力和高温相的强烈驱动,产生了上升迁移的热化学驱动力并导致热启断裂和热启裂隙系统,形成了构造释压和成矿流体排泄构造通道。周边岩层的中低温相流体向该中心部位补给到较高压力的高热流密度中心相(富气的浆液过渡相岩浆流体房),也就启动了岩浆热液-地下水之间形成的巨大热对流体系。在地球自转的科里奥利力作用下,这种具有巨大热对流体系的地热场内发育成矿热液涡旋体,内圈热流体强烈地围绕中心旋转上升,外圈的低温相流体呈螺旋切线状卷入内圈并被加热。碱性苦橄岩-碱性岩类中的锡铜铍钼等成矿物质,被活化进入热流体中与较高压力的高温相岩浆热液混合,沿热启断裂-热启裂隙带上升聚集,当局部成矿流体内压力超过围岩静压力后,形成热液角砾岩相和储矿热液角砾岩相,并导致矿质聚沉富集成矿。这种热启断裂-裂隙+热液角砾岩相带,是成矿热液涡流场和涡流运动的构造应力场根部相的识别标志相,它们与内接触带、正接触带和外接触带呈包含和穿切的空间拓扑学结构,根植式进入花岗岩侵入体内部后消失,以热启断裂-裂隙带中形成热液角砾岩相和储矿热液角砾岩相作为根植式断裂带的根本相标志。当成矿热流体上升到一定深度后,由于构造释压,温度和压力降低,成矿物质在中部断裂-裂隙带形成了锡石电气石和锡石石英电气石脉带(图5a—5f)。

2.4 碎裂岩化电气石热液岩溶大理岩相带(VTZ5)与电气石网脉带型锡矿床

碎裂岩化大理岩化相-碎裂岩化电气石热液岩溶大理岩相带(VTZ5)-电气石网脉带型锡多金属矿床,主要由似层状电气石碎裂岩化岩溶大理岩相带和切层电气石热液角砾岩相组成。碎裂岩化相叠加在大理岩化相碳酸盐岩、切层和顺层网脉状电气石化蚀变相、切层电气石热液角砾岩相

等之上。沿碎裂岩化相中的网状裂隙组充填有细脉状电气石锡石脉(图5a—5k)。在空间域上,它们是岩浆热流柱构造的物质组成,在老厂矿田中部黄泥硐断裂-坳头山断裂、梅雨冲断裂-龙树脚断裂之间,形成大型规模的电气石细脉带型锡矿床,如大斗山锡矿段等。北东向17号和18号矿脉带长度分别为1200 m、1900 m,宽度分别为100 m、400 m。18号矿带位于老厂05和4033两个花岗岩突起之间(图4),规模较大且矿化连续性较好,从地表一直延伸到花岗岩接触带深约400 m。南东部17号矿脉带赋存在4033和1021花岗岩突起南东侧。电气石细网脉带型锡矿床的成矿年龄为 82.7 ± 0.7 Ma(白云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 等时线年龄, $820\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$;杨宗喜等,2009),在 $500\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 760\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热温度下,具有 83.8 ± 5.4 Ma、 114.8 ± 8.9 Ma、 118.9 ± 1.6 Ma、 116.3 ± 1.5 Ma等年龄数据。

(1)在面带状碎裂状大理岩化相白云岩-面带状碎裂岩化大理岩化相褪色碳酸盐岩中,富集大量米-厘米级网脉带型锡石-石英电气石矿脉和锡石-硫化物-石英电气石矿脉。在电气石网脉带型锡矿床顶部,发育了面带状大理岩化相;在层间滑动断裂带和似层状碎裂岩化相内,发育了网脉状锡石-硫化物-石英电气石矿脉,其上、下盘围岩均为褪色化结晶灰岩和褪色化重结晶白云岩(图5a—5f)。推测富电气石的成矿流体沿切层断裂带上升,进入层间滑动构造岩相带(层间断裂+层间碎裂岩化相带):①在大理岩化相层间热储构造内,层间碎裂岩化相-裂隙系统导致成矿流体发生构造释压而卸载成矿物质,这种构造岩相与成矿流体的耦合结构是先存碎裂岩化-裂隙层流耦合模型,在这种构造岩相学模型中,从层间带状大理岩相开始,向上、下盘围岩形成了层间带状大理岩相→大理岩化相→褪色碳酸盐岩,上、下垂向热辐射传导结构发生了成矿流体的热衰竭,在沿层间滑动构造带尖灭部位,也具有层间带状大理岩相→大理岩化相→褪色化相碳酸盐岩(图5f),层间滑动断层消失,碎裂岩化相强度明显减弱;②在碎裂岩化大理岩相和碎裂岩化大理岩化相碳酸盐岩中,陡倾斜的切层张剪性断裂-裂隙带中发育了平行脉带和菱形脉带,与热启型陡倾斜断裂-裂隙带和大理岩相-大理岩化相密切相关,沿两组优势方向($\text{SE}120^{\circ} \sim 140^{\circ} \angle 50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 、 $\text{NW}330^{\circ} \sim 340^{\circ} \angle 75^{\circ} \sim 85^{\circ}$)产出的锡石-石英电气

石矿脉和锡石-硫化物-石英电气石矿脉在深部具有相向的产状,向浅部具有相背的产状,构成了岩浆热流体柱的总体构造形迹,深部受电气石热液角砾岩相上方的放射状热启裂隙相带控制,以锡石-石英和电气石矿脉为主,与穿层长英质岩脉和脉状矽卡岩相共生,发育电气石-长英质矽卡岩脉,浅部受到底拱式旋转褶皱群落两翼构造裂隙相带控制,以锡石-硫化物-蓝电气石矿脉为主,与锂云母-蓝电气石脉共生(图51);③在层间剪滑断裂-裂隙带中富集缓倾斜电气石脉类,以透镜状、菱形、层间透镜状和层间平行脉状的电气石脉类产出,它们充填于顺层剪滑构造带中,S形脉、锯齿状脉和褶曲状脉富集在顺层剪切滑动构造带中,总体上受到层间滑动构造的控制,浅部富集在层间大理岩相内,上、下盘为渐变式大理岩化相灰岩→褪色化蚀变结晶灰岩→结晶灰岩,形成锡石-电气石矿脉、硫化物-电气石-矽卡岩脉。

(2) 在热启型切层张剪性断裂-裂隙带形成的产物分别是:①在切层电气石热液角砾岩相带周边,同岩浆侵入期酸性成矿热液岩溶作用较为发育,形成切层岩溶洞穴和岩溶空洞,发育电气石晶腺晶洞构造,蓝电气石呈束状和放射状自行晶晶族(图5b、5c),在方解石电气石热液岩溶角砾岩相向外侧周边,相变为锡石-石英电气石网脉带→锡石-电气石化大理岩相,这种切层电气石热液角砾岩相带,向深部与石英电气石热液角砾岩体、电气石岩浆隐爆角砾岩体和电气石蚀变花岗岩体相连接,属岩浆热流柱构造形成的大理岩相带和镶嵌状切层电气石热液角砾岩相带;②向深部,发育切层锡石石英电气石热液角砾岩相+顺层锡石石英电气石碎裂状大理岩相,在切层锡石石英电气石热液角砾岩相附近发育热液岩溶洞穴和空洞,充填电气石热液角砾岩和束状电气石晶洞构造。在切层锡石石英电气石网脉+顺层锡石石英电气石碎裂岩化大理岩化相中,以热启裂隙中充填电气石网脉发育为特征,局部伴有热液岩溶空隙和洞穴;③在网脉状锡石石英电气石大理岩化结晶灰岩相中,以热启裂隙羽状尖灭并充填电气石细脉和大理岩化接触热反应边为识别标志。

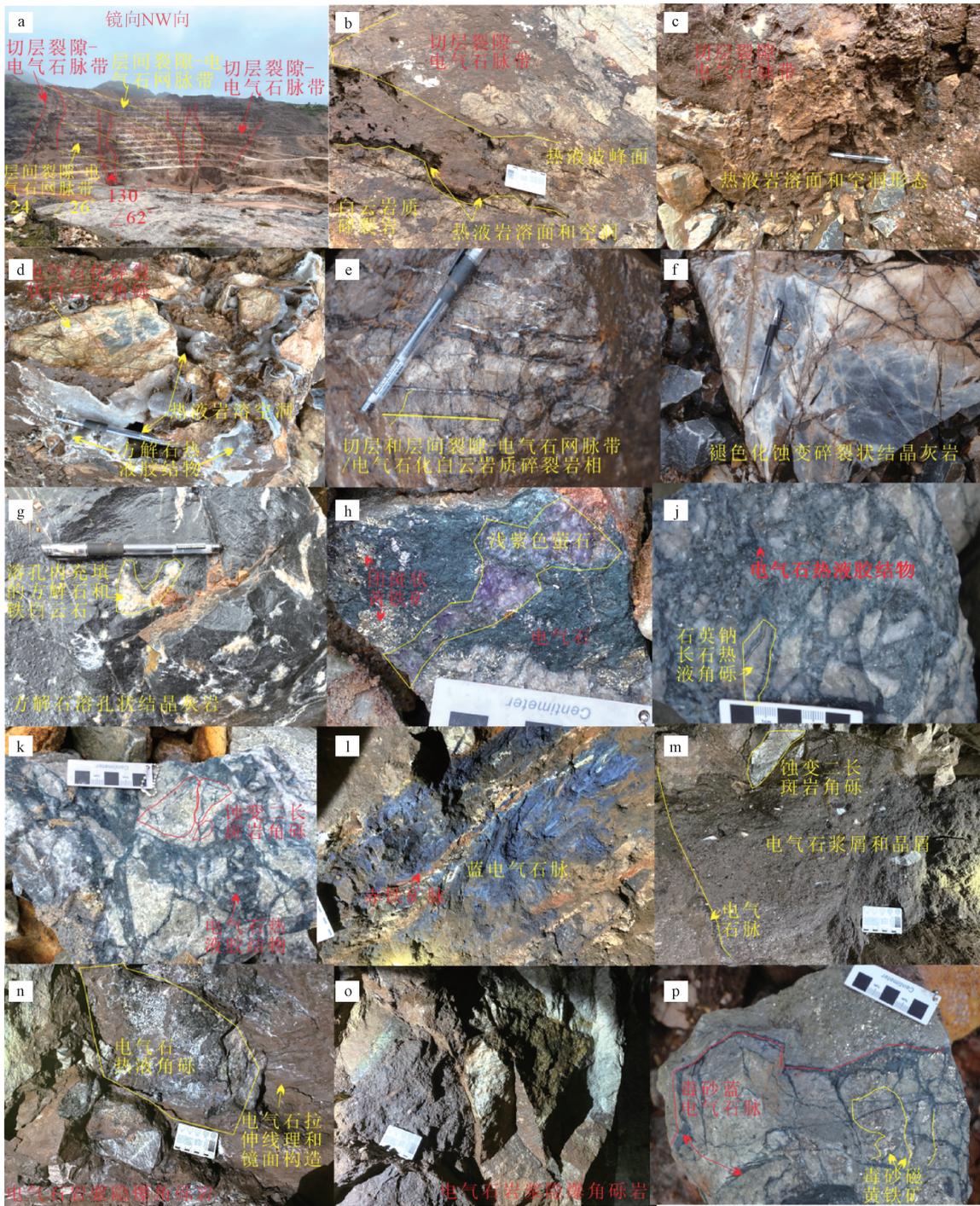
(3) 在电气石网脉带型锡矿床和电气石岩浆热流柱构造内,形成了自上而下的显著垂向构造岩相学分带:①上部相为锡石-锂云母-蓝电气石

脉,以锡富集成矿为主;②中部相为锡石-硫化物-矽卡岩-电气石脉,为锡富集成矿中心部位,伴生W-Be-Cu,发育黑电气石、蓝电气石、石榴子石、透辉石、阳起石、萤石、长石、石英、铁方解石、铁锰白云石、白云母等,富集锡石、磁黄铁矿、黑钨矿、白钨矿、黄铜矿、辉铜矿、绿柱石等;③下部相以长英质-矽卡岩-黑电气石脉为主,Sn-Be-W富集成矿;④根部相为石英电气石大脉+石英赤铁矿电气石大脉+赤铁矿电气石大脉,为高氧化态的地球化学酸性相,它们根植于电气石蚀变花岗岩突起和电气石热液隐爆角砾岩体之中。

(4) 在电气石碎裂岩化岩溶大理岩相带内,发育隐伏岩浆热液化学溶蚀-充填成岩相系:①酸性化学溶蚀-充填成岩相形成于晚白垩世-古近纪,发育在不纯碳酸盐岩内断裂-碎裂岩化相中,碳酸盐岩发生酸性热液岩溶作用而形成大量扩容性裂隙和溶洞,充填酸性了热液充填物和热液角砾岩等,如皮壳状方解石胶结的电气石热液角砾岩,为典型的酸性化学溶蚀-充填成岩相;②酸碱反应-溶蚀-充填成岩相,形成于晚白垩世燕山晚期黑云母花岗岩侵位过程中,以含锡石网脉状石英电气石大理岩相、含锡石石英电气石热液角砾岩相和方解石电气石热液角砾岩相为代表,它们是在酸性-碱性反应、热液溶蚀和热液充填等相互作用下,形成的酸碱反应-溶蚀-充填成岩相,如大斗山矿段富电气石酸性热流柱构造系统;③根部相为富电气石岩浆隐爆角砾岩相(图5m-5o),它们是岩浆隐爆角砾岩相区和岩浆-气成高温热液的浆液相混合区域,属富电气石酸性热流柱构造系统的根部相、富赤铁矿石英电气石相(原生氧化态酸性成矿流体相)、富硫化物电气石相(还原态酸性成矿流体相)等热能量-成矿物质的供给中心,富电气石岩浆热液隐爆角砾岩相中,多期次岩浆隐爆过程形成了大小不一的浑圆状电气石角砾,焊接物中发育电气石浆屑和晶屑、自形晶电气石等,浑圆状电气石角砾与浑圆状蚀变花岗岩角砾以及具有反应边结构的大理岩角砾紧密共生。

2.5 热液角砾岩相带和电气石热液隐爆角砾岩相带(VTZ6)与三稀金属矿

电气石热液隐爆角砾岩相带(VTZ6;图4)由3个构造岩相系组成,分别为:电气石热液角砾岩相系(VTZ6cb;图5c、5d)、电气石热液隐爆



老厂矿田大斗山矿段露天采场: a—电气石热流柱与网脉状电气石热启裂隙相; b—电气石热流柱构造内热液岩溶空穴 (热液排气口); c—电气石热液角砾岩与热液岩溶面 (VTZ6cb); d—电气石热液岩溶角砾岩 (VTZ6cb); e—电气石热液角砾岩外侧的网脉状电气石化大理岩相 (18-1号矿体); f—层间和穿层的细脉状电气石大理岩化相 (18-1号矿体); g—18-1号矿体围岩中, 中三叠世方解石溶孔状结晶灰岩坳头山—大斗山矿段—湾子街矿段深部 2050 m 中段; h—黄铁矿萤石电气石脉; j—毒砂磁黄铁矿电气石热液角砾岩 (VTZ6bb); k—电气石热液隐爆角砾岩 (VTZ6bb); l—大脉状赤铁矿蓝电气石脉 (高氧化强酸性相); m—电气石岩浆隐爆角砾岩 (VTZ6amb); n、o—坳头山花岗岩岩枝与电气石岩浆热液隐爆角砾岩 (VTZ6amb); p—毒砂磁黄铁矿电气石岩浆热液角砾岩 (热液角砾岩化蚀变花岗岩)

图5 个旧地区电气石细脉带型锡矿床与电气石热液隐爆角砾岩

Fig. 5 Tourmaline veinlet belt-type tin deposit and tourmaline-hydrothermal cryptoexplosive breccias in Gejiu

Potographs from a to g are from the open-pit in the Dadoushan mine district, and potographs from h to p are from the 2050m level at the depth of the Aotoushan, Dadoushan, and Wanzijie mine districts.

角砾岩相系 (VTZ6bb; 图 5j、5k) 和电气石岩浆隐爆角砾岩相系 (VTZ6amb; 图 5m—5p) 组成, 在垂向上具有显著的构造岩相学分带。电气石岩浆隐爆角砾岩相系 (VTZ6amb) 组成了电气石岩浆热流柱构造根部相系, 属超压岩浆热液流体体系。在老厂矿田花岗岩突起 (图 2、图 4) 顶部, 发育了超压热流体体系组成的岩浆气囊构造, 是电气石岩浆热流柱构造的底部热能量-热物质供给源区。推测电气石黑云母花岗岩在岩浆结晶分异作用后, 形成了残余岩浆 (浅色细粒电气石花岗岩、富电气石浅色花岗岩和富电气石二长斑岩等)、长英质熔体 (长英岩化蚀变相、细晶岩、云英岩化蚀变相、萤石长英质似伟晶岩壳、电气石萤石长英质似伟晶岩) 和富 F-Cl-B 等挥发组分的气成高温流体, 它们是“浆-气-液”三相的高温相分异体系, 文中称为岩浆气囊超压热流体体系。同岩浆侵入期热力断裂是导致岩浆气囊超压热流体发生体系释压和崩溃坍塌, 进而形成电气石隐爆角砾岩相系 (VTZ6) 的主要机制。这种岩浆气囊超压热流体体系, 多期次热启断裂因构造释压形成了电气石岩浆隐爆角砾岩相, 电气石内发育的震荡岩带可作为矿物地球化学岩相学记录。在晚白垩世燕山晚期黑云母花岗岩侵位过程中, 形成了富电气石酸性热流柱构造系统, 电气石热液角砾岩相系 (VTZ6cb)、电气石热液隐爆角砾岩相带 (VTZ6bb) 和电气石岩浆隐爆角砾岩相系 (VTZ6amb) 等是该热流柱构造根部相的物质组成, 如大斗山电气石网脉带型锡矿段等。

富电气石岩浆热流柱构造系统具有显著的垂向构造岩相学分带, 从下到上划分为 3 个次级构造岩相学分带。①电气石热液角砾岩相系 (VTZ6cb) 为岩浆气成高温浆-液混合区域, 属电气石酸性热流柱构造系统根部相, 它们是富赤铁石英电气石相 (原生氧化态酸性相) 和富硫化物电气石相 (还原态酸性相) 的热能量-热物质供给中心, 位于电气石热液隐爆角砾岩相和电气石岩浆隐爆角砾岩相之上。②电气石热液隐爆角砾岩相带 (VTZ6bb, 岩浆气囊构造上部) 位于电气石岩浆隐爆角砾岩相系 (VTZ6amb) 或隐伏电气石化蚀变花岗岩突起顶部和边部, 如在老厂矿田 1950~2300 m 标高较为发育。该相带由电气石热液隐爆角砾岩、硅化电气石岩浆热液隐爆角砾岩、硅化电气石岩浆热液角砾岩、硫化物硅化电气石热液角砾

岩、萤石石英电气石热液角砾岩等组成。局部发育电气石化蚀变花岗岩和电气石化蚀变二长花岗岩为特征。电气石网脉、萤石电气石网脉、磁黄铁矿毒砂网脉、硫化物电气石网脉等呈热液胶结物, 热液角砾为钠长石蚀变花岗岩和蚀变花岗岩, 这些角砾呈菱形和次浑圆状, 具有显著张剪性结构面的电气石热液角砾岩相 (图 5 中 j)。在电气石热液角砾岩和磁黄铁矿黄铜矿矿石等锡铜铅锌硫化物矿石中, 发育气孔状构造。在电气石热液隐爆角砾岩相中, 多期次富电气石气液隐爆作用形成了大小不一的浑圆状电气石角砾, 浑圆状电气石角砾与浑圆状蚀变花岗岩角砾以及具有反应边结构的大理岩角砾紧密共生。焊接物由电气石浆屑和晶屑、自行晶电气石等组成。研究认为, 在老厂矿田内电气石热液隐爆角砾岩的形成机制是: 深部富电气石的超压高温的浆-液流体上升过程中, 突破了上覆围岩静压或受到上覆围岩中的断层释压等因素的影响, 产生的减压作用导致流体沸腾或超压, 突破围压引发了流体沸腾。随后, 上覆岩层突然减压破碎, 岩浆-流体发生隐爆作用, 并将上层岩体破碎胶结成岩, 形成电气石热液隐爆角砾岩相, 归纳为“富电气石型气-液两相流体沸腾→气液隐爆”构造岩相学模式。③电气石岩浆隐爆角砾岩相系 (VTZ6amb), 发育在隐伏黑云母花岗岩株顶部岩突构造附近 (图 4, 图 5), 在岩浆结晶分异作用下, 形成了浆-气-液三相不混溶作用和相分异。富电气石浅色花岗岩、富电气石二长斑岩和富电气石二长花岗岩上侵, 形成了向上尖灭的岩羽和岩脉带 (固相); 不断聚集的富含 F-Cl-B 气相挥发组分的残余岩浆, 形成了岩浆气囊构造, 在向上运移过程中形成了长英质化蚀变相、云英岩化蚀变相和电气石化蚀变相。该相系在老厂矿田隐伏花岗岩突起带 1950~2050 m 标高较为发育, 随隐伏花岗岩顶面的降低, 在 1800 m 标高局部也较为发育。岩浆气囊构造的根部相位于隐伏黑云母花岗岩突起顶部, 包括上侵岩枝状和岩羽状电气石化蚀变浅色花岗岩、电气石云英岩化蚀变浅色花岗岩和电气石黏土化蚀变浅色花岗岩。触发流体沸腾作用的过程, 主要为热流体内压剧增突破临界围压或断裂释压, 形成了减压沸腾, 进而触发形成了电气石岩浆隐爆角砾岩化相, 并富含熔体-子晶-气-液等矿物多相包裹体, 归纳为“富电气石型浆-气-液四相流体沸

腾→浆气液流体隐爆”构造岩相学模式。总之,硅化电气石热液隐爆角砾岩相+硫化物硅化电气石热液隐爆角砾岩相和电气石岩浆隐爆角砾岩相,它们分别位于岩浆气囊构造上部(富电气石气液隐爆角砾岩相)和下部(电气石岩浆隐爆角砾岩相)。从地球化学岩相学角度看,电气石的形成温度(350℃~380℃)位于成矿流体发生岩浆气液相变临界线和隐爆线附近(王雅丽和李磊,1999)。岩浆气囊超压热流体体系形成了Be-Li-Nb-Ta-Sn富集成矿,也为上部底拱式旋转褶皱群落(f4)+断裂-裂隙带+电气石脉带型锡银铅锌矿床(VTZ4)提供了深部成矿流体动力学支撑基础。在岩浆系统稳定供给成矿能量-物质作用下,瞬时岩浆隐爆体系形成的岩浆热液电气石角砾岩化体系是突破上覆封闭层形成的地层围压(成矿系统外压力)的关键因素,间歇性热启断裂系统和热启层间-切层裂隙系统是成矿流体和成矿能量的高效运输构造通道,以切层断裂带和层间断裂为主要构造样式(VTZ4),宽缓式底拱褶皱构成了成矿流体的圈闭构造,大气降水沿断裂带下渗并淋滤地层中的成矿物质与岩浆构造系统末端中晚岩浆侵入期形成的岩浆成矿热液混合,在似层状碎裂岩化相白云岩中(VTZ3)形成了白云岩型锡矿床(图4),似层状碎裂岩化相白云岩为同岩浆侵入期叠夹层间和切层断裂所形成,它们是成矿流体的圈闭构造相体。层间白云岩质碎裂岩+侧向层间岩溶构造带+切层断裂岩溶相带为锡铅层间氧化矿体储矿相体(VTZ2),上界面是丰水期的现今地下潜水面顶面,下界面是枯水期的现今地下潜水面地面,以垂向岩溶构造转变为侧向岩溶构造为主(后岩浆侵入期构造),地下水流程从垂向裂隙流转变为侧向管道流和非连通裂隙流为主。

2.6 矽卡岩化相-矽卡岩相带(VTZ7)与矽卡岩型锡铜多金属矿床

庄永秋等(1996)对晚白垩世同岩浆侵入期(黑云母花岗岩, γK_2a-b-c)的矽卡岩化相-矽卡岩相带和矽卡岩型锡铜多金属矿床研究较为深入,矽卡岩化相-矽卡岩相带(VTZ7)呈层状、似层状、不规则状和囊状等,从黑云母花岗岩边部向外分别发育了内矽卡岩相、正矽卡岩相和外矽卡岩相(变矽卡岩相)。在与碱性苦橄岩-碱玄岩-碱性玄武岩接触带,分别形成了阳起石金云母透闪石矽卡岩-阳起石金云母矽卡岩相(内矽卡岩相)、

萤石透闪石金云母矽卡岩相(正矽卡岩相)、阳起石金云母矽卡岩相(变矽卡岩相)。由碱性黑云母花岗岩侵入岩边部至外接触带,水平构造岩相学分带依次为:①黑云母花岗岩侵入体内岩凹构造处接触带+黄铜矿-锡石-菱铁矿铁碳酸盐化蚀变相带→②黑云母花岗岩侵入体(岩株、岩穹、岩枝、岩舌等)边缘和岩凸构造+电气石化-云英岩化蚀变相带(W-Sn-Bi-Mo-Nb-Ta-Be矿体储矿相体)→③黑云母花岗岩侵入体正接触带+钙质矽卡岩型和镁质矽卡岩型锡铜多金属矿体储矿相体(层状、似层状、不规则状)→④金云母式矽卡岩-透闪石金云母式矽卡岩(碱性苦橄岩和碱玄岩,层状锡铜钨铍钼多金属储矿相体)→⑤穿层锡石硫化物-电气石矽卡岩脉+锡石硫化物-长英质矽卡岩脉。在老厂矿田和卡房矿田内,个旧组碱性苦橄岩-碱玄岩中发生了锡铜钨铍钼富集成矿。但燕山期岩浆侵位过程对个旧组碳酸盐岩和碱性苦橄岩的同化混染作用,以及与锡铜钨钼三稀金属叠加成矿的关系,尚待进一步研究。

2.7 浅色花岗岩相(VTZ8)和岩浆热液成矿系统根部相(VTZ8)与蚀变花岗岩型锡矿床

浅色花岗岩相(VTZ8)以白云母花岗岩、二长斑岩、长英岩和长英岩化蚀变相、浅色花岗岩等高分异花岗岩为主组成。岩浆热液成矿系统根部相(VTZ8)产于浅色花岗岩相(VTZ8)内。在塘子凹深部,蚀变花岗岩型锡铜多金属矿床产于蚀变花岗岩体内10余米至600m,锡铜矿体呈脉状、细脉状、条带状、断裂交汇处呈透镜状产出,似层状平行排列;主要受近东西向断裂蚀变带控制,次为近南北向和北东向断裂蚀变带,在这些断裂蚀变带交汇处,锡铜矿体变宽变富。较小含矿脉厚度为厘米和毫米级,最大矿体厚度可达40余米,单个矿体厚度比较稳定,沿走向变化不大。主矿产为Sn-Cu-W,共伴生组分为Ag、Pb、Zn、Bi、Ge、In和Mo,As为有害杂质元素。矿体平均品位Sn为0.51%,Cu为1.79%。蚀变花岗岩型锡铜矿床具有很大的找矿潜力(徐云端和李玉新,1997;沈思联等,2016)。在围岩蚀变体系中,早期为钾硅酸盐化蚀变相,中期为富F-B酸性的锂云母-萤石-电气石蚀变相,晚期为碱性铁锰碳酸盐化蚀变相。构造岩相学分带特征如下。

(1)早期钾硅酸盐化蚀变相,呈面状分布在隐伏花岗岩顶部或带状沿热启断裂带向上延伸,

正长石、条纹长石、微斜长石与石英共生，沿断裂带上升演化为长英岩化蚀变脉，局部形成了长英岩化蚀变相。近期，矿山深部井巷工程揭露了长英质似伟晶岩壳和萤石长英质伟晶岩相；钾硅酸盐化蚀变相进一步向富水方向演化，形成了含锡石云英岩化蚀变相，具有钨锡铍-铌钽共同富集成矿趋势，它们均为战略关键矿产（萤石、钨铍铯等）勘查标志。晚期发育水解硅酸盐蚀变相，以高岭石-绢云母为主，晚期黏土化蚀变相沿断裂-裂隙面分布。

(2) 中期富 F-B 酸性蚀变相以萤石化、电气石化、锂云母、黄铁矿化和黄铜矿化为主，属主成矿阶段围岩蚀变类型。①在隐伏蚀变花岗岩内部，黑电气石呈细粒浸染状和细脉状，发育锂电气石化和锂云母化；黑电气石与黄铁矿和萤石共生，它们交代早期斜长石，具有偏还原态的富 F-B 酸性蚀变相，有利于锡铜钨富集成矿。②到隐伏蚀变花岗岩边部，发育米级大脉状和网脉状赤铁矿电气石脉，为高氧化态的富 F-B 酸性蚀变相，对于钨锡富集成矿较为有利。③早期萤石呈浅紫红色和浅蓝色，晚期萤石多为无色透明。萤石交代蚀变斜长石、黑云母和钾长石等，与热液石英和白云母共生。④黄铁矿-黄铜矿化多形成于偏还原态的富 F-B 酸性蚀变相（萤石化-电气石化-锂云母）内，黄铁矿具有多阶段形成特征，黄铜矿多交代黄铁矿。黄铁矿-黄铜矿化与萤石-电气石化多叠加在早期钾硅酸盐化蚀变相中，交代斜长石和黑云母，属于水解硅酸盐化蚀变过程。

(3) 晚期分别发育黏土化蚀变相和碱性铁锰碳酸盐化蚀变相。黏土化蚀变相的形成与二长斑岩、长石斑岩和早期云英岩化蚀变密切相关，以云母类和长石类矿物发生水解层状硅酸盐化蚀变为主导，它们与高分异花岗岩和浅色花岗岩密切相关。在晚期碱性铁锰碳酸盐化蚀变相内，铁白云石、铁锰方解石、方解石等碳酸盐矿物，与绿泥石、绿帘石、伊利石和高岭石等共生，出现在老厂矿田塘子凹、4033 突起和 1021 突起等花岗岩盆状凹陷与压扭性断裂复合部位。老厂矿田 14-5 号锡矿体赋存于老卡隐伏花岗岩体顶部 4033 突起盆状边缘蚀变花岗岩，花岗岩突起和盆状凹陷整体呈北东向分布，在 4033 花岗岩突起周边 3 个盆状凹陷中，分别赋存 3-1-1、14-5 和 5 号矿体。因碳酸盐岩捕虏体被花岗岩同化作用强烈，形成

了绢云母化蚀变花岗岩、菱铁矿化蚀变花岗岩、菱铁矿电气石热液角砾岩、含锡石菱铁矿绢英岩、含锡石绿帘石菱铁矿绢英岩等组成的新类型蚀变花岗岩和含锡石菱铁矿蚀变岩，矿物组合为锡石-菱铁矿-毒砂-黄铁矿。发育片理化相，指示其经历了较强烈的构造变形，石英和菱铁矿发育波状消光，绢云母定向排列。浅蓝色萤石和浅蓝色电气石发育。菱铁矿-铁白云石属典型偏还原态的碱性碳酸盐蚀变相标志产物，据邓贵安（1998）研究，与锡石共生的萤石均一温度 352 °C，锡石成矿温度在 300~352 °C；菱铁矿爆裂温度为 270 °C，发育富 CO₂-CO 型成矿流体，个旧地区花岗岩具有矿物包裹体沸腾作用和富 CO₂ 三相包裹体沸腾现象（庄永秋等，1996）。在今后成矿系统和深部找矿预测研究中，需要高度重视个旧花岗岩对个旧组碳酸盐岩和碱性火山岩、富铜基底构造层等三类不同围岩的同化混染作用和参与成矿作用解剖研究，尤其是个旧东区广泛发育铁锰碳酸盐岩蚀变相，形成了菱铁矿+菱锰矿→铁锰白云石→铁锰方解石→方解石等矿物地球化学岩相学分带，研究这些矿物地球化学岩相学，有助于圈定和区分岩浆-地层之间的岩浆成矿热液体系与地下水循环对流成矿热液体系的范围和界限。

3 表生岩溶构造系统与表生成矿

表生岩溶构造系统为后岩浆侵入期构造系统，由高原侵蚀面（VTZ1）和浅部新生代隐伏岩溶构造系统（VTZ2）组成，前者为个旧地区砂锡矿、砂铅矿和锰次生富集矿等锡-铅-锰表生成矿系列；后者为层间氧化矿组成的锡铅锌-铜-铀叠加成矿系列。它们在个旧地区均形成了与表生作用有关的独立成矿系统，同时，这些表生岩溶构造系统和表生成矿作用，继承并叠加在先存的燕山期岩浆热液成矿系统和印支期火山喷流沉积成矿系统之上，呈镶嵌叠加相体结构。

3.1 高原侵蚀面（VTZ1）

高原侵蚀面（VTZ1）由剥蚀台塬面、砖红壤岩溶风化壳和山顶剥蚀面等组成。主要表现为以下特征，①岩溶山顶剥蚀面（2000~2700 m）是第一剥蚀台塬面，发育残坡积砖红壤型岩溶风化壳。岩溶丛峰等正向地貌单元，与岩溶洞穴、岩溶悬崖等侧向和负向地貌单元呈镶嵌结构（图 6）。在



湾子街、黄茅山和老厂东地表岩溶地貌特征：a—湾子街砂锡矿采掘后的岩溶丛峰和洼地、含砂锡矿的砖红壤型岩溶风化壳剖面，镜向75°；b—含砂锡矿的砖红壤型岩溶风化壳剖面，镜向82°；c—湾子街砂锡矿下伏岩溶丛峰和岩溶沟槽，镜向340°；d—断控型岩溶漏斗和砂锡矿采区，镜向210°；e—黄茅山砂锡矿采区岩溶石牙和小丛峰，镜向245°；f—黄茅山岩溶洼地内褐锰土质砖红壤风化壳剖面（含砂锡矿），镜向80°；g—黄茅山含砂锡矿褐锰土质砖红壤风化壳剖面中的褐锰土残块和锰结核，镜向80°；h—黄茅山砂锡矿地表铁锰结核，镜向垂直于地面；i—老厂东镇源矿业区内的大岩溶漏斗+落水洞，镜向350°；j—老厂东镇源矿业区内的大岩溶漏斗内，受断裂交汇部位控制的断控型岩溶落水洞，镜向180°；k—老厂东镇源矿业区内的大岩溶漏斗底部渗水坑，镜向330°；l—老厂东镇源矿业区内大岩溶漏斗底部发育的条带状大理岩化碎裂岩相结晶灰岩（电气石热流柱构造顶部末端相），镜向垂直于地面

老厂砖红壤风化壳剖面结构：m—老厂东堆积型砖红壤风化壳剖面，垂高4 m，镜向45°；n—砖红壤岩溶风化壳剖面顶部，含铁锰结核砖红壤层，镜向350°；o—含铁锰结核的褐红壤层，镜向350°；p—豆状铁锰结核，镜向350°；q—含铁锰结核的黄红壤层，镜向350°；r—褐锰质土-黑褐色铁锰质土层，镜向330°；s—含铁锰结核的黄红壤层，镜向320°；t—古近系浅红黄色层纹条带状钙屑泥质粉砂岩，镜向70°

图6 个旧地区岩溶构造地貌与砖红壤岩溶风化壳

Fig. 6 Karstic tectonic geomorphology and laterite karst weathering crust in Gejiu

Pictures of karstic tectonic geomorphology from a to k are the units of the surface karstic landscapes in the Wanzijie, Huangmaoshan, and Laochangdong areas. Pictures from m to t are the section sequence of the laterite karst weathering crust in the Laochangdong area

岩溶洼地、落水洞等负向地貌单元内，第四系堆积物和异地堆积型砖红壤风化壳发育。②在高原岩

溶剥蚀面的斜坡面（1700~1900 m）发育了第二台原剥蚀面，因隐伏花岗岩为不透水层，也成为高原

岩溶区地下水排泄区。岩溶风化壳顶面发育砖红壤, 向下发育红壤层和黄壤层, 基岩面为碳酸盐岩。如: 在个旧市金湖和卡房镇, 海拔高度 1700~1900 m 之间发育小型山间盆地, 它们是沿个旧近南北向断裂带形成的山间断陷盆地和大型岩溶洼地, 发育第四系坡积-洪积砂泥质和砂砾质沉积物, 底部为砾石层, 以及新近系小龙潭组泥质粉砂岩、泥岩、泥灰岩和杂砾岩。③岩溶剥蚀面的斜坡面 (1700~1100 m) 属第三剥蚀台塬面, 发育岩溶丘峰、圆顶山、大型岩溶洼地、落水洞和暗河出水口, 属河流相透镜状沉积区。④在个旧东北侧的百色地区和南侧的红河地区, 还发育了两级剥蚀台塬面。总之, 在该砖红壤岩溶风化壳中, 中新统小龙潭组与第四系呈角度不整合关系, 揭示它们之间曾经历了构造抬升事件。高原侵蚀面 (VTZ1) 和第四纪表生岩溶构造系统形成于该期构造抬升事件之后。

3.2 高原侵蚀面与锡铅锌-锰表生成矿系列

个旧地区构造地貌属云贵高原深切的岩溶中山区, VTZ1 有利于表生岩溶作用、砂锡矿和砂铅矿的富集成矿等, 6 种砂锡矿与岩溶构造地貌关系如下: ①溶蚀洼地堆积型砂锡和砂铅矿床, 如湾子街 (图 6a—6c) 等; ②原地堆积和异地堆积的岩溶盲谷堆积型砂矿, 如晒鱼坝、白石岩冲、尹家洞、长冲、大冲、卡房田心等地砂矿; ③白泥塘、塘子凹、天生塘、喂牛塘等岩溶漏斗堆积型砂矿富集在岩溶漏斗中 (图 6d); ④溶蚀残余堆积型砂矿充填在缓坡地段溶沟溶槽中, 如牛屎坡砂矿和黄茅山砂矿 (图 6e) 等; ⑤溶洞堆积型砂矿富集在距原生矿脉较近的溶洞中, 如卡房大沟侵蚀阶地的溶洞内砂矿; ⑥岩溶暗河堆积型砂矿, 如卡房田心落水洞-浑水河、牛坝荒落水洞-水河等。高原侵蚀面 (VTZ1) 上部为砂锡矿体 (图 6f—6h) + 砖红壤岩溶风化壳 (图 6m—6t), 中部为正向和负向岩溶地貌和岩溶构造 (图 6a—6e), 下部为半风化层和碳酸盐岩层 (图 6i—6l), 具有“上酸性相 ($\text{pH}<5$)、中酸碱耦合相 ($\text{pH}=6.8\sim 7.5$)、下碱性相 ($\text{pH}>8.0$)” 的地球化学岩相学垂向剖面结构。砂锡矿富集在 2000~2500 m 岩溶侵蚀谷地和岩溶洼地等负向岩溶地貌单元, 在 1900~1800 m 高原剥蚀台塬面和山间盆地内形成冲积-坡积型砂锡矿; 在 2500 m 以上岩溶山顶侵蚀面未见工业化富集成矿。总之, 新生代岩溶构造

岩相带对原生成矿系统具有较好保存作用, 同时, 也形成了锡铅-锰-三稀金属成矿系统。

3.3 浅部新生代隐伏岩溶构造系统 (VTZ2)

浅部新生代隐伏岩溶构造系统 (VTZ2) 主要形成于古近纪和新近纪, 它们继承了晚白垩世同岩浆侵入期热液岩溶构造, 并遭受第四纪现代岩溶构造叠加改造作用。①在蒙自北部、木花果和大屯等地, 渐新-始新统木花果组下部砾岩→中部砂页岩→上部黏土岩, 向上变细层序说明蒙自-大屯山间盆地开始断陷成盆; 南侧个旧地区深部洞穴堆积溶积石灰质砾岩, 暗示在始新世隆升之前已经发育隐伏岩溶作用。②中新世在蒙自一开远形成了山间陆相湖盆。③个旧和卡房山间盆地于上新世开始成盆, 第四系更新统早期 (Q_1) 洞穴堆积物厚度在 0~10 m 不等, 在老厂和马拉格段矿田内岩溶洞穴中发育, 碳酸盐岩区内接受洞穴溶积灰岩质砾岩、溶积白云岩质砾岩和砂泥质黏土层等。中更新统牛屎坡层 (Q_2Pr) 残积堆积层在个旧地区普遍发育, 上部为棕黄色黏土层, 中部为黄色黏土层, 下部为棕灰色含铁锰结核黏土层夹褐灰色锰土层和灰白色高岭石层, 含褐铁矿和锰结核、大理岩碎块和溶蚀大理岩砾石。上更新统蒙自组 (Q_3Pm) 盆地沼泽相在蒙自盆地内发育, 沉积层序为底部砂砾和砾石层→中部黏土层夹沼铁矿→上部黑色黏土层。④全新统 (Q_4) 在个旧全区发育, 山顶剥蚀面发育砖红壤层和砖红壤风化壳, 山地和岩溶洼地等边坡发育异地堆积型砖红壤风化壳, 山麓和山坡为含砾黄土层和含砾黄红壤层, 河流沿岸发育泥砂质砾石层, 盆地区为含植物碎片软泥。

个旧地区浅部新生代隐伏岩溶构造系统 (VTZ2) 由隐伏岩溶剥蚀面、古岩溶剥蚀面、隐伏洞穴沉积岩和洞穴充填物、层间氧化矿等四部分组成, 在个旧地区 2500~1360 m 不同标高井巷工程和坑道内, 均可见到隐伏岩溶洞穴、岩溶空洞和岩溶裂隙, 发育暗河。现今坑道壁发育湿面、裂隙渗流、裂隙射流、管道流等, 以竣工钻孔的管道流最为强烈。隐伏岩溶剥蚀面, 以高原岩溶剥蚀斜坡面中第一剥蚀台塬面 (1700~1900 m) 和第二剥蚀台塬面 (1700~1100 m) 为两个隐伏岩溶剥蚀局部基准面。在个旧地区, 黑云母花岗岩、变碱性苦橄岩-变碱玄岩和砂卡岩等为不透水层, 隐伏黑云母花岗岩突起顶面主体在 2150~1650 m

标高,该标高范围是垂直地下水流动场转变为侧向地下水流动场的部位,也是隐伏垂直岩溶区转变为侧向岩溶区的变化部位,层间氧化矿储矿构造是垂向岩溶裂隙带发育区,个旧地区隐伏岩溶区主要受隐伏黑云母花岗岩顶面等高线和侧向地下水流动场、不纯灰岩、层间滑脱构造带、碎裂岩化相强度、褶皱和断裂等多种因素复合控制。褶皱核部叠加断裂带、不纯灰岩质碎裂岩和隐伏黑云母花岗岩突起,它们是白垩纪—新近纪形成的岩溶洞穴、岩溶空洞和岩溶裂隙带等岩溶构造系统的三种主控因素,也是形成铜、铅锌和锡层间氧化矿体的主控因素。

总体来说,目前对于个旧地区古岩溶剥蚀面的研究程度较低。已有资料揭示,个旧地区经历了多期次古岩溶作用相互叠加,具有多个古岩溶剥蚀面:①中三叠世古岩溶剥蚀面,具有多期次发育特征,在卡房段底部、马拉格段和白泥洞段均发育古岩溶剥蚀面,似层状溶塌白云质角砾岩和方解石溶孔状白云岩(图5g)等为主,中三叠世古岩溶剥蚀面对个旧组内原生锡铜硫化物矿床的形成十分有利,是成矿流体圈闭构造岩相层;②晚白垩世同岩浆侵入期热液岩溶侵蚀面,主要发育晚白垩世花岗岩侵入体顶部与周边、岩浆热流柱构造(图5a—5e)和切层断裂带中,花岗岩侵入体侵位前锋面方向,有利于热液岩溶作用和酸碱耦合反应结构面的形成,如在马拉格矿田内,北炮台斑状黑云母花岗岩岩株与马拉格式管柱状层间氧化锡多金属矿床;③古近纪岩溶剥蚀面,主要受古近纪构造抬升事件、断控型岩溶构造等控制;④新近纪岩溶剥蚀面,主要受新近纪构造抬升事件、断控型岩溶构造等控制,局部发育古潜水面波动形成的切层状断控型岩溶构造和近水平侧向岩溶构造带,它们对多层状锡氧化矿体具有显著的控制作用。

3.4 锡铅层间氧化矿的储矿构造样式与成因归属

层间氧化矿是个旧地区浅部新生代隐伏岩溶构造系统(VTZ2)主要物质组成之一,它们是来自锡铜多金属原生硫化物矿体的酸性地下水,与源自碳酸盐岩层的偏碱性地下水相互酸碱耦合作用的耦合空间。按照个旧地区层间氧化矿形态学和储矿构造样式,将层间氧化矿划分为如下类型。

(1) 马拉格式管柱状层间氧化锡多金属矿床,主要特征是:①赋存于个旧组马拉格段和白泥洞

段内,管柱状矿体横断面呈似等轴状,横面积在数十平方米至数百平方米,倾向延深在500~1500 m;②马拉格锡多金属矿床产于马松背斜北西倾伏端,受层间剥离构造带控制显著,管柱状矿体受断裂裂隙交汇处、裂隙与小褶曲交汇处、帚状构造旋涡等控制显著,与热液岩溶作用耦合显著;③北炮台花岗岩株长轴方向为NW287°,岩株自北西向南东方向侵位,成矿流体在岩株SE110°~215°扇形区域内聚集成矿,花岗岩接触带在深部也具有同样特征,与层间矿体对应(庄永秋等,1996);④以褐铁矿、赤铁矿和锡石为主,工业组分以锡为主,共伴生组分有钨、铅、锌、铜和铋;⑤自北炮台斑状黑云母花岗岩岩株到围岩约2000 m范围内,成矿分带为铜钨铋→铜锡→锡铅→铅锌锡。

(2) 芦塘坝式“缓层+陡断状”层间氧化矿床,主要特征是:①高松矿田位于马松斑状花岗岩侵入岩体和老卡等粒花岗岩侵入体之间的向斜构造(深凹陷部位),向斜构造内发育了多个岩脉和小岩株突起,由于向斜构造有利于汇聚型地下水流动场形成,深部花岗岩是底部不透水层,有利于原生锡石硫化物矿床发生氧化作用,形成较大规模的层间氧化矿体;②断裂构造组合有利于形成较大规模层间氧化矿体,北界近东西向的个松断裂带向南陡倾,倾角70°~89°,长度>10 km,宽5~30 m,倾斜延伸>800 m,在2095 m标高以上,蚀变矿化较强,赋存有切层的氧化矿体,具有多期次活动和成矿控岩作用,导致松树脚花岗岩突起急剧陡倾斜下陷;南界近东西向麒麟山断裂带,倾向北东,倾角70°~83°,也是芦塘坝矿段的南界线,长度>6 km,倾向延深>800 m,宽6~30 m,该断裂带明显错断北东向断裂带,但未见强烈蚀变矿化;两条相向断裂带成为汇聚型地下水流动场的有利构造通道,并发育断控型岩溶构造相带;③北东向芦塘坝成矿断裂带与伴生的次级北东向断裂-裂隙带是主要储矿构造样式,产状在325°~315°∠45°~88°,北东向断裂带长度>8000 m,倾向延深>800 m,断裂破碎带宽在5~60 m,发育压扭性结构面并具有多期次活动历史,上部发育白云石质碎裂岩、白云岩质碎斑岩和白云岩质碎粒岩,局部发育碳酸盐质糜棱岩和碳酸盐质构造角砾岩,深部片理化相、碎裂岩化相和糜棱岩化相较为发育,扭张性结构面和S-L构造透镜体发育,构造扩容空间成为原生锡石硫化物有利的储矿空

间;北东东向次级断裂-裂隙带与北东东向芦塘坝主断裂带呈“入”字形,形成了规模较大的构造扩容空间,常形成较大规模的分枝状矿体,如104、131和102号北东东向断裂-裂隙带与北东东向芦塘坝主断裂带交汇部位,赋存厚大矿体(庄永秋等,1996);④芦塘坝式“缓层+陡断状”层间氧化矿床,由陡倾斜脉状和缓倾斜似层状两类不同产状的矿体组成,陡倾斜脉状矿体主要赋存在北东东向芦塘坝主断裂带和派生的次级断裂-裂隙带中,缓倾斜似层状矿体主要赋存在北东东向芦塘坝主断裂带上盘卡房段 $T_2g_1^{\circ}$ 中,受层间剥离构造带控制,矿体与地层产状一致,多层性显著,最多矿层可达9层,矿体长度可达千余米,宽度在100~200 m,锡品位在1%以上,伴生银、铜、铅、锌等组分,近围岩蚀变有褐铁矿化、铁锰碳酸盐化、大理岩化和石膏化;⑤在垂直切层断控型岩溶相带和缓倾斜侧向岩溶相带内,地下水为裂隙-管道流,似层状侧向岩溶相带内的层间氧化矿体顶面与丰水期地下水流场的高水位面相近,而层间氧化矿体的底面与枯水期地下水流场的高水位面相近,因此,层间氧化矿体具有多层状特征;⑥层间氧化矿体附近岩溶构造较为发育,主要为氧化矿体附近发育酸性地下水岩溶作用,导致岩溶构造强度明显高于围岩地层中的岩溶构造发育强度,层间氧化矿体上盘围岩中的岩溶洞穴和空洞较为发育,下盘围岩中发育次生石膏相。

(3)花岗岩岩凹式“大囊状+透镜状+凹兜状”层间氧化矿体。成矿规律特征是:①层间氧化矿体形成于花岗岩岩凹式或凹槽式控制的富水构造带内;②具有“上部层间氧化矿、下部矽卡岩型锡铜硫化矿”垂向分带结构,层间氧化矿是富水构造区内原生硫化矿氧化之后形成的;③花岗岩岩凹式或凹槽式规模较大,对于层间氧化矿的富集成矿更为有利;④在花岗岩侵入体附近,发育连通性岩溶管道和岩溶裂隙带,这些岩溶构造中被泥沙充填或发育裂隙-管道流,暗示经表生岩溶风化作用后,它们是锡石等成矿运移汇聚的岩溶构造通道;⑤花岗岩凹兜状构造面具有富水构造区特征,有利于形成层间氧化矿体,如老厂矿田内3-9号矿体呈凹兜状,受1021花岗岩突起(图4)形成的半封闭槽状凹兜部位控制,矿体走向NE30°,倾向北西,倾角30°~55°,矿体轴向长度约为160 m,宽约40 m,厚约20~45 m;在老厂

矿田1990 m中段,矿体赋存在蚀变黑云母花岗岩中;1990 m中段在9'勘探线,褐色和褐红色土状-粒状赤褐铁矿型氧化矿体赋存在蚀变黑云母花岗岩与碳酸盐岩接触带上,锡品位为0.793%,铜品位0.851%,以赤铁矿、褐铁矿和锡石为主,脉石矿物有萤石、石榴子石、透辉石等;下部为矽卡岩型和磁黄铁矿矽卡岩型锡铜硫化矿体,以黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂和锡石为主,脉石矿物有石榴子石、透辉石、萤石及绿泥石。

(4)断控型岩溶构造中“裂隙带型”层间氧化矿床,受穿层的断控型岩溶构造岩相带控制,形成于断裂-裂隙交汇带、背斜倾伏端与断裂带叠加部位,深部发育隐伏花岗岩突起,如梅雨冲矿段。

(5)“似层状型”层间氧化矿床受层间剥离构造和侧向岩溶构造岩相复合控制,在层间氧化矿体顶面发育岩溶空洞-洞穴,酸性地下水岩溶作用发育,它们与丰水期潜水顶面有密切关系。在层间氧化矿体底界面发育了次生石膏相,与枯水期地下水潜水底界面有密切关系,因来自碳酸盐岩层内的偏碱性地下水中富 Ca^{2+} ,与来自酸性地下水中的 SO_4^{2-} 相结合,形成了底界面次生石膏相。从新生代隐伏岩溶构造系统(VTZ2)与层间氧化矿的储矿构造样式看,它们继承了印支期火山热水喷流沉积成矿作用和晚白垩世岩浆热液成矿系统,在个旧地区发育锡-铅-锌-铜-铀表生叠加成矿系列。

4 结论

(1)从地表向深部,个旧锡铜钨钴铀多金属矿集区内9个垂向构造岩相学分带是:①云贵高原侵蚀面(VTZ1)→②表生岩溶构造系统(VTZ2)→③似层状碎裂岩化相含锡石碎裂岩化白云岩-碎裂岩化碳酸盐岩相带(VTZ3)→④中三叠统个旧组断褶式碳酸盐岩层(VTZ4)+底拱式旋转褶皱群落(f4)→⑤碎裂岩化大理岩化相-电气石碎裂岩化大理岩相带(VTZ5)→⑥电气石隐爆热液角砾岩相带(VTZ6)→⑦矽卡岩化相-矽卡岩相带(VTZ7)→⑧浅色花岗岩相(VTZ8)→⑨萤石长英质伟晶岩壳相和巨斑状花岗岩(岩浆气成热液结晶核相,VTZ9,另文详述)。

(2)云贵高原侵蚀面(VTZ1)和表生岩溶构

造系统 (VTZ2) 控制了残坡积型砂锡矿床和层间锡氧化矿床。表生岩溶构造系统 (VTZ2) 沿断控型岩溶构造穿切进入深部矽卡岩化相-矽卡岩相带 (VTZ7), VTZ2 与其他岩相带 (VTZ3、VTZ4、VTZ5、VTZ6、VTZ7、VTZ8 和 VTZ9) 具有异时同位镶嵌结构。

(3) 似层状碎裂岩化相含锡石碎裂岩化白云岩-碎裂岩化碳酸盐岩相带 (VTZ3) 属岩浆侵入构造系统顶端相, 为岩浆热流柱构造穹顶的层间滑动构造岩相带。富含残浆高温气液体系发生了岩浆-气液隐爆角砾岩化, 形成了岩浆热流柱构造和电气石热液隐爆角砾岩相带 (VTZ6)。同岩浆侵入期的构造-流体耦合作用在上覆个旧组内, 形成了断褶式碳酸盐岩层 (VTZ4) 和电气石碎裂岩化大理岩相带 (VTZ5)。矽卡岩化相-矽卡岩相带 (VTZ7) 是同岩浆侵入期地层-岩浆系统耦合反应的构造岩相带。浅色花岗岩相 (VTZ8) 和岩浆气成热液结晶核相 (VTZ9) 是黑云母花岗岩 (γK_2a-b-c) 同岩浆侵入期构造岩相带 (根部相)。三叠纪碱性苦橄岩-碱性火山岩相带和火山喷发机构, 是前岩浆侵入期构造。云贵高原侵蚀面 (VTZ1) 和表生岩溶构造系统 (VTZ2) 是后岩浆侵入构造系统。今后需加强研究个旧组碱性苦橄岩、富铜基底构造层等因岩浆同化混染作用导致其参与燕山期岩浆侵位过程、战略关键金属富集成矿、矿床保存和表生成矿作用等。

References

- CHANG X Y, ZHU B Q, ZOU R, et al., 1998. Geochemical studies on sodium enriched volcanic rocks in the area of Longbohe copper deposit, Yunnan province, SW China: II. Chronology and characteristics of Nd-Sr-Pb isotope [J]. *Geochimica*, 27 (4): 361-366. (in Chinese with English abstract)
- CHI J C. 1988. The Cenozoic basalt and the upper mantle in eastern China [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press (Wuhan).
- CHENG Y B, MAO J W, XIE G Q, et al., 2008. Petrogenesis of the Laochang-Kafang granite in the Gejiu Area, Yunnan province: constraints from geochemistry and Zircon U-Pb dating [J]. *Acta Geologica Sinica*, 81 (11): 1478-1493. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Y B, MAO J W, 2010. Age and geochemistry of granites in Gejiu area, Yunnan province, SW China: constraints on their petrogenesis and tectonic setting [J]. *Lithos*, 120 (3-4): 258-276.
- DENG G A, 1998. The geological and geochemical features of granite rupture zone type tin deposit in Laochang, Gejiu: A new type of tin deposit [J]. *Mineral Resources and Geology*, 12 (4): 230-236. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, HU R Z, XIE G Q, et al., 2002. Tectonolithostratigraphic units of the Ailaoshan area in Yunnan, China and their implications of tectonic evolution [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 26 (1): 28-36. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, JIA R X, 2011. Characteristics of the alkaline picritic volcanic rocks in the Gejiu superlarge tin-copper deposit and their continental dynamic implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35 (1): 137-148. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, ZHANG H, JIA R X, 2011. Dynamics of triassic back-arc rift basin and its metallogenic sequence in Gejiu of Yunnan province to napo of Guangxi Zhuang autonomous region, China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 35 (4): 552-566. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, YANG X Y, GUO M H, et al., 2013. Relationships between alkaline Ti-Fe-rich gabbros and iron-oxide copper-gold deposits in the Baixila ore district, Yunnan [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37 (2): 242-261. (in Chinese with English abstract)
- FANG W X, DU Y L, LI J X, et al., 2018. Technology of tectonic lithofacies mapping at large-scale and ore predication [M]. Beijing: Geology Press: 1-377. (in Chinese)
- FENG J R, MAO J W, PEI R F, et al., 2010. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Laojunshan granite intrusion from the Wazha tungsten deposit, Yunnan Province and their implications for petrogenesis [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (3): 845-857. (in Chinese with English abstract)
- FENG J R, MAO J W, PEI R F, 2013. Ages and geochemistry of Laojunshan granites in southeastern Yunnan, China; Implications for W-Sn polymetallic ore deposits [J]. *Mineralogy and Petrology*, 107 (4): 573-589.
- FRANKLIN J M, GIBSON H L, JONASSON I R, et al., 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits [M] // HEDENQUIST J W, THOMPSON J F H, GOLDFARB R J, et al., One hundredth anniversary volume. Littleton, Colorado, USA: Society of Economic Geologists: 523-560.
- GALLY A G, HANNINGTON M D, JONASSON I R, 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits [M] // GOODFELLOW W D. Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit-types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication: 141-161.
- GAO J, CUI Y L, 2004. Ore-forming condition, ore prospecting indicator research at copper mine of east belt Longbohe copper mine in Yunnan [J]. *Geology and Prospecting*, 40 (5): 33-38. (in Chinese with English abstract)
- GROVES D I, BIERLEIN F P, 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems [J]. *Journal of the Geological Society*, 164 (1): 19-30.
- GUO J, ZHANG R Q, LI C Y, et al., 2018. Genesis of the Gaosong Sn-Cu deposit, Gejiu district, SW China: constraints from in situ LA-ICP-MS cassiterite U-Pb dating and trace element fingerprinting

- [J]. *Ore Geology Reviews*, 92: 627-642.
- GUO J, 2020. Study to determine objective geological body and its ore-prospecting practice [R]. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau. (in Chinese)
- HEI H X, LUO Z H, VIKENTYEV I V, et al., 2015. Transmagmatic fluid theory and orefield structure [J]. *Journal of Geomechanics*, 21 (1): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- HOU Z Q, YANG Z M, 2009. Porphyry deposits in continental settings of China: Geological characteristics, magmatic-hydrothermal system, and metallogenic model [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83 (12): 1779-1817. (in Chinese with English abstract)
- HU R Z, MAO J W, FAN W M, et al., 2010. Some scientific questions on the intra-continental metallogeny in the South China continent [J]. *Earth Science Frontiers*, 17 (2): 13-26. (in Chinese with English abstract)
- HUDGINS T R, MUKASA S B, SIMON A C, et al., 2015. Melt inclusion evidence for CO₂-rich melts beneath the western branch of the East African Rift: Implications for long-term storage of volatiles in the deep lithospheric mantle [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 169 (5): 46.
- JIANG Z W, OLIVER N H S, BARR T D, et al., 1997. Numerical modeling of fault-controlled fluid flow in the genesis of tin deposits of the Malage ore field, Gejiu mining district, China [J]. *Economic Geology*, 92 (2): 228-247.
- LARGE R R, 1992. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Features, styles, and genetic models [J]. *Economic Geology*, 87 (3): 471-510.
- LEPVRIER C, MALUSKI H, VAN TICH V, et al., 2004. The early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son belt and Kontum massif); Implications for the geodynamic evolution of Indochina [J]. *Tectonophysics*, 393 (1-4): 87-118.
- LA MAITRE R W, BATEMAN P, DUDEK A, et al., 1989. A classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks [M]. Oxford: Blackwell Scientific.
- LI Y S, QIN D X, DANG Y T, et al., 2006. Mineralizations in basalts of the Gejiu tin deposit in Yunnan Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36 (3): 326-335. (in Chinese with English abstract)
- LI Z L, LIU X J, XIAO W J, et al., 2019. Geochronology, geochemistry and Hf isotopes of volcanic rocks in Pingxiang area, southwest Guangxi; Implications for the latest stage of Paleo-Tethyan Ocean northward subduction [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (5): 932-946. (in Chinese with English abstract)
- LIU D M, GUO H J, ZHANG G Y, et al., 2019. Petrogenesis and tectonic setting of high-Mg volcanic rock xenoliths in Jianshui area, southeast Yunnan, China [J]. *Earth Science*, 44 (5): 1749-1760. (in Chinese with English abstract)
- LIU H C, LIU X P, ZHANG Y W, et al., 2020. Beginning of the Indosinian orogeny: Insights from late Permian gabbro and diorite in the Diancangshan area of the Yunnan province [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44 (3): 527-542. (in Chinese with English abstract)
- LIU J, ZHOU Y, GUO H J, et al., 2016. Geological characteristics and the tectonic significance of ultrabasic rock of Nali river in Jianshui, Yunnan Province [J]. *Guizhou Geology*, 33 (3): 178-186. (in Chinese with English abstract)
- LUO Z H, LU X X, LIU C, et al., 2011. On failing of the magmatic hydrothermal metallogenic theory: the causes and the new departure [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41 (1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- LUO Z H, SU S G, LIU C, 2014. Scale effects of the magma-related metallogenic systems [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 36 (1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- MÜLLER D, GROVES D I, 2019. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization [M]. 5th ed. Berlin: Springer: 1-125.
- MAO J W, CHENG Y B, GUO C L, et al., 2008. Gejiu tin polymetallic ore-field: deposit model and discussion for several points concerned [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 (11): 1455-1467. (in Chinese with English abstract)
- MAO J W, ZHOU Z H, FENG C Y, et al., 2012. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting [J]. *Geology in China*, 39 (6): 1437-1471. (in Chinese with English abstract)
- PI Q H, HU R Z, PENG K Q, et al., 2016. Geochronology of the Zhesang gold deposit and mafic rock in Funing County of Yunnan province, with special reference to the dynamic background of Carlin-type gold deposits in the Dian-Qian-Gui region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (11): 3331-3342.
- QIAN Z K, LUO T Y, HUANG Z L, et al., 2011. Geology, geochemistry and genesis of Xinshan stratiform diopside rocks in Gejiu, Yunnan [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31 (3): 338-352. (in Chinese with English abstract)
- QIN D X, LI Y S, TAN S C, et al., 2006. Metallogenic ages of Gejiu tin ore deposit in Yunnan province [J]. *Chinese Journal of Geology*, 41 (1): 122-132. (in Chinese with English abstract)
- SHANG Z, CHEN Y Q, TONG X, et al., 2021. Geochronology, geochemistry and lithosphere extension of Kafang diabase in Gejiu area, Yunnan province [J/OL]. *Geology in China*, (2020-12-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.20201207.1620.004.html>.
- SHEN S L, LI J P, YANG B F, 2016. Geological and geochemical features and its exploration of altered granite type Sn-Cu polymetallic deposits in eastern part of Gejiu, Yunnan, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 36 (4): 471-478. (in Chinese with English abstract)
- TAN H Q, LIU Y P, 2017. Genesis of amphibolite in Mengdong Group-Complex in southeastern Yunnan and its tectonic significance [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47 (6): 1763-1783. (in Chinese with English abstract)
- WANG C Y, ZHOU M F, QI L, 2007. Permian flood basalts and mafic intrusions in the Jinping (SW China) -Song Da (northern Vietnam) district; Mantle sources, crustal contamination and sulfide segregation [J]. *Chemical Geology*, 243 (3-4): 317-343.
- WANG Y L, LI L, 1999. A study on the inclusion geochemistry of Laochang fine vein Sn deposit in Gejiu [J]. *Yunnan Geology*, 18

- (1): 37-47. (in Chinese with English abstract)
- WEI C W, PI Q H, HU R Z, et al., 2018. Geochemical characteristics of two stages of basic dykes and gold mineralization at Funing, Yunnan Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 38 (5): 499-513.
- XIAO L, XU Y G, MEI H J, et al., 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plum-lithosphere interaction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 228 (3-4): 525-546.
- XU J, XIA X P, LAI C K, et al., 2019. First identification of late Permian Nb-enriched basalts in Ailaoshan region (SW Yunnan, China): Contribution from Emeishan plume to subduction of eastern paleotethys [J]. *Geophysical Research Letters*, 46 (5): 2511-2523.
- XU W T, LIU F L, JI L, et al., 2020. Geochemistry, geochronology and geological implication of amphibolites in Ailao Shan-Day Nui Con Voi metamorphic complex belt, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (12): 3607-3630.
- XU Y G, CHUNG S L, JAHN B M, et al., 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in Southwestern China [J]. *Lithos*, 58 (3-4): 145-168.
- XU Y R, LI Y X, 1997. A tin shoot-granitic type tin orebody discovered in the Gejiu mining area [J]. *Mineral Resources and Geology*, 11 (2): 99-102. (in Chinese with English abstract)
- XU Z Q, WANG Q, LI Z H, 2016. Indo-Asian collision: tectonic transition from compression to strike slip [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90 (1): 1-23. (in Chinese with English abstract)
- YANG Z X, MAO J W, CHEN M H, et al., 2009. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of muscovite from Laochang veinlet-like Sn deposit in Gejiu tin polymetallic ore district and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 28 (3): 336-344. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI Y S, 2007. Earth system, metallogenic system to exploration system [J]. *Earth Science Frontiers*, 14 (1): 172-181.
- ZHAI Y S, WANG J P, PENG R M, et al., 2009. Research on superimposed metallogenic systems and polygenetic mineral deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 16 (6): 282-290. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B L, LV G X, SU J, et al., 2015. A study of the tectono-lithofacies mineralization regularities of the Gejiu tin-polymetallic orefield, Yunnan, and prospecting in its western part [J]. *Earth Science Frontiers*, 22 (4): 78-87. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G S, FANG W X, PENG R, et al., 2019. Zircon U-Pb chronology, origin and tectonic significance of the Triassic high potassic volcanic rock from Gejiu, Yunnan, Southwestern China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 43 (6): 1219-1235. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G W, GUO A L, WANG Y J, et al., 2013. Tectonics of South China continent and its implications [J]. *Science China Earth Sciences*, 56 (11): 1804-1828.
- ZHANG H, TONG X, WU J D, et al., 2007. Gejiu tin-polymetallic ore deposit: an example of landing of Red Sea-type submarine hydrothermal deposition [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27 (3-4): 335-341. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J, MAO J W, CHENG Y B, et al., 2012. ^{40}Ar - ^{39}Ar phlogopite dating of stratified ore body and muscovite dating of greisens from Xinshan granite intrusion of Kafang tin-copper deposit in Gejiu area, Yunnan province [J]. *Mineral Deposits*, 31 (6): 1149-1162. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J W, DAI C G, HUANG Z L, et al., 2015. Age and petrogenesis of Anisian magnesian alkali basalts and their genetic association with the Kafang stratiform Cu deposit in the Gejiu supergiant tin-polymetallic district, SW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 69: 403-416.
- ZHANG L C, DONG Z G, CHEN B, et al., 2021. Ore-forming system and regularity of important metallogenetic belts in east Tianshan, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43 (1): 12-35. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Q, 2012. Comment on the popular magmatic hydrothermal mineralization theory [J]. *Gansu Geology*, 21 (4): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Q, JIN W J, Li C D et al., 2014. Magma-thermal field: Its basic characteristics, and differences with geothermal field [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (2): 341-349. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y H, ZHOU J X, TAN S C, et al., 2020. Genesis of the oxidized Sn ores in the Gejiu district, Yunnan province, SW China [J]. *Ore Geology Reviews*, 121: 103474, doi: 10.1016/j.oregeorev. 2020.103474.
- ZHOU M F, MALPAS J, SONG X Y, et al., 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196 (3-4): 113-122.
- ZHUANG Y Q, WANG R Z, YANG S P, et al., 1996. Geology of the Gejiu tin-copper polymetallic deposit [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 常向阳, 朱炳泉, 邹日, 等, 1998. 金平龙脖河铜矿区变钠质火山岩系地球化学研究: II. Nd、Sr、Pb 同位素特征与年代学 [J]. *地球化学*, 27 (4): 361-366.
- 池际尚, 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 程彦博, 毛景文, 谢桂青, 等, 2008. 云南个旧老厂-卡房花岗岩体成因初探: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学约束 [J]. *地质学报*, 81 (11): 1478-1493.
- 邓贵安, 1998. 老厂花岗岩破碎带型锡矿床地质地球化学特征 [J]. *矿产与地质*, 12 (4): 230-236.
- 方维萱, 胡瑞忠, 谢桂青, 等, 2002. 云南哀牢山地区构造岩石地层单元及其构造演化 [J]. *大地构造与成矿学*, 26 (1): 28-36.
- 方维萱, 贾润幸, 2011. 云南个旧超大型锡铜矿区变碱性苦橄岩类特征与大陆动力学 [J]. *大地构造与成矿学*, 35 (1): 137-148.
- 方维萱, 张海, 贾润幸, 2011. 滇桂个旧-那坡三叠纪弧后裂谷盆地动力学与成矿序列 [J]. *大地构造与成矿学*, 35 (4): 552-566.
- 方维萱, 杨新雨, 郭茂华, 等, 2013. 云南白锡腊碱性钛铁质辉长岩

- 类与铁氧化物铜金型矿床关系研究 [J]. 大地构造与成矿学, 37 (2): 242-261.
- 方维萱, 杜玉龙, 李建旭, 等, 2018. 大比例尺构造岩相学填图技术与找矿预测 [M]. 北京: 地质出版社: 1-377.
- 冯佳睿, 毛景文, 裴荣富, 等, 2010. 云南瓦渣钨矿区老君山花岗岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因探讨 [J]. 岩石学报, 26 (3): 845-857.
- 高俊, 崔银亮, 2004. 云南龙脖河铜矿区东矿带成矿条件、控矿规律研究 [J]. 地质与勘探, 40 (5): 33-38.
- 郭健, 2020. 目标地质体的研究确定与找矿实践 [R]. 中国冶金地质总局矿产地质研究院.
- 黑慧欣, 罗照华, VIKENTYEV I V, 等, 2015. 透岩浆流体作用与矿田构造 [J]. 地质力学学报, 21 (1): 1-12.
- 侯增谦, 杨志明, 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型 [J]. 地质学报, 83 (12): 1779-1817.
- 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗, 等, 2010. 华南陆块陆内成矿作用的一些科学问题 [J]. 地学前缘, 17 (2): 13-26.
- 黎应书, 秦德先, 党玉涛, 等, 2006. 云南个旧锡矿的玄武岩成矿 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 36 (3): 326-335.
- 李政林, 刘希军, 肖文交, 等, 2019. 桂西南凭祥火山岩年代学、地球化学及 Hf 同位素研究: 对古特提斯洋最晚北向俯冲事件的启示 [J]. 地质力学学报, 25 (5): 932-946.
- 刘德民, 郭宏杰, 张根袁, 等, 2019. 滇东南建水地区高镁火山岩包体的成因和构造背景 [J]. 地球科学, 44 (5): 1749-1760.
- 刘汇川, 刘小平, 张永旺, 等, 2020. 印支运动启动的时间: 来自云南点苍山晚二叠世辉长岩和闪长岩的证据 [J]. 大地构造与成矿学, 44 (3): 527-542.
- 刘娇, 周洋, 郭宏杰, 等, 2016. 云南建水腊里河超基性岩地质特征及其构造意义 [J]. 贵州地质, 33 (3): 178-186.
- 罗照华, 卢欣祥, 刘翠, 等, 2011. 岩浆热液成矿理论的失败: 原因和出路 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 41 (1): 1-11.
- 罗照华, 苏尚国, 刘翠, 2014. 岩浆成矿系统的尺度效应 [J]. 地球科学与环境学报, 36 (1): 1-9.
- 毛景文, 程彦博, 郭春丽, 等, 2008. 云南个旧锡矿田: 矿床模型及若干问题讨论 [J]. 地质学报, 82 (11): 1455-1467.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 等, 2012. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景 [J]. 中国地质, 39 (6): 1437-1471.
- 皮桥辉, 胡瑞忠, 彭科强, 等, 2016. 云南富宁者桑金矿床与基性岩年代测定: 兼论滇黔桂地区卡林型金矿成矿构造背景 [J]. 岩石学报, 32 (11): 3331-3342.
- 钱志宽, 罗泰义, 黄智龙, 等, 2011. 云南个旧新山层状透辉石岩地质地球化学特征与成因探讨 [J]. 矿物学报, 31 (3): 338-352.
- 秦德先, 黎应书, 谈树成, 等, 2006. 云南个旧锡矿的成矿时代 [J]. 地质科学, 41 (1): 122-132.
- 尚志, 陈永清, 童祥, 等, 2021. 云南个旧卡房辉绿岩墙锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其岩石圈伸展作用 [J/OL]. 中国地质, (2020-12-09). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20201207.1620.004.html>.
- 沈思联, 李建平, 杨宝富, 2016. 个旧东区蚀变花岗岩型锡-铜多金属矿床地质地球化学特征与勘探 [J]. 矿物学报, 36 (4): 471-478.
- 谭洪旗, 刘玉平, 2017. 滇东南猛洞岩群斜长角闪岩成因及其构造意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 47 (6): 1763-1783.
- 王雅丽, 李磊, 1999. 个旧老厂细脉型锡矿床包裹体地球化学特征研究 [J]. 云南地质, 18 (1): 37-47.
- 韦朝文, 皮桥辉, 胡瑞忠, 等, 2018. 云南富宁两期基性岩地球化学性质与金矿成矿 [J]. 矿物学报, 38 (5): 499-513.
- 徐文涛, 刘福来, 冀磊, 等, 2020. 哀牢山-大象山变质杂岩带中斜长角闪岩的地球化学、同位素年代学及其地质意义 [J]. 岩石学报, 36 (12): 3607-3630.
- 徐云端, 李玉新, 1997. 个旧地区发现一种富锡矿类型: 花岗岩锡矿体 [J]. 矿产与地质, 11 (2): 99-102.
- 许志琴, 王勤, 李忠海, 等, 2016. 印度-亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换 [J]. 地质学报, 90 (1): 1-23.
- 杨宗喜, 毛景文, 陈懋弘, 等, 2009. 云南个旧老厂细脉带型锡矿白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 28 (3): 336-344.
- 翟裕生, 2007. 地球系统、成矿系统到勘查系统 [J]. 地学前缘, 14 (1): 172-181.
- 翟裕生, 王建平, 彭润民, 等, 2009. 叠加成矿系统与多成因矿床研究 [J]. 地学前缘, 16 (6): 282-290.
- 张宝林, 吕古贤, 苏捷, 等, 2015. 云南个旧锡多金属矿田构造岩成矿规律与西区找矿研究 [J]. 地学前缘, 22 (4): 78-87.
- 张贵山, 方维萱, 彭仁, 等, 2019. 云南个旧三叠纪高钾质火山岩锆石 U-Pb 年代学、岩石成因及构造意义 [J]. 大地构造与成矿学, 43 (6): 1219-1235.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等, 2013. 中国华南大陆构造与问题 [J]. 中国科学: 地球科学, 43 (10): 1553-1582.
- 张欢, 童祥, 武俊德, 等, 2007. 个旧锡矿: 红海型热水沉积登陆的实例 [J]. 矿物学报, 27 (3-4): 335-341.
- 张娟, 毛景文, 程彦博, 等, 2012. 个旧卡房层状铜矿床金云母和云英岩化白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 同位素年龄及意义 [J]. 矿床地质, 31 (6): 1149-1162.
- 张连昌, 董志国, 陈博, 等, 2021. 东天山重要成矿区带、成矿系统与成矿规律 [J]. 地球科学与环境学报, 43 (1): 12-35.
- 张旗, 2012. 评流行的岩浆热液成矿理论 [J]. 甘肃地质, 21 (4): 1-14.
- 张旗, 金惟俊, 李承东, 等, 2014. 岩浆热场: 它的基本特征及其与地热场的区别 [J]. 岩石学报, 30 (2): 341-349.
- 庄永秋, 王任重, 杨树培, 等, 1996. 云南个旧锡铜多金属矿床 [M]. 北京: 地震出版社.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

