

南岭区域成矿与深部探测的研究进展及其对 西藏钨锡找矿的指示

李建康¹⁾, 王登红^{1)*}, 梁婷²⁾, 许以明³⁾, 张怡军³⁾, 梁华英⁴⁾, 卢焕章⁴⁾,
赵斌⁵⁾, 李建国⁵⁾, 屈文俊⁶⁾, 周四春⁷⁾, 王汝成⁸⁾, 韦龙明⁹⁾, 林锦福⁹⁾

- 1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
- 2) 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054;
- 3) 湖南省湘南地质勘察院, 湖南郴州 423000;
- 4) 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640;
- 5) 山西省地球物理化学勘查院, 山西运城 044004;
- 6) 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037;
- 7) 成都理工大学, 四川成都 610059;
- 8) 南京大学, 江苏南京 210093;
- 9) 桂林理工大学, 广西桂林 541004

摘要: 本文通过对桂西北矿集区、湘南矿集区和赣南粤北矿集区的地质学、地球化学、矿床学等方面的研究, 扼要对比了南岭西段、中段和东段的地壳演化历史和区域成矿特点, 发现在矿集区尺度上, 南岭成矿带西段表现为燕山晚期的爆发式成矿作用; 南岭成矿带中段表现为伴随多期岩浆活动而发生多期次成矿, 形成多金属矿床; 东段虽然也发生多期次的岩浆活动, 但成矿作用以燕山期早期第一阶段为高峰; 南岭西段也具有发现东段式钨矿的潜力。在不同矿集区深部找矿方向上, 南岭西段的少花岗岩地区应重点探测与深部隐伏花岗岩体有关的成矿作用, 高温高压成矿实验也表明溶洞式矿体也应列为找矿重点; 南岭中段应根据不同的成矿环境探测深部矿体, 如黄沙坪矿床深部存在“柿竹园式”矿床; 南岭东段, 应该在“五层楼”下部寻找“地下室”矿体。在物质来源方面, 在湘南骑田岭矿集区的探测技术试验结果表明, 骑田岭岩体深部存在地幔物质上涌的通道, 岩体中心相的细粒黑云母花岗岩较外围的粗粒黑云母花岗岩混入了较多的幔源物质, 白蜡水矿区的富锡流纹质次火山岩脉, 也暗示深部存在一期更晚的、含幔源物质更多的岩浆活动, 与锡矿成矿物质多来源于地幔的认识一致。根据以上认识, 并综合对比南岭与西藏成矿的异同, 本文认为在西藏地区, 宜在低剥蚀地区的中低温热液矿床的深部探测钨锡矿床, 在发育老地层的高剥蚀地区寻找中高温热液型钨锡矿床。

关键词: 南岭成矿带; 成矿规律; 深部探测; 地球物理; 西藏

中图分类号: P617; P624 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.01.06

Progress of Research on Metallogenic Regularity and Deep Exploration in Nanling Region and Its Indication for W-Sn Exploration in Tibet

LI Jian-kang¹⁾, WANG Deng-hong^{1)*}, LIANG Ting²⁾, XU Yi-ming³⁾, ZHANG Yi-jun³⁾, LIANG Hua-ying⁴⁾,

本文由国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号: SinoProbe-03-01; SinoProbe-03-03)和中国地质大调查项目(编号: 1212011120989; 1212010633903)联合资助。

收稿日期: 2012-06-20; 改回日期: 2012-07-11。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 李建康, 男, 1976 生。副研究员。主要从事矿床学研究。E-mail: Li9968@126.com。

*通讯作者: 王登红, 男, 1967 年生。研究员, 博士生导师。主要从事矿产资源研究。E-mail: wangdenghong@sina.com。

LU Huan-zhang⁴⁾, ZHAO Bin⁵⁾, LI Jian-guo⁵⁾, QU Wen-jun⁶⁾, ZHOU Si-chun⁷⁾, WANG Ru-cheng⁸⁾, WEI Long-ming⁹⁾, LIN Jin-fu⁹⁾

1) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

2) *College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054;*

3) *Southern Hunan Institute of Geology and Survey, Chenzhou, Hunan 423000;*

4) *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640;*

5) *Shanxi Institute of Geophysical and Geochemical Survey, Yuncheng, Shanxi 044004;*

6) *National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;*

7) *Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;*

8) *Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093;*

9) *Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004*

Abstract: In this paper, through a comparative study of the geological and geochemical features of the typical ore concentration areas, the authors summarized the evolution of the crust and regional metallogenic regularities in the western, middle and eastern regions of the Nanling metallogenic belt. In the western region, magmas intruded into the late Paleozoic and early Mesozoic crust in a short time with an explosive type Sn mineralization in late Yanshanian epoch; in the middle region, magmas intruded into the late Paleozoic crust for a long time accompanied by polymetallic and multi-stage mineralization; in the eastern region, magmas intruded into early Paleozoic crust with the W mineralization peak in Yanshanian epoch, indicating that W mineralization might have occurred in the early Paleozoic crust of the western Nanling region. Correspondingly, the concealed granite, the Shizhuyuan-type deposit under Huangshaping type deposit, and the “basement” under the “five-storey” type W deposit should be the deep exploration targets in the western, middle and eastern Nanling regions, respectively. In addition, the deep exploration across the Qitianling intrusion in southern Hunan Province shows the existence of an upwelling pathway for mantle material indicated by artificial earthquake test at the center of the intrusion, where the later fine-grained granite contained more mantle material than the early coarse-grained granite in the light of Os isotope. In addition, the Sn-rich rhyolite subvolcanic rock vein that intruded into the early coarse grained granite in the Bailashui Sn deposit is a indicator of a later magmatism characterized by enrichment of mantle material in the depth of Qitianling intrusion. These metallogenic regularities in Nanling have indicating significance for W-Sn exploration in Tibet, i.e., to explore W-Sn mineralization in the depth of epi-mesothermal deposits in low erosion areas, and to explore the meso-hypothermal W-Sn deposits in the high erosion areas.

Key words: Nanling metallogenic belt; metallogenic regularity; deep exploration; geophysics; Tibet

南岭成矿带是我国,乃至世界上 W、Sb、Sn、Bi、Pb、Zn 等重要资源基地,也是世界上独具特色的陆内花岗岩成矿作用最为强烈的地区。半个多世纪以来的地质找矿工作不但提供了大量的矿产资源,还积累了丰富的地质勘查与矿山生产资料,创立了“五层楼”、“地洼学说”、“成矿系列”、“三源成矿”等原创性的成矿理论,形成了比较完善的地表地质找矿与评价的技术方法体系。但是,深部找矿仍存在较大的研究空白,隐伏矿床的定位预测技术、典型矿集区的深部探测工程等方面的研究工作停滞不前,制约了地质找矿的深入与发展。造成我国优势的 W、Sb、Sn 等矿产资源的保有储量下降,老矿山先后出现资源危机。在此背景下,国家启动了“地壳深部探测工程”(董树文等,2010),选择南岭成矿

带作为深部探测计划的工作区之一。

在南岭深部探测项目(SinoProbe-03)实施过程中,先后开展了矿集区、矿田尺度的深部成矿规律研究,并在典型示范区进行了深部探测技术实验研究,本文将系统阐述南岭深部探测项目的最新研究成果。旨在为矿产资源的勘查提供理论依据和科学指导,解决矿产勘查工作中遇到的一些疑难问题,及时服务于大花岗岩省的地质找矿工作(如西藏地区)。

1 南岭成矿带重点矿集区的研究进展

按照空间和成矿特点划分,南岭成矿带可以分为西段、中段和东段。

南岭西段主要是指广西中北部的九万大山—元

宝山和丹池地区、广西西部的“右江褶皱带”以及云南东南部的个旧—文山地区，主要出露小花岗岩体或岩珠，出露面积较南岭东段和西段明显减少，发生了以锡为主的大规模成矿作用，以矽卡岩型矿床为主。其中，以桂西北矿集区成矿作用最为强烈，该区域出露的地层主要为泥盆系—中三叠统的碎屑岩-碳酸盐岩建造，出露的岩体主要为笼箱盖等小岩体或岩珠，产出大厂、五圩和芒场等锡多金属矿床，是我国重要的有色金属基地。岩浆活动以中酸性的侵入岩为主，出露面积小，主要有笼箱盖复式岩体和长坡—铜坑的花岗斑岩岩脉和闪长玢岩岩脉(梁婷等, 2011)。

南岭中段一般指的是湘南(湘东南)和桂东北一带，与南岭东段相比，花岗岩的出露面积有所减少，以钨、锡多金属成矿为特征，矿床类型以石英脉型、花岗岩型和矽卡岩型为主。地层从下古生界震旦系至新生界第四系均有分布，但震旦系、寒武系、奥陶系、志留系砂岩、板岩等分布范围有限，泥盆系、石炭系白云岩、灰岩大面积分布。岩浆岩主要由骑田岭、千里山、香花岭、姑婆山、花山、九嶷山、诸广山等岩体组成，与之相关发生了大规模的成矿作用。

南岭东段主要是指赣南和粤北地区，并向东延伸至闽西，以出露大面积花岗岩和大规模钨矿化为特征，以石英脉型或花岗岩型成矿作用为主。出露的地层主要为震旦系、寒武系砂岩为主，奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系分布范围较小。花岗岩出露面积较南岭西段和中段明显增加，出露面积约 50%，与之伴生大量钨矿。

本次研究对南岭成矿带不同区段的主要矿床和岩体开展了系统的定年工作，共包含 124 个定年数据，其成果见王登红等(2010a)文章。此外，还有 93 个尚未发表的南岭东段 93 个岩体的锆石年龄，将另文发表，此处也不再累述。根据以上的年代学资料和前人测定的相关数据(李红艳等, 1996; 肖红全等, 2003; 付建明等, 2005; 张文兰等, 2009; 蔡明海等, 2006; 丰成友等, 2007; 毛景文等, 2007; 彭建堂等, 2007; 刘国庆等, 2008; 刘珺等, 2008; 马丽艳等, 2008)，可以归纳出图 1 所示的南岭不同区段的成岩成矿规律：在南岭西段桂西北矿集区，岩浆活动在晚古生代以来浅部(以泥盆纪和三叠纪为主)地壳演化基础上演化，在燕山晚期发生了突然的、爆发式大规模成矿，形成以锡矿化为主的成矿作用。南岭中段湘南矿集区是以晚古生代(以泥盆纪和石炭纪为主)以来浅部地壳为背景，但成矿时代从印支期开

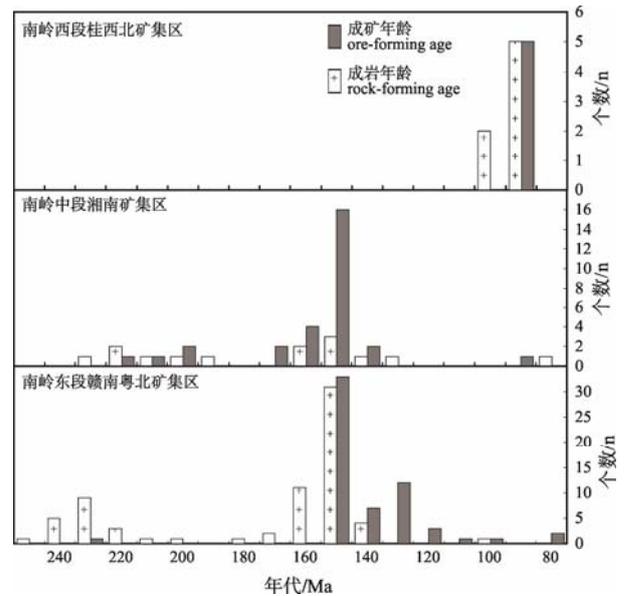


图 1 南岭成矿带主要矿集区的成岩成矿时代特征
Fig. 1 Rock- and ore-forming epoch features of Nanling metallogenic belt

始，大规模成矿作用持续到燕山早期第三阶段，岩浆活动以多期次活动，多金属的强烈相互作用为特点，形成了大量钨锡钼铅锌多金属矿床。南岭东段赣南粤北矿集区以早古生代(以寒武纪为主)以来地壳演化为基础，岩浆活动自加里东期开始，存在多期次、多阶段的岩浆活动，但大规模成矿作用以燕山早期第一阶段为高峰期但可以延续到燕山晚期。

2 典型矿田的深部成矿规律和找矿方向的研究进展

南岭不少矿区单个矿体或矿层的延深可达 1000 m 以上，如云南的会泽、广西大厂的 100 号矿体，说明 1000 m 深度的钻孔还是远远不够的。因此，急需通过综合研究，探索深部找矿的理论、方法和技术。

2.1 南岭西段桂西北矿集区大厂矿田

在广西大厂锡多金属矿中，华锡集团 2006 年在黑水沟—大树脚区的 95[#]、96[#]矿体共计探获(333)矿石资源量 1836 万吨，合计金属量锌 93.66 万吨、铜 4.34 万吨、银 542 吨。2007 年又新增矿石资源量(333)为 1733 万吨，金属量锌 77.14 万吨、铜 3.86 万吨、银 309 吨。2008 年度在黑水沟—铜坑一带新增(333)矿石资源量 941.8 万吨，合计金属量 Zn 30.04 万吨，共伴生 Pb 4.64 万吨、Sb 1.5 万吨、Cu 0.87 万吨、Ag 557.38 吨，相当于又发现一个大型矿床。在 2011 年，广西有色 215 地质队在 ZK27-1 深钻过程中，在



图2 大厂矿区 ZK27-1 钻在超过 1500 m 后发现的铅锌矿化
 Fig. 2 Pb-Zn mineralization features at the depth of 1500 m in ZK27-1 drill hole of the Dachang orefield

超过 1500 m 时打到了多金属矿化体, 矿层厚度超过 20 m(图 2)。

本次研究采用碳-氧同位素示踪了大厂深部的成矿条件。样品采自广西第一钻(ZK39-1), ZK39-1 钻孔位于大厂矿田长坡-铜坑矿区, 钻探深度 1500 m, 以每 10 m 间隔采 1 样。测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成。由碳-氧同位素测试结果(图 3、4)可知, 在整个钻孔中, 碳氧同位素变化趋势完全同步, 在深度超过 1100 m 后, 碳氧同位素

的组成同步降低, 且相关性很强, 说明深部地层遭受了深部变质流体作用或岩浆流体的影响, 暗示长坡-铜坑矿区深部存在热源, 存在较大的找矿潜力。

2.2 南岭中段湘南矿集区黄沙坪—宝山(坪宝)矿田在湖南黄沙坪铅锌矿, 通过接替资源找矿项目的实施, 在 301 靶区新发现了受 F₃ 断裂带控制的 W1-1 矽卡岩型钨钼多金属矿体, 现已控制的矿化深度从 200 ~ -370 m, 初步估算钨钼多属矿 332 + 333 资源量 4.03 万吨, 其中 WO₃ 1.53 万吨, Mo 1.35 万吨, Bi 0.33 万吨, Sn 0.82 万吨; 在深部 301 岩体的东南部 56 中段(地表向下 224 m)施工的坑内钻 ZK1105 进尺达 850 m(距地表 1074 m), 仍未穿过含矿矽卡岩, 初步估算新增 333 钨钼多金属资源量 8.37 万吨, 其中 WO₃ 4.59 万吨, Mo 1.14 万吨, Bi 0.86 万吨, Sn 1.77 万吨。目前, 全区已获钨钼多金属矿石量 1929 万吨, 333 资源量钨钼 8.62 万吨(WO₃ 6.13 万吨, Mo 2.49 万吨), 铋 1.19 万吨, 锡 2.59 万吨, 铁矿石

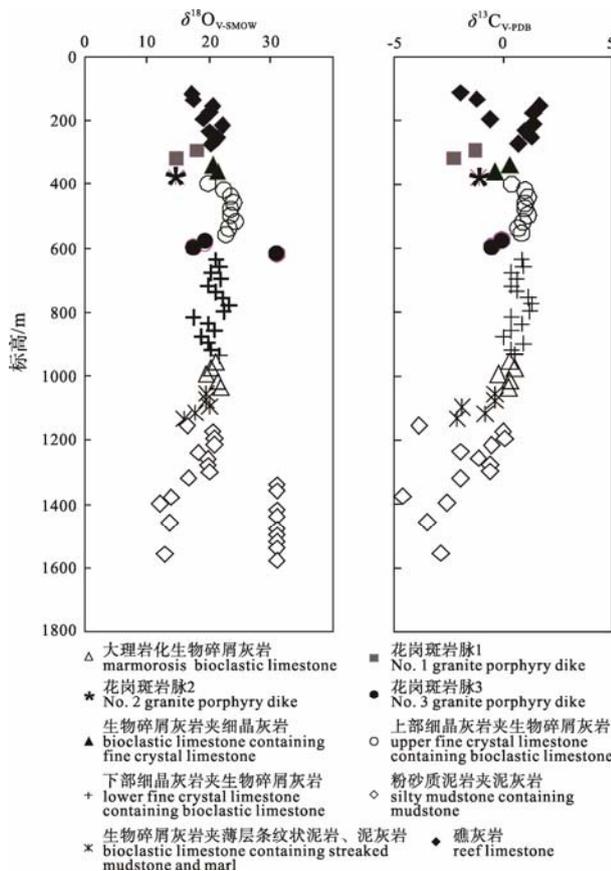


图3 大厂矿田 ZK39-1 钻孔泥盆系礁灰岩碳氧同位素随深度的变化
 Fig. 3 C-O isotope features of reef limestone from ZK39-1 drill hole in the Dachang orefield

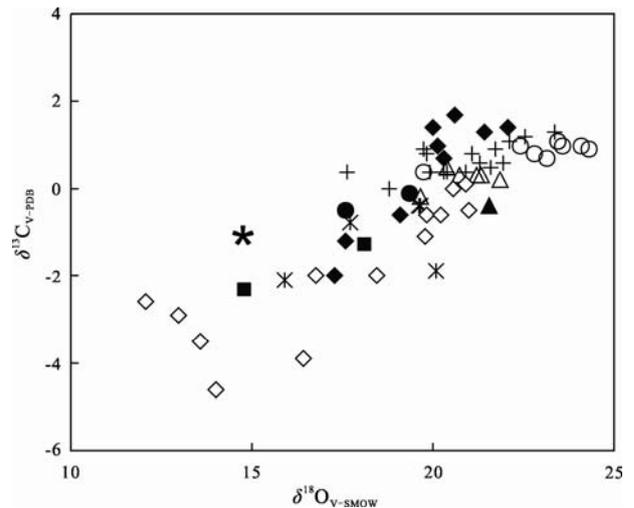


图4 大厂矿田 ZK39-1 钻孔泥盆系礁灰岩碳氧同位素同步变化关系(图例与图3的图例相同)
 Fig. 4 Variation of C isotope with O isotope sampled from reef limestone of ZK39-1 drill hole in the Dachang orefield (legend as for Fig. 3)

量达到 1478 万吨。充分展示了矿区的深部良好的找矿远景。

目前的深部探测结果表明, 黄沙坪矿床的垂向分带规律大致如下(图 5): 浅部为充填交代型方铅矿—闪锌矿—硫铁矿(伴生 Ag、Sn)矿体, 矿体多、规模大(当其顶板为砂泥质岩石或石英斑岩), 是矿山最重要的可采矿体分布空间; 浅中部(近矽卡岩的矽卡岩化结晶灰岩中)为充填交代—矽卡岩型(铁)闪锌矿—方铅矿—硫铁矿—毒砂(伴生 Ag、Sn)矿体; 中上部为矽卡岩型磁铁矿—锡—萤矿矿体; 中部(大约为 0~ -400 m 标高)为矽卡岩型白钨矿、辉钼矿—磁铁矿矿体; 中深部(大约为 -400~-800 m 标高)为矽卡岩型白钨矿—辉钼矿—辉钼矿矿体。后三者即是岩体接触带矽卡岩型矿体类型的垂向空间分布。

根据深部成矿特征, 黄沙坪铅锌多金属矿床的成矿模式可描述如下: 成矿物质主要来源于基底重熔型岩浆, 成矿介质属于弱碱→弱酸环境, 成矿过程经历了从矿液中心向外的接触带高温成矿阶段的交代型铁、钨钼(锡铋), 到中高温交代充填型铜锌矿、铅锌矿, 到外接触带中低温交代充填型铅锌(银)矿的演化过程。矿床主要就位于“井”字或“环形”

圈闭构造范围内受屏蔽构造控制的空间内。反映出在岩浆岩、构造和围岩条件各异, 而导致的矿带、矿床类型和产出形式的演变, 构成三位一体的复式成矿特征。

2.3 南岭东段赣南粤北矿集区瑶岭矿田

赣南粤北脉钨矿床的“五层楼”模式开创了模式找钨的先河, 为隐伏矿的寻找提供了理论支持, 使赣南钨矿找矿由单一脉带向细脉标志带—细脉带—混合带—大脉带—巨脉带的系列找矿, 为我国钨储量扩大作出了重大贡献。但是, 根据近年地质找矿工作及矿山开发的实践, 发现其根部带存在云英岩型、蚀变花岗岩型钨锡矿体, 可使矿床规模成倍扩大。根据这一客观事实, 笔者所在的科研团队提出了“五层楼”的深部还有“地下室”的找矿观点, 以此建立了“五层楼+地下室”找矿模型, 并分别于淘锡坑钨矿的补勘扩储、赣县于都地区的深部找矿等具体实践中得到成功运用(许建祥等, 2008)。南岭东段瑶岭矿田是“五层楼”成矿模式的诞生地之一, 相对于在赣南许多矿山的深部均发现了较大规模的矿体, 瑶岭矿田的深部找矿工作进展较为缓慢, 故本次研究以此作为研究重点。

(1) 梅子窝矿床深部的蚀变花岗岩型钨矿化

本次研究发现, 粤北梅子窝矿区深部花岗岩体内有一定强度的白钨矿化, 即使在花岗岩脉(枝)中也发现了有白钨矿化, 而且从花岗岩闪长岩到下部的花岗岩 400 m 的范围内都有白钨矿化, 矿化主要在钾化带的上部和绢云母化带中。在产出状态上, 白钨矿与黑钨矿伴生。在花岗岩中, 白钨矿或产在含黑钨矿的石英脉边部, 或石英脉的裂隙中产生(图 6)。此外, 另有一些白钨矿沿花岗岩裂隙分布, 受控于岩石裂隙和断裂构造, 一些白钨矿呈星点状分布于花岗岩中, 但规模一般较小。此外, 在白钨矿化相对不强的石人嶂矿区, 其下部中段的坑道内, 也已经发现白钨矿化与黑钨矿化共生(图 7), 或白钨矿交代黑钨矿(图 8)。

(2) 石人嶂矿区深部的云英岩型钨矿

石人嶂矿区深部+380 m 中段和+340 m 中段分布有许多矿脉, 如 V11 带、V13 带、V14、V17、V22、V26、V61、V62、V92、V93、V94、V95 等。本次研究发现, 这些矿脉两侧花岗岩均发育有较强的云英岩化, 且离矿脉越近, 云英岩化程度越高。在云英岩带局部地段有黑钨矿化, 肉眼就看到细粒黑钨矿, 黑钨矿多在石英脉壁或石英脉附近的云英岩中出现, 也有少量直接在云英岩中出现, 一般呈不规则状分布(图 9)。部分硅质团块发育部位钨矿化强度更高,

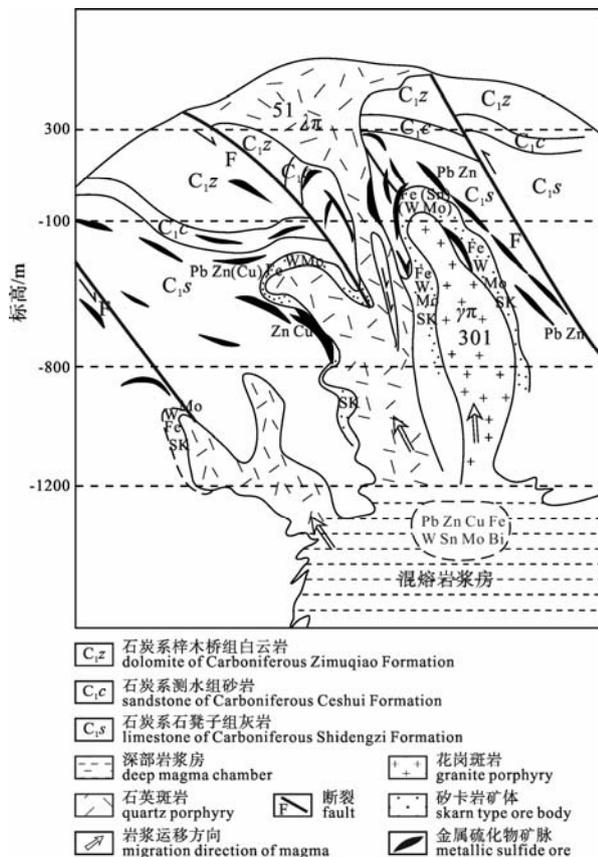


图 5 湘南黄沙坪铅锌钨锡矿床勘查模式图
Fig. 5 The exploration model of the Huangshaping Pb-Zn-W-Sn deposit, southern Hunan

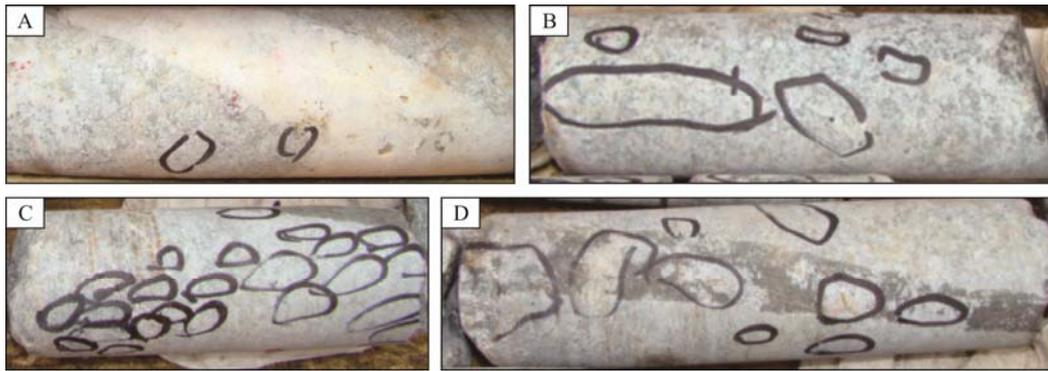


图 6 粤北梅子窝钨矿深部花岗岩中的白钨矿化现象

Fig. 6 The deep scheelite mineralization features of the Meiziwo deposit, northern Guangdong
 A-白钨矿产于石英脉边部及附近; B-白钨矿产于花岗闪长岩中; C-白钨矿化呈带状分布; D-白钨矿产于绿泥石化带中
 A-scheelites exist in the vicinity or border of the quartz vein; B-scheelites exist within the granodiorite;
 C-zonal distribution of scheelite in granite; D-scheelites exist in the chlorite zone of granite

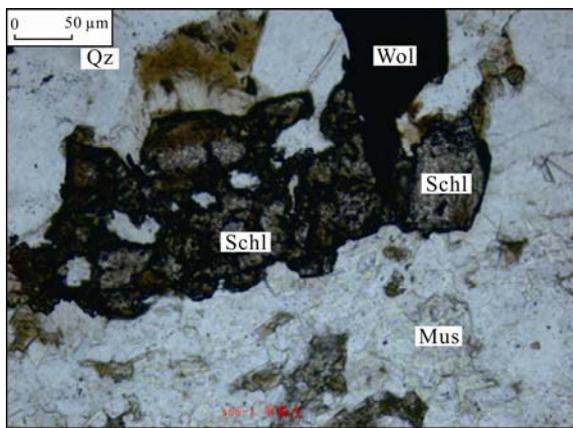


图 7 石人嶂矿区白钨矿与黑钨矿共生 (单偏光, 样品采自 550 m 中段 14#脉)

Fig. 7 Paragenetic relation of scheelite and wolframite in the Shirenzhang orefield (plainlight, samples collected from No. 14 vein at 550m level)

Qz-石英; Wol-黑钨矿; Schl-白钨矿; Mus-白云母
 Qz-quartz; Wol-wolframite; Schl-scheelite; Mus-muscovite

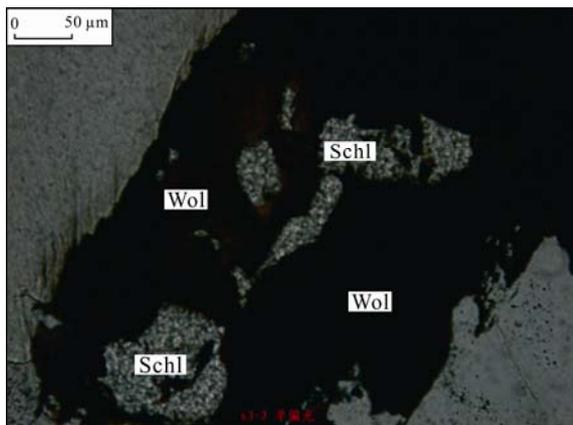


图 8 石人嶂矿区白钨矿交代黑钨矿 (单偏光, 样品采自 340 m 中段 14.11#脉)

Fig. 8 Wolframite replaced by scheelite in the Shirenzhang orefield (taken under plane polarized light, and samples are from No. 14 vein in 340m level)

Wol-黑钨矿; Schl-白钨矿
 Wol-wolframite; Schl-scheelite.



图 9 石人嶂矿区穿插石英细脉的云英岩化花岗岩 Fig. 9 Greisenized granite with fine quartz veins in the Shirenzhang orefield

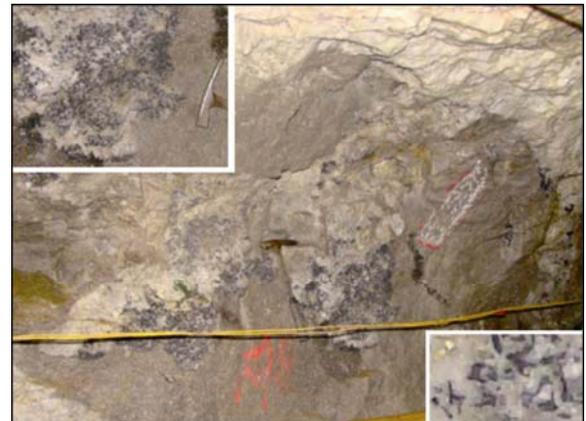


图 10 石人嶂矿区云英岩化硅质团块部位发育的钨砂包 Fig. 10 Tungsten concentrated pocket produced in greisenized granite of the Shirenzhang orefield

甚至见到钨砂包(图 10)。

本项目对 121 件样品进行了多元素分析, 测试结果表明, 除了石英脉以外, 云英岩中的多种元素矿化强度也很高(表 1), 平均值(除了 As 以外)多比石英脉还要高, 甚至高出一个数量级。另据矿山的 53 件刻槽取样分析结果, 各金属的平均品位为: 钨

表 1 石人嶂-梅子窝钨矿区元素含量统计表(Ag 含量单位为 10^{-9} , 其余单位为 10^{-6})

| 岩性 | | W | | | Cu | | | Sn | | |
|-----|----|---------|-------|---------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|
| 岩性 | 样数 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 平均值 |
| 变质岩 | 4 | 21.29 | 3.09 | 11.89 | 601.56 | 3.38 | 174.47 | 54.00 | 1.60 | 27.00 |
| 花岗岩 | 13 | 109.68 | 5.89 | 32.44 | 976.44 | 32.18 | 184.80 | 358.00 | 1.80 | 128.23 |
| 云英岩 | 8 | 141.67 | 2.05 | 51.03 | 559.08 | 14.75 | 302.87 | 277.00 | 27.90 | 136.68 |
| 石英脉 | 96 | 1350.20 | 0.06 | 31.38 | 2757.60 | 1.02 | 94.42 | 752.00 | 0.60 | 27.26 |
| 岩性 | | As | | | Mo | | | Ag | | |
| 岩性 | 样数 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 平均值 | 最大值 | 最小值 | 平均值 |
| 变质岩 | 4 | 1699.0 | 7.90 | 541.40 | 3.39 | 0.70 | 1.69 | 19480 | 271 | 5550 |
| 花岗岩 | 13 | 1824.0 | 9.40 | 379.77 | 933.0 | 0.75 | 94.71 | 90000 | 234 | 13028 |
| 云英岩 | 8 | 752.7 | 24.50 | 180.96 | 683.0 | 1.96 | 136.52 | 1008200 | 393 | 162843 |
| 石英脉 | 96 | 63636.0 | 2.30 | 1934.70 | 1477.0 | 0.30 | 80.60 | 2584700 | 110 | 58708 |

(WO_3)0.34%, 锡 (Sn)0.06%, 铜 (Cu)0.10%, 铋 (Bi)0.075%, 钼 (Mo)0.005%, 它们虽然没有达到独立矿体的品位要求, 但仍达到了钨与其它多金属共生综合回收利用价值。目前, 矿山已经通过广东省政府向财政部、国土资源部提交《2010 年矿产资源节约与综合利用专项资金》示范工程“云英岩钨多金属选矿流程”项目。

3 高温高压成矿实验的研究进展

桂西北大厂矿床 100 号矿体赋存于泥盆系礁灰岩中, 为一形态不规则的巨大块体, 总体上呈向西突出的新月形, 长达 1240 m, 宽 105~240 m, 一般厚 7~25 m, 平均厚 14.46 m, 中心部位最厚达 33 m(张起钻, 1999)。虽然单矿脉的规模如此巨大, 但矿体中几乎没有夹石存在, 仅偶见“捕虏”礁灰岩块和沥青团块分布, 而且矿体与围岩界线清晰截然。从这些特征可以推断高度富集成矿物质的流体快速贯入成矿空间, 但仍然无法解释的是为什么热液未与礁灰岩发生反应, 矿体围岩几乎没有发生热液蚀变。为了解释 100 号矿体的成因, 人们提出了各种假设, 一种比较科学和切合实际的解释是: 100 号矿体是在成矿流体进入到古溶洞后突然失去了压力而导致流体“失压沸腾”, 进而成矿物质大量聚集和沉淀的结果(王登红等, 2004; Wang et al., 2004)。但由于实验设备的限制, 该假设尚未通过实验研究证实。

本次研究利用最新式热液金刚石压腔, 原位观测到高温环境中, 压力骤降的极端条件下的失压沸腾现象。实验的初始固体样品为 $LiAlSiO_4$ - $NaAlSi_3O_8$ - SiO_2 , 初始流体样品为 10wt% $LiCl$ 水溶液, 二者同时封存于样品腔内。在加热过程中, 样品

腔内的空气泡在 263℃ 消失, 而后样品腔内的压力沿着体系的等容线快速上升。当加热到 850℃ 时, 硅酸盐熔体珠几乎完全溶解于水溶液(图 11A), 而后样品腔发生一定程度的泄漏, 大量熔体珠又重新出溶; 当加热到 870℃ 时, 样品腔的铀片发生破裂, 压力骤然从几千大气压降低到接近一个大气压, 同时大量晶体瞬间自样品腔边缘向内定向生长(图 11B); 在随后的缓慢降温至 100℃ 过程中, 晶体的生长程度很小(图 11C)。此外, 大量的同组成和近似组成的实验说明, 在温度和压力逐渐降低的过程中, 只有熔体珠出溶的现象, 晶体较难成核和结晶。

本次研究中, 实验物质在 850℃ 完全均一成硅酸盐水溶液, 其相当于岩浆热液。在大厂矿区成矿流体主要来源于深部岩浆热液(陈毓川等, 1993), 如果赋矿的礁灰岩在成矿前存在较大的空间, 例如原来礁灰岩中的油储在燕山期花岗岩作用下被破坏而形成的古溶洞(曾允孚等, 1982; 张起钻, 1999), 则成矿热液贯入后会造成压力骤然降低, 这与本次实验过程中样品腔突然断裂的情景相近。而且, 本次实验现象说明, 在高温高压环境中, 压力的骤然降低能够促进晶体的定向生长, 形成定向结构(图 9C, D)。在大厂 100 号矿体中也存在这样的定向结构, 黄铁矿-铁闪锌矿-脆硫锑铅矿组合按一个方向自脉壁向内定向生长排列, 与本次实验的结果也极为相似。此外, 压力是围岩发生热液蚀变的主要因素之一, 压力的骤然降低不利于围岩蚀变的发生, 由此也可以解释 100 号矿体围岩蚀变程度很低的原因。

4 湘南骑田岭矿集区深部探测技术的试验与进展

本次研究以南岭中部骑田岭矿集区为重点, 部

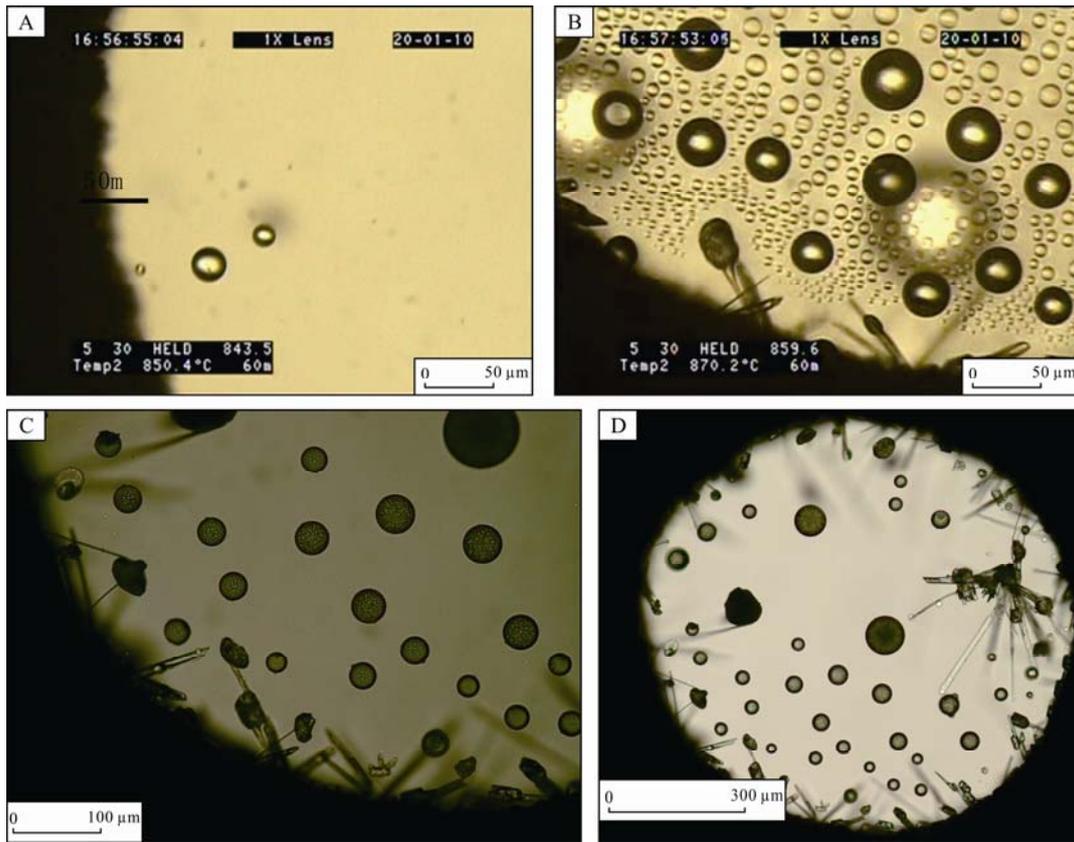


图 11 在高压状态下, 压力突然降低条件下晶体快速生长的过程

Fig. 11 Rapid crystallization process during sudden fall of pressure

A-在 850°C, ~500 MPa 的条件下, 熔体球逐渐溶解在热液中; B-在 870°C, 压力突然降低为接近 1 bar 的条件下, 晶体在样品腔上快速呈针状生长; C-实验结束后自样品腔定向生长的晶体; D-实验结束后, 样品腔内的晶体生长分布情况

A-the melt balls were dissolved into aqueous fluid at 850°C, ~500 MPa; B-crystals rapidly grew on the chamber wall in needle shape when pressure fell to 1bar suddenly at 870°C; C-the oriented crystals when experiment was finished; D-the crystal distribution in sample chamber of HDAC when experiment was finished

署和完成了穿越骑田岭的 60 km 长的综合探测剖面(图 12), 涵盖人工地震、大地电磁、多元素地气测量、Os 同位素示踪、“岩石探针”等多种方法联合工作, 为深入研究地壳结构提供了重要依据。

4.1 骑田岭矿集区的地球物理探测实验研究

本次研究在骑田岭矿集区实施了黄沙坪—廖家湾剖面的人工反射地震探测工作, 剖面长度 49 km(图 12)。地震时间剖面成果显示(图 13), 在深、中部存在着比较明显的三个地震构造单元, 其中最深的地震构造单元(定名为 T_m)出现在 10 s 左右, 深度预计 35 km(平均速度用 7000 m/s), 初步分析该构造单元为莫霍面的反射。7 s 和 4.5 s 出现两个地震构造单元, 分析认为是上、下地壳界面的反射(在定名为 $T_上$ 、 $T_下$), 地壳的两层结构形态比较明显。在浅部 1.5~2.2 s 左右存在能量较强反射波组, 在黄沙坪—清和、永春—廖家湾区段连续性较好, 波组产状在黄沙坪—清和段向东倾, 而在永春—廖家湾段向西倾, 宏观上看形似平缓“向形”构造。

深部的莫霍面 T_m 构造单元在永春一带不连续, 出现无反射波组异常。该异常自下而上穿越了莫霍面, 上、下地壳地震构造单元, 说明岩体的形成与地幔岩浆岩上侵有关, 为岩体深部形成机制提供了直接、直观的信息, 深部岩浆岩的上侵活动为矿集区丰富矿产的形成和分布提供了赋存空间、热源和物质来源。

4.2 骑田岭矿集区的 Os 同位素示踪

Re-Os 同位素在基性-超基性岩物质来源示踪方面已得到较广泛应用, 但在酸性岩方面尚属少见。与其它同位素体系不同, Re、Os 均为高亲铁元素, 在岩浆分异演化过程中, Re 属于中等不相容元素, Os 属于强相容元素, 地壳和地幔两端 Os 同位素组成差别较大, 因此, Re-Os 同位素是研究花岗岩中是否存在幔源物质贡献的灵敏示踪剂。本次研究在黄沙坪—廖家湾综合探测剖面上, 采集了 29 个新鲜的花岗岩样品, 测试了 16 件样品的 Os 同位素组成(图 14)。将骑田岭岩体不同阶段花岗岩所得 Os 同

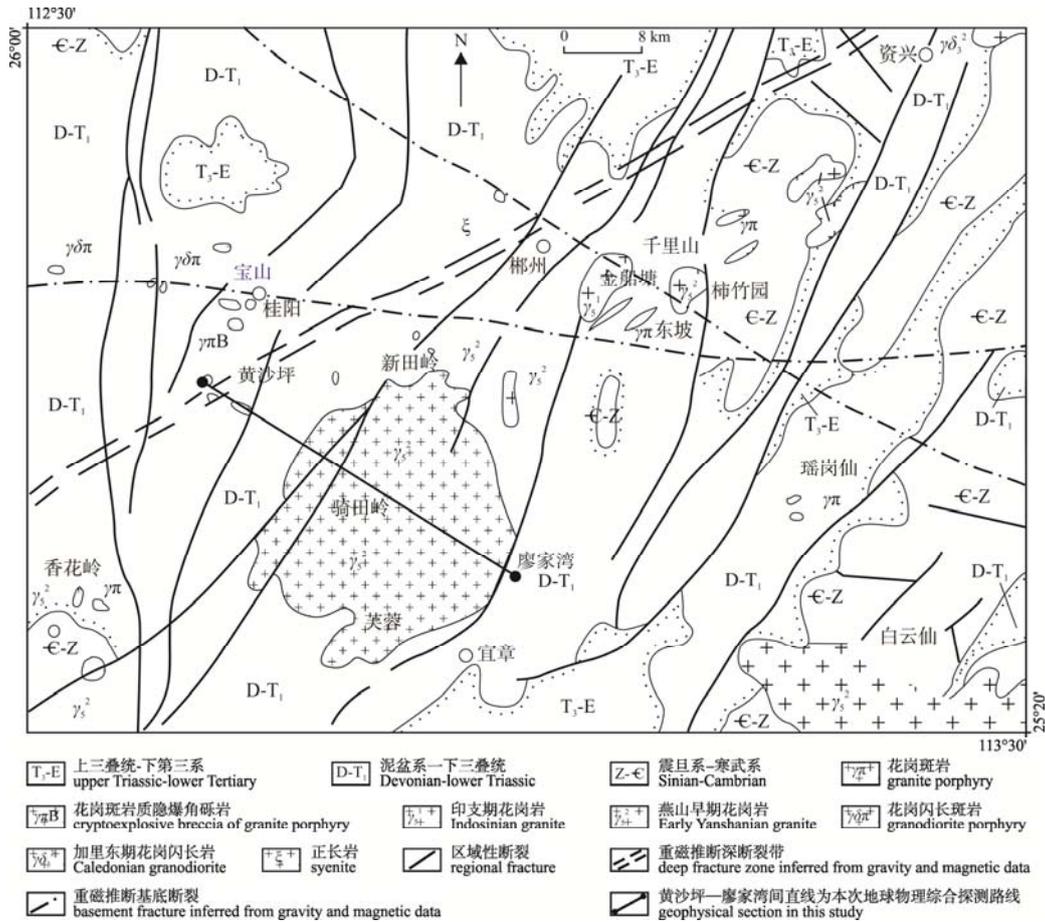


图 12 湘南地区的地质矿产分布略图

Fig. 12 The distribution of ore deposits in southern Hunan

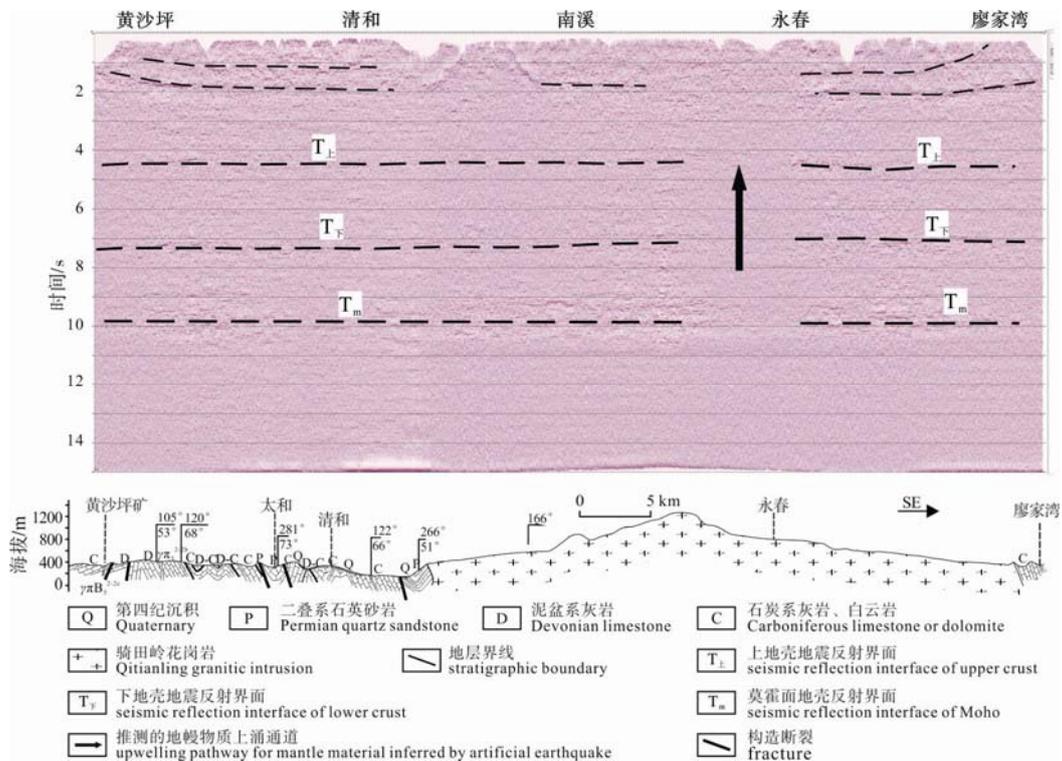


图 13 南岭中段湘南骑田岭矿集区, 黄沙坪—廖家湾人工地震探测剖面(剖面位置见图 12)

Fig. 13 The Huangshaping-Liaojiawan 2D seismic probe section in Qitianling area located in middle Nanling region (for section location, see Fig. 12)

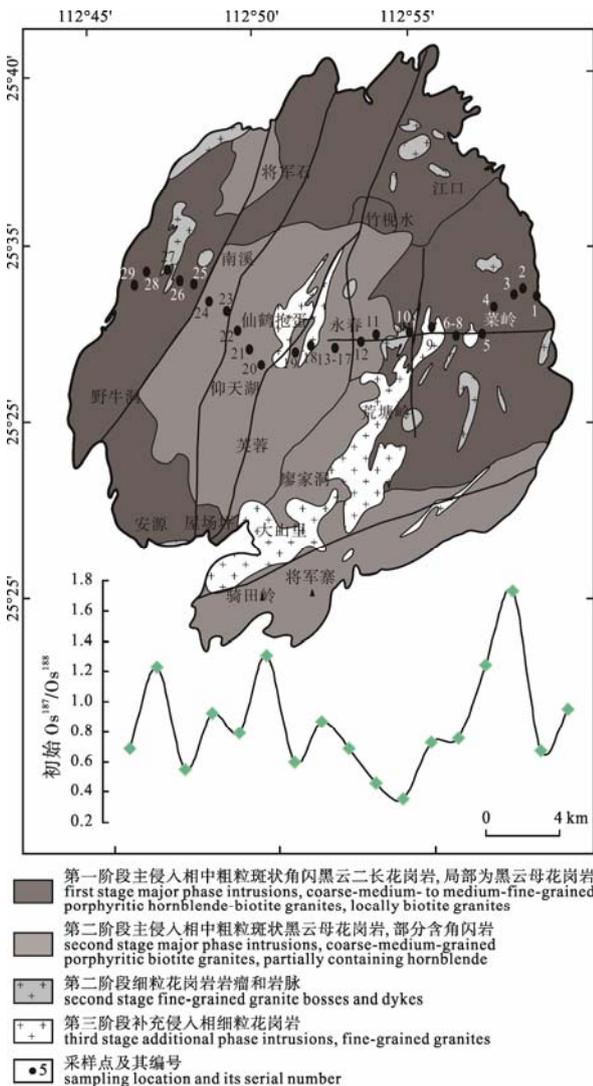


图 14 骑田岭岩体及采样位置分布图
(地质底图据 Zhu et al., 2009)

Fig. 14 Sampling locations in Qitianling intrusion for Os isotope analysis (base map after Zhu et al., 2009)

位素初始比值进行对比, 发现三个阶段花岗岩的 Os 同位素初始比值相对于上地壳平均值 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}=1.69$)来讲较低(Esser et al., 1993), 而且 Os 同位素初始比值比较分散, 显示具有壳幔混合来源特征。

测试结果还显示, 晚期细粒黑云母花岗岩的 Os 同位素初始比值较低, ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_i 平均值为 0.5559, 其中 QTL-10 号样品 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_i 为 0.3543, 并且每一期花岗岩不同样品的 Os 同位素初始值也相差较大, 显然在岩体形成过程中存在幔源物质加入, 并非只有老地壳的重熔, 且壳幔混合得不均匀。早期中粗粒似斑状黑云母花岗岩 Os 同位素初始比值相对较高, ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_i 平均值为 1.160, 显示壳源物质为主, 尤其是靠近岩体边缘的 QTL-28, QTL-2-1

两件样品更明显, Os 同位素初始比值更高。中期浅灰色似斑状黑云母花岗岩 ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_i 平均值为 0.9124, 介于早期和晚期黑云母花岗岩之间。早中晚三个阶段花岗岩的 Os 同位素初始比值均不一致的特点, 反映花岗岩多阶段侵位过程中, 早期花岗岩的活动为晚期更多地幔物质上升到地表创造了构造通道, 使侵位于深部的富地幔物质的岩浆得以上升到浅部。

4.3 骑田岭矿集区的岩石化学探测实验

湘南白腊水超大型锡矿赋存于骑田岭复式花岗岩岩体南部的中粒斑状角闪黑云母钾长(二长)花岗岩中, 部分产于内外接触带, 已发现构造蚀变型锡矿、蚀变岩体型锡矿和花岗斑岩型锡矿 3 种类型的矿脉 25 条。

本次研究在该矿区发现了一条 4.5 m 宽的黄玉流纹岩质次火山岩脉(图 15), 切穿了中粒黑云母花岗岩, 包含了大量的锡石, 金红石, 萤石和钼钽矿等。流纹质岩脉还包含花岗岩的角砾, 界限清晰, 角砾中也含有相似的矿物组合。流纹质岩脉和角砾中的矿物组合与骑田岭第三阶段细粒花岗岩中的矿物组合有截然的区别。流纹质次火山岩脉具有强过铝性, 富集 Be、Li、Rb、Ga 等元素, 全岩 Sn 含量可以达到 2745×10^{-6} , 达到了斑岩锡矿的工业品位。流纹岩的稀土配分曲线与骑田岭第三阶段花岗岩的很类似, 具有显著的 Eu 负异常, 较平缓的海鸥型, 轻稀土分异, 重稀土富集, 这是典型的成矿岩脉的特征。锆石 U-Pb 定年表明, 20 颗锆石的 U-Pb 年龄为 147 Ma, 与骑田岭岩基第三阶段侵入处于同期。奇古岭次火山岩脉的存在暗示, 骑田岭岩体深部尚存在与 Sn 成矿关系密切、含更多地幔物质岩浆岩。

5 讨论与结论

5.1 区域深部成矿规律分析

前文所述可以发现, 自南岭东段→南岭中段→南岭西段, 出露岩体的规模逐渐缩小, 岩浆岩从南岭东段加里东期花岗岩大量出露, 到南岭西段主要出露燕山晚期花岗岩, 出露地层从早古生代、到晚古生代、早中生代演化。这些特点, 暗示从南岭东段到西段, 地层的剥蚀程度逐渐降低, 提示在南岭西段深部可能存在更多较大规模的花岗岩, 在深部可能发现大量的加里东期和中生代花岗岩。这是因为, 在岩浆多期次侵位活动中, 早期岩浆活动开辟了上升通道, 使晚期岩浆得以上升到浅部。因此, 可以推测南岭西段深部可能存在南岭东段, 即南岭成

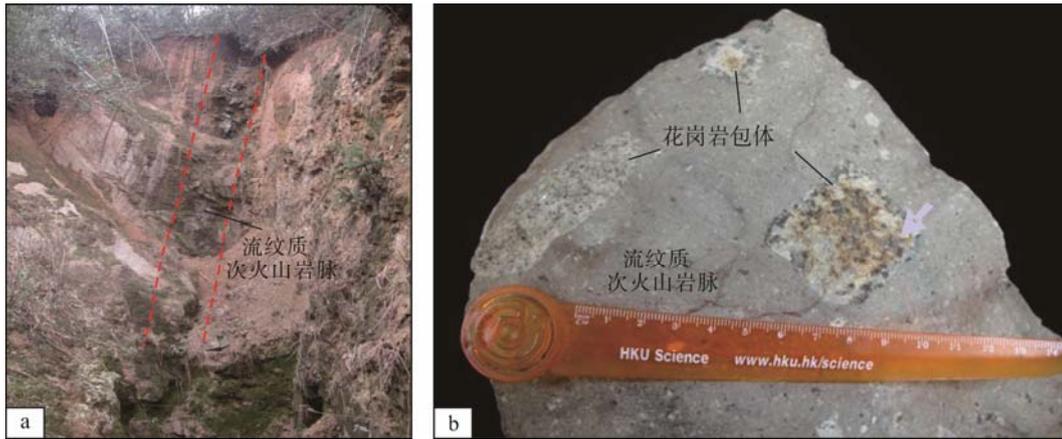


图 15 南岭中段湘南骑田岭矿集区白蜡水锡矿中发现的流纹质次火山岩脉

Fig. 15 The Sn-rich rhyolite subvolcanic rock vein with granite breccia that intruded into coarse grained granite in the Bailashui deposit, Qitianling, middle Nanling region

a-产在粗粒花岗岩中的黄云流纹质次火山岩脉; b-包裹在流纹质次火山岩手标本及包裹在其中的花岗岩角砾
a-the rhyolite subvolcanic rock vein intruded into the early coarse grain granite;
b-the rhyolite subvolcanic rock sample containing granite breccia

矿带不但存在西锡东钨的平面分带,在南岭西段还可能存在上锡下钨的垂直分带。

传统上认为南岭西段以锡成矿作用为主,但滇东地区产出了大量钨矿。如老君山地区,区域出露地层为早古生代寒武系,与南岭东段相近。矿集区内南秧田钨矿区的辉钨矿 Re-Os 成矿年龄为 207 Ma,云发矿区白钨矿 Sm-Nd 等值线年龄为 159 Ma,保良街拉白村附近的伟晶岩脉的白云母 Ar-Ar 年龄为 144 Ma(笔者,尚未发表数据)。这些资料说明南岭西段早古生代地层中也存在印支晚期和燕山早期的成矿作用,也暗示在南岭西段晚古生代地壳深部的早古生代地层中可能产出南岭东段式钨矿。

5.2 不同矿集区的深部找矿方向分析

通过本项目的研究可以发现,南岭成矿带深部找矿具有较巨大的潜力,但在不同区域的矿集区,具有不同的深部找矿方向。

在南岭西段少岩体出露地区,虽然许多矿床的矿体倾角小于 45° 乃至层状,但找矿方向应该是寻找深部隐伏岩体,探测岩浆热液交代作用而形成的矿体,甚至可以探测岩体内部的岩体型矿体。如,广西大厂长坡—铜坑 91[#]和 92[#]等锡多金属矿体本身就是世界级的矿床(二者的锡金属量相当于 10 个大型锡矿),其钻探深度一般在 500 m 以浅。近年来,通过实施 1000 m 以浅的钻探又发现了 95[#]和 96[#]矿体;本文对 ZK39-1 孔的碳氧同位素研究也表明,岩体埋藏深度超过 1500 m,深部具有较大的找矿前景;ZK27-1 钻孔证明超过 1500 m 后仍存在厚层交代型矿体,但仍然没有打到燕山期花岗岩体。预计通

过 2000 m 深度的钻探,将打到龙箱盖岩体与泥盆系的接触带,所发现的矿床类型也将由中低温铅锌矿向高温的铜矿和钨锡矿演化,岩体内部能否发现云英岩型、破碎蚀变花岗岩型矿体值得期待(王登红等,2010b)。此外,成岩成矿实验也暗示,在南岭西段的喀斯特地区,应注意巨大碳酸盐岩溶洞可以为成矿流体提供沉淀空间,应列为深部找矿重点。

相对于南岭西段,南岭中段的找矿工作要相对复杂,这主要归因于多期多阶段的岩浆活动和成矿作用,以及多样的围岩地层和构造环境,需要根据具体的成矿环境来确定深度找矿方向,不但要注意地层中的找矿工作,也要注重花岗岩中成矿,如近年来在湘南骑田岭岩体内部发现的大型锡矿——芙蓉锡矿,印支期的王仙岭岩体中发现了燕山期的成矿作用(湘南地质勘查院提供的资料)。归纳起来,南岭中段的成矿模式可描述如下:在靠近含矿岩体的外接触带,细粒花岗岩脉或似伟晶岩脉往往可以看到逐渐变为长石石英脉,再变为钨矿石英脉。在离含矿岩体接触带外数百米范围内的较早阶段花岗岩体中或硅酸盐质围岩中,常形成石英脉型钨矿床。含矿岩体位于较早阶段花岗岩的深度不大的范围内,则可能形成内接触带型磁铁钨锡钼铋矿脉;若含矿岩体直接位于沉积岩或变质岩之下,则可能形成外接触带型钨矿脉;在钙质围岩中,则形成矽卡岩型钨矿、矽卡岩和云英岩复合型钨矿或矽卡岩型、充填交代型铅锌矿。当含矿溶液通过较早阶段的花岗岩时,下部常有强烈的钠长石化及钾长石化,上部常形成强烈云英岩化,甚至构成岩体顶部的云英岩型钨钼矿体,在远离岩体的钙质围岩中常有铅锌矿

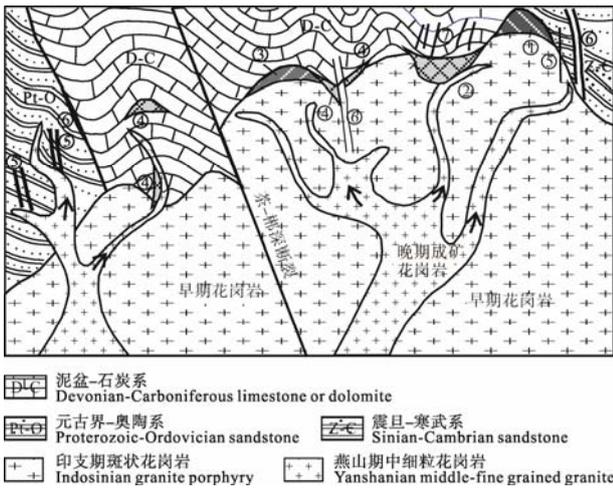


图 16 南岭中段湘南矿集区成矿模式图
Fig. 16 Regional ore-forming models for the middle Nanling region

- ①-斑岩型锡矿; ②-云英岩型钨锡矿; ③-蚀变大理岩型锡矿;
- ④-矽卡岩型钨锡矿; ⑤-石英脉型钨锡矿; ⑥-硫化物型钨锡矿;
- ⑦-网脉大理岩型锡矿
- ①-porphyry type W-Sn ore deposit; ②-greisen type W-Sn deposit;
- ③-altered marble type Sn deposit; ④-skarn type W-Sn deposit;
- ⑤-quartz type W-Sn deposit; ⑥-sulfide type W-Sn deposit;
- ⑦-stockwork marble type Sn deposit

床分布(图 16)。

与南岭中段相比, 南岭东段的成矿作用主要集中在燕山早期第一阶段, 成矿类型以石英脉型钨锡矿床为主。但除了这种产状陡立、产在张性裂隙的矿体, 也应注意沿岩体上部, 似层状的云英岩型矿体, 以及破碎带热液充填-交代蚀变岩型的黑钨矿矿体。即, 黑钨矿既可以出现在张性裂隙中, 也可以出

现在张扭性的构造破碎带, 若二者均不发育则可能形成云英岩型矿体。反映出构造环境仅是决定成矿类型, 而成矿物质的供应是决定成矿与否的关键。这些“非传统的”矿体若与“传统”成矿模式——五层楼结合, 则发展出“五层楼+地下室”成矿模式(图 17)。

5.3 幔源物质对南岭成矿的贡献

南岭优势矿产资源如钨锡等, 其成矿物质来源于何处? 壳幔作用对成矿有无控制作用? 该问题是有关南岭成矿的关键科学问题之一。近年来的一系列同位素研究表明, 南岭地区的大部分矿床表现出地幔流体参与成矿的特点, 一批花岗岩被归为 A 型花岗岩(陈培荣等, 1998; 包志伟等, 2000; 范春方等, 2000; 柏道远等, 2005)。以湘南矿集区表现最为明显, 从加里东期益将岩体、印支期的高坳背矿区的花岗岩、再到燕山期的荷花坪矿区花岗斑岩脉、骑田岭岩体及相关矿床, Hf、He 同位素均显示出壳源和幔源岩浆的混合作用(李兆丽等, 2006; 王彦斌等, 2010a, b; 章荣清等, 2010; 刘勇等, 2011)。

本次深部探测研究, 提供了多角度研究成矿物质来源的方法。以骑田岭岩体为例, 人工地震探测从深部构造角度显示, 在骑田岭岩体中心(晚期细粒黑云母花岗岩)深部存在深部物质上涌的构造通道; Os 同位素从物质组成方面, 显示岩体中心的晚期细粒黑云母花岗岩较岩体外围的粗粒黑云母花岗岩具有更多的幔源物质, 是晚期富地幔物质岩浆活动的

| 部位 | 带名 | 深度/m | 工业价值 | 形态示意图 | 含脉密度/(条/m) | 含脉率/% | 带宽/m | 单脉厚/m | 主要矿物组合 | |
|----|-----------|---------|------|-------|---|-------|--------|------------|--|-----------------------------|
| 顶部 | 矿化标志带 | 80~100 | 无 | | 0.5~5 | 0.1~3 | 20~200 | 0.001~0.01 | 锡石—黑钨矿—白云母—电气石 | |
| 上部 | 细脉带 | 100~250 | 大 | | 5~20 | 6~50 | 10~50 | 0.02~0.10 | 黑钨矿—锡石—绿柱石—黄铜矿—黄铁矿—白云母等 | |
| 中部 | 细脉—大脉混合带 | 40~500 | 巨大 | | 1~8 | 10~70 | 5~30 | 0.05~0.5 | 黑钨矿—白钨矿—锡石—黄铜矿—黄铁矿—方铅矿—闪锌矿—白云母等。组分复杂, 矿化重叠 | |
| 下部 | 大脉带 | 100~800 | 大 | | 0.03 | 10~50 | | 0.2~2 | 黑钨矿—黄铜矿—黄铁矿—方铅矿—辉钼矿等 | |
| 深部 | 地下室 | 不固定 | 大 | | 钨锡多金属矿化沿断裂破碎带或钨钼钽矿化沿岩体顶部云英岩化发育, 多呈层状似层状 | | | | | 黑钨矿—白钨矿—黄铜矿—黄铁矿—方铅矿—辉钼矿—钼钼等 |
| 根部 | 大脉—巨脉—尖灭带 | 50~80 | 小—无 | | 0.05~0.1 | | | 2~0.05 | 黑钨矿—辉钼矿—黄铁矿—碳酸盐 | |

图 17 南岭东段“五层楼+地下室”模式图
Fig. 17 The sketch map of prospecting model of “five storeys + basement”

产物;奇古岭富锡次火山脉进一步暗示岩体深部存在一期晚期的岩浆活动,此期岩浆活动可能含有更多的地幔物质,对区域锡成矿具有重要的意义,即骑田岭岩体深部可能具有更大锡成矿潜力。该探测结果与区域构造环境相一致。骑田岭岩体临近“钦-杭带”断裂带,即是扬子陆块与华夏陆块在新元古代的碰撞对接带,此后多次沿该带开合,为地幔物质上涌加入地壳的一条重要通道(洪大卫等, 2002; 华仁民等, 2010)。

5.4 南岭成矿带深部找矿进展对西藏地区找矿的指示意义

太平洋和喜马拉雅成矿带是我国最重要的成矿单元,二者均与板块俯冲碰撞有关,产出大量花岗岩类矿床,分别以南岭成矿带和西藏成矿省为代表,找矿方向具有一定的可类比性。西藏地区的矿床类型主要有斑岩型铜(金-钼)矿床、矽卡岩型铁铜-铅-锌(银)矿床、层控铅-锌-银矿床、火山岩型金-银矿床及雄村式铜-金矿床,属于中低温热液型矿床,以铜、铅、锌等中低温矿种组合为主,花岗岩及其成矿围岩主要为中生代地层,成矿时代主要集中燕山中晚期和喜马拉雅期。但与之不同的是,南岭地区的成矿作用属于石英脉型钨锡矿床,是一种中高温热液矿床,围岩主要为古生代地层,成矿时代从印支晚期可以持续到燕山晚期。因此,南岭成矿带和西藏地区的成矿作用是不同时空岩浆构造运动的产物,二者处于不同的构造层位。但是,这并不说明西藏不具备寻找与花岗岩有关的钨锡矿床的潜力。西藏与南岭花岗岩地球化学组成的相近性暗示出钨锡是西藏的潜在优势矿种(雍永源, 2007)。借鉴南岭深部找矿的经验,西藏钨锡矿床的找矿工作可以从以下几方面入手。

一是,在低剥蚀程度地区的深部找矿,即在斑岩型或矽卡岩型铜铅锌矿床深部寻找钨锡矿化。此类地区的探测方向类似于南岭西段大厂矿田,以探测隐伏花岗岩以其矿化为目标;也可以参考南岭中段黄沙坪铅锌矿的找矿模式,在深部探测“柿竹园”式钨锡多金属矿床。例如,在甲玛矿区,出露地表的是层状铅锌矿体,深部为矽卡岩型的铜金属矿体,更深部的矽卡岩型矿体还富集钨,钨的含量明显高于中浅部矿体,暗示深部具有一定的钨成矿前景(应立娟等, 2011)。因此,随着勘探的深入,在甲玛矿区深部可能产出斑岩型、甚至云英岩型钨锡矿床。又如,冈底斯泽当大型钨铜钼矿床的明则矿区具有明显的垂向分带,上部为早期层矽卡岩型铜矿,中下

部则产出斑岩型钼(钨铜)矿床;在西藏念青唐古拉成矿带哈海岗钨钼铜铅锌矿床,虽然赋矿围岩主要为上二叠统旁那组,但因其形成于燕山中期,剥蚀程度仍然相对较弱,故存在远离岩体为铜铅锌矿化、靠近岩体为钨钼矿化的水平分带性(王立强等, 2012)。这些矿床与湘南黄沙坪矿区上为铅锌、下位钨钼的分带具有一定相似性。根据王登红等(2010b)的观点,这类矿床也可以归类于“五层楼+地下室”的找矿模式中。

二是,在较高剥蚀程度的地区以寻找钨锡矿床为目标,即在较老地层单元,如古生代地层出露地区寻找钨锡矿床,这类似于在高剥蚀程度的南岭东段寻找石英脉型钨锡矿床。例如,冈底斯成矿带北部昂孜错—崩纳藏布—甲岗雪山—色日荣成矿亚带产出石英脉型甲岗雪山钨、钼、铋多金属矿床,该矿床规模达到中型,成矿时代为 21 Ma(王治华等, 2006)。不同于同时期的甲玛矿区主要出露侏罗系、白垩系等中生代地层,甲岗矿区地层以石炭系的灰岩、砂板岩和火山岩为主,说明区域遭受了较大程度的剥蚀,从而使甲岗这类成矿深度较大的中高温热液型钨锡矿床得以发现。又如,在西藏类乌齐县的石英脉型赛北弄锡矿床和月穷弄锡矿点(申屠保湧等, 1991; 董树义等, 2002),矿区主要出露三叠纪、二叠系和少量前震旦纪地层,亦是高剥蚀地区寻找中高温热液型钨锡矿床的实例。

反之,西藏的勘探工作也可以指示南岭深部的找矿工作。如西藏甲玛矿床,早期被似层状的矿体所迷惑,认为是喷流沉积型矿床,后逐渐归为斑岩-矽卡岩型矿床。该认识过程与广西大厂锡多金属矿床的认识过程相似,后者也存在似层状矿体,也曾被认为是热水沉积的产物(韩发等, 1989)。目前,甲玛矿区深部的发现了斑岩型成矿作用,这能否暗示大厂深部的隐伏花岗岩也可能发生斑岩型或者云英岩型等岩体型成矿?值得期待!

参考文献:

- 柏道远, 陈建超, 马铁球, 王先辉. 2005. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 岩石矿物学杂志, 24(4): 255-272.
- 包志伟, 赵振华, 熊小林. 2000. 广东恶鸡脑碱性正长岩的地球化学及其地球动力学意义[J]. 地球化学, 29(5): 462-468.
- 蔡明海, 陈开旭, 屈文俊, 刘国庆, 付建明, 印建平. 2006. 湘南荷花坪锡多金属矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 测年[J]. 矿床地质, 25(3): 263-268.

- 陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 蔡笔聪, 凌洪飞, 倪琦生. 1998. 赣南寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义[J]. 岩石学报, 14(3): 289-298.
- 陈毓川, 黄民智, 徐珏, 胡云中, 唐绍华, 李荫清, 孟令库. 1993. 大长锡矿地质[M]. 北京: 地质出版社: 1-361.
- 董树文, 李廷栋, 高锐, 吕庆田, 吴珍汉, 陈宣华, 周琦, 刘刚, 刘志强, 梅林. 2010. 地球深部探测国际发展与我国现状综述[J]. 地质学报, 84(6): 743-770.
- 董树义, 唐菊兴, 辛忠雷, 罗布次仁, 郭衍游. 2002. 西藏类乌齐县月穷弄锡矿点的发现及其意义[J]. 西藏地质, (2): 45-50.
- 范春方, 陈培荣. 2000. 赣南陂头 A 型花岗岩的地质地球化学特征及其形成的构造环境[J]. 地球化学, 29(4): 358-366.
- 丰成友, 丰耀东, 许建祥, 曾载淋, 余宏全, 张德全, 屈文俊, 杜安道. 2007. 赣南张天堂地区岩体型钨矿晚侏罗世成岩成矿的同位素年代学证据[J]. 中国地质, 34(4): 642-650.
- 付建明, 马昌前, 谢才富, 张业明, 彭松柏. 2005. 湖南金鸡岭铝质 A 型花岗岩的厘定及构造环境分析[J]. 地球化学, 34(3): 215-226.
- 韩发, 哈钦森 R W. 1989. 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积的证据——含矿建造及热液沉积岩[J]. 矿床地质, 8(2): 3-5.
- 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 2002. 试析杭州-诸广山-花山高 ϵNd 值花岗岩带的地质意义[J]. 地质通报, 21(6): 348-354.
- 华仁民, 李光来, 张文兰, 胡东泉, 陈培荣, 陈卫锋, 王旭东. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探[J]. 矿床地质, 29(1): 9-23.
- 李红艳, 毛景文, 孙亚利, 邹晓秋, 何红蓼, 杜安道. 1996. 柿竹园钨多金属矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄研究[J]. 地质论评, 42(3): 261-267.
- 李兆丽, 胡瑞忠, 彭建堂, 毕献武, 李晓敏. 2006. 湖南芙蓉锡矿田流体包裹体的 He 同位素组成及成矿流体来源示踪[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 31(1): 129-135.
- 梁婷, 王登红, 侯可军, 李华芹, 黄惠明, 蔡明海, 王东明. 2011. 广西大厂笼箱盖复式岩体的 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(6): 1624-1636.
- 刘国庆, 伍式崇, 杜安道, 付建明, 杨晓君, 汤质华, 魏君琦. 2008. 湘东锡田钨锡矿区成岩成矿时代研究[J]. 大地构造与成矿学, 32(1): 63-71.
- 刘珺, 叶会寿, 谢桂青, 杨国强, 章伟. 2008. 江西省武功山地区浒坑钨矿床辉钨矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 82(11): 1576-1584.
- 刘勇, 李廷栋, 肖庆辉, 耿树方, 王晓霞, 陈必河. 2011. 骑田岭花岗岩体的岩浆混合成因: 寄主岩及其暗色闪长质包体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 地质科技情报, 30(2): 19-27.
- 马丽艳, 付建明, 伍式崇, 徐德明, 杨晓君. 2008. 湘东锡田垄上锡多金属矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素定年研究[J]. 中国地质, 35(4): 706-713.
- 毛景文, 谢桂清, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329-2338.
- 彭建堂, 胡瑞忠, 毕献武, 戴童谟, 李兆丽, 李晓敏, 双燕, 袁顺达, 刘世荣. 2007. 湖南芙蓉锡矿床 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄及地质意义[J]. 矿床地质, 26(3): 237-248.
- 申屠保湧, 王增. 1991. 藏东类乌齐赛北弄锡矿床地质特征及成因类型[J]. 矿物岩石, 11(4): 74-92.
- 王登红, 陈毓川, 陈文, 桑海清, 李华芹, 路远发, 陈开礼, 林枝茂. 2004. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代[J]. 地质学报, 78(1): 132-138.
- 王登红, 陈郑辉, 陈毓川, 唐菊兴, 李建康, 应立娟, 王成辉, 刘善宝, 李立兴, 秦燕, 李华芹, 屈文俊, 王彦斌, 陈文, 张彦. 2010a. 我国重要矿产成岩成矿年代学研究新数据[J]. 地质学报, 84(7): 1030-1040.
- 王登红, 唐菊兴, 应立娟, 陈郑辉, 许建祥, 张家菁, 李水如, 曾载淋. 2010b. “五层楼+地下室”找矿模型的适用性及其对深部找矿的意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(4): 733-738.
- 王立强, 唐菊兴, 王焕, 李超, 罗炳学. 2012. 西藏哈海岗钨钼多金属矿床地质特征及辉钨矿铼-钨同位素定年[J]. 岩矿测试, 31(1): 113-119.
- 王彦斌, 王登红, 韩娟, 陈郑辉, 王清利. 2010a. 湖南益将稀土-钽矿的石英闪长岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素特征: 湘南加里东期岩浆活动的年代学证据[J]. 中国地质, 37(4): 1062-1070.
- 王彦斌, 王登红, 韩娟, 雷泽恒, 陈郑辉, 屈文俊, 许以明, 资柏忠, 王清利. 2010b. 汝城高坳背钨—钼矿区花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及矿石辉钨矿 Re-Os 年龄[J]. 地质论评, 56(6): 820-830.
- 王治华, 王科强, 喻万强, 黄辉, 吴兴泉. 2006. 西藏申扎县甲岗雪山钨钼(铋)多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄及其意义[J]. 安徽地质, 16(2): 112-115, 119.
- 肖红全, 赵葵东, 蒋少涌, 姜耀辉, 凌洪飞. 2003. 湖南东坡矿田金船塘锡铋矿床铅同位素地球化学及成矿年龄[J]. 矿床地

- 质, 22(3): 264-270.
- 许建祥, 曾载淋, 王登红, 陈郑辉, 刘善宝, 王成辉, 应立娟. 2008. 赣南钨矿新类型及“五层楼+地下室”找矿模型[J]. 地质学报, 82(7): 880-887.
- 应立娟, 王登红, 王焕, 郑文宝, 孙艳, 钟婉婷, 胡正华. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床中白钨矿的产出特征及其找矿意义[J]. 矿床地质, 30(2): 318-326.
- 雍永源. 2007. 锡和钨: 西藏冈底斯带潜在的优势矿种[J]. 沉积与特提斯地质, 27(1): 1-8.
- 曾允孚, 王正英, 田洪钧. 1982. 广西大厂龙头山矿区矿床成因新探[J]. 成都地质学院学报, (3): 15-26.
- 张起钻. 1999. 广西大厂锡多金属矿田 100 号矿体地质特征及成矿机理探讨[J]. 矿产与地质, 13(6): 324-329.
- 章荣清, 陆建军, 朱金初, 姚远, 高剑峰, 陈卫锋, 招湛杰. 2010. 湘南荷花坪花岗岩斑岩锆石 LA-MC-ICP-MSU-Pb 年龄、Hf 同位素制约及地质意义[J]. 高校地质学报, 16(4): 436-447.
- 张文兰, 华仁民, 王汝成, 李惠民, 屈文俊, 季建清. 2009. 赣南漂塘钨花岗岩成岩年龄与成矿年龄的精确测定[J]. 地质学报, 83(5): 659-670.
- CHEN Yu-chuan, HUANG Min-zhi, XU Jue, HU Yun-zhong, TANG Shao-hua, LI Yin-qing, MENG Ling-ku. 1993. The Geology of Dachang Sn deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-361(in Chinese).
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, GAO Rui, LÜ Qing-tian, WU Zhen-han, CHEN Xuan-hua, ZHOU Qi, LIU Gang, LIU Zhi-qiang, MEI Lin. 2010. International Progress in Probing the Earth's Lithosphere and Deep Interior: A Review[J]. Acta Geologica Sinica, 84(6): 743-770(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-yi, TANG Ju-xing, XIN Zhong-lei, LUOBU Ci-ren, GUO Yan-you. 2002. The Discovery and Its Significance of the Yueqiongnong Sn Ore Spot in Riowqe, Tibet[J]. Tibet Geology, (2): 45-50(in Chinese with English abstract).
- ESSER B K, TUREKIAN K K. 1993. The osmium isotopic composition of the continental crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57(13): 3093-3104.
- FAN Chun-fang, CHEN Pei-rong. 2000. Geochemical characteristics and tectonic implication of Beitou A type granitic intrusive in South Jiangxi Province[J]. Geochemica, 29(4): 358-366(in Chinese with English abstract).
- FENG Cheng-you, FENG Yao-dong, XU Jian-xiang, ZENG Zai-lin, SHE Hong-quan, ZHAN De-quan, QU Wen-jun, DU An-dao. 2007. Isotope chronological evidence for Upper Jurassic petrogenesis and mineralization of altered granite-type tungsten deposits in the Zhangqiantang area, southern Jiangxi[J]. Geology in China, 34(4): 642-650(in Chinese with English abstract).
- FU Jian-ming, MA Chang-qian, XIE Cai-fu, ZHANG Ye-ming, PENG Song-bai. 2005. Ascertainment of the Jinjiling aluminous A-type granite, Hunan Province and its tectonic settings[J]. Geochemica, 34(3): 215-226(in Chinese with English abstract).
- HAN Fa, HUTCHINSON R W. 1989. Evidence for exhalative origin for rocks and ores of the Dachang tin polymetallic field: the ore-bearing formation and hydrothermal exhalative sedimentary rocks[J]. Mineral Deposits, 8(2): 3-5(in Chinese with English abstract).
- HONG Da-wei, XIE Xi-lin, ZHANG Ji-sheng. 2002. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high- ϵ Nd granite belt[J]. Geological Bulletin of China, 21(6):

References:

- BAI Dao-yuan, CHEN Jian-chao, MA Tie-qiu, WANG Xian-hui. 2005. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton in southeast Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 24(4): 255-272(in Chinese with English abstract).
- BAO Zhi-wei, ZHAO Zhen-hua, XIONG Xiao-lin. 2000. Geochemistry of Ejiniao alkali syenite and its geodynamic significance[J]. Geochemica, 29(5): 462-468(in Chinese with English abstract).
- CAI Ming-hai, CHEN Kai-xu, QU Wen-jun, LIU Guo-qing, FU Jian-ming, YIN Jian-ping. 2006. Geological characteristics and Re-Os dating of molybdenites in Hehuaping tin-polymetallic deposit, southern Hunan Province[J]. Mineral Deposits, 25(3): 263-268(in Chinese with English abstract).
- CHEN Pei-rong, ZHANG Bang-tong, KONG Xing-gong, CAI Bi-cong, LING Hong-fei, NI Qi-sheng. 1998. Geochemical Characteristics and Tectonic Implication of Zhaibei A type Granitic Intrusives in South Jiangxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 14(3): 289-298(in Chinese with English abstract).

- 348-354(in Chinese with English abstract).
- HUA Ren-min, LI Guang-lai, ZHANG Wen-lan, HU Dong-quan, CHEN Pei-rong, CHEN Wei-feng, WANG Xu-dong. 2010. A tentative discussion on differences between large-scale tungsten and tin mineralizations in South China[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 9-23(in Chinese with English abstract).
- LI Hong-yan, MAO Jing-wen, SUN Ya-li, ZOU Xiao-qiu, HE Hong-liao, DU An-dao. 1996. Re-Os isotopic chronology of molybdenites in the Shizhuyuan polymetallic tungsten deposit, southern Hunan[J]. *Geological Review*, 42(3): 261-267(in Chinese with English abstract).
- LI Zhao-li, HU Rui-zhong, PENG Jian-tang, BI Xian-wu, LI Xiao-min. 2006. Helium isotope composition of fluid inclusions and the origin of ore-forming fluids of Furong tin orefield in Hunan province, China[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 31(1): 129-135(in Chinese with English abstract).
- LIANG Ting, WANG Deng-hong, HOU Ke-jun, LI Hua-qi, HUANG Hui-ming, CAI Ming-hai, WANG Dong-ming. 2011. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating of Longxianggai pluton in Dachang of Guangxi and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1624-1636 (in Chinese with English abstract).
- LIU Guo-qing, WU Shi-chong, DU An-dao, FU Jian-ming, YANG Xiao-jun, TANG Zhi-hua, WEI Jun-qi. 2008. Metallogenic ages of the xitian tungsten-tin deposit, eastern hunan province[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(1): 63-71(in Chinese with English abstract).
- LIU Jun, YE Hui-shou, XIE Gui-qing, YANG Guo-qiang, ZHANG Wei. 2008. Re-Os dating of molybdenite from the Hukeng tungsten deposit in the Wugongshan area, Jiangxi Province, and its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11): 1576-1584(in Chinese with English abstract).
- LIU Yong, LI Ting-dong, XIAO Qing-hui, GENG Shu-fang, WANG Xiao-xia, CHEN Bi-he. 2011. Qitianling Granite Magma Mixing Origin: The Host Rock and Its Microgranular Dioritic Enclaves of Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope Evidence[J]. *Geological Science and Technology Information*, 30(2): 19-27(in Chinese with English abstract).
- MA Li-yan, FU Jian-ming, WU Shi-chong, XU De-ming, YANG Xiao-jun. 2008. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating of the Longshang tin-polymetallic deposit, Xitian orefield, eastern Hunan[J]. *Geology in China*, 35(4): 706-713(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, XIE Gui-qing, GUO Chun-li, CHEN Yu-chuan. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Naming region south China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2329-2338(in Chinese with English abstract).
- PENG Jian-tang, HU Rui-zhong, BI Xian-wu, DAI Tong-mo, LI Zhao-li, LI Xiao-min, SHUANG Yan, YUAN Shun-da, LIU Shi-rong. 2007. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating of tin mineralization in Furong deposit of Hunan Province and its geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 26(3): 237-248(in Chinese with English abstract).
- SHENTU Bao-yong, WANG Zeng. 1991. The characteristics and origin type of the Leiwuqi Saibeinong tin deposit, eastern Xizang[J]. *Mineralogy and Petrology*, 11(4): 74-92(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, CHEN Wen, SANG Hai-qing, LI Hua-qin, LU Yuan-fa, CHEN Kai-li, LIN Zhi-mao. 2004. Dating the Dachang giant tin-polymetallic deposit in Nandan, Guangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 132-138(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, CHEN Wen, SANG Hai-qing, LI Hua-qin, LU Yuan-fa, CHEN Kai-li, LIN Zhi-mao. 2004. Dating of the Dachang superlarge tin-polymetallic deposit in Guangxi and its implication for the genesis of the No. 100 orebody[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 452-458.
- WANG Deng-hong, CHEN Zhen-hui, CHEN Yu-chuan, TANG Ju-xing, LI Jian-kang, YING Li-juan, WANG Cheng-hui, LIU Shan-bao, LI Li-xing, QIN Yan, LI Hua-qin, QU Wen-jun, WANG Yan-bin, CHEN Wen, ZHANG Yan. 2010a. New data of the rock forming and ore-forming chronology for China's important mineral resources areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(7): 1030-1040(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, TANG Ju-xing, YING Li-juan, CHEN Zheng-hui, XU Jian-xiang, ZHANG Jia-jing, LI Shui-ru, ZENG Zai-lin. 2010b. Application of "Five levels + Basement" Model for Prospecting Deposits into Depth[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(4): 733-738(in Chinese with English abstract).

- WANG Li-qiang, TANG Ju-xing, WANG Huan, LI Chao, LUO Bing-xue. 2012. Geological Characteristics and Re-Os Dating of the Hahaigang W-Mo Polymetallic Deposit, Tibet[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 31(1): 113-119(in Chinese with English abstract).
- WANG Yan-bin, WANG Deng-hong, HAN Juan, CHEN Zheng-hui, WANG Qing-li. 2010a. U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of zircons from quartz-diorite in the Yijiang REE-Sc deposit, Rucheng County, Hunan: constraints on the timing of Caledonian magmatic activity in South China[J]. *Geology in China*, 37(4): 1062-1070(in Chinese with English abstract).
- WANG Yan-bin, WANG Deng-hong, HAN Juan, LEI Ze-heng, CHEN Zheng-hui, QU Wen-jun, XU Yi-ming, ZI Bai-zhong, WANG Qing-li. 2010b. U-Pb Dating and Hf Isotopic Characteristics of Zircons and Re-Os Dating of Molybdenite from Gao'aobei Tungsten—molybdenum Deposit, Southern Hunan Province[J]. *Geological Review*, 56(6): 820-830(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhi-hua, WANG Ke-qiang, YU Wan-qiang, HUANG Hui, WU Xing-quan. 2006. Re-Os isotopic ages of tungsten-molybdenum (Bismuth) poly-metallic ore deposit in the Jiagang Snowy Mountain, Shenzha county, Tibet and the implications[J]. *Geology of Anhui*, 16(2): 112-115, 119(in Chinese with English abstract).
- XIAO Hong-quan, ZHAO Kui-dong, JIANG Shao-yong, JIANG Yao-hui, LING Hong-fei. 2003. Lead Isotope Geochemistry and Ore-forming Age of Jinchuantang Sn-Bi Deposit in Dongpo Ore Field, Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 264-270(in Chinese with English abstract).
- XU Jian-xiang, ZENG Zai-lin, WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, LIU Shan-bao, WANG Cheng-hui, YING Li-juan. 2008. A New Type of Tungsten Deposit in Southern Jiangxi and the New Model of "Five Floors + Basement" for Prospecting Download Fulltext[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(7): 880-887(in Chinese with English abstract).
- YING Li-juan, WANG Deng-hong, WANG Huan, ZHENG Wen-bao, SUN Yan, ZHONG Wan-ting, HU Zheng-hua. 2011. Occurrence feature of scheelite from Jiama copper polymetallic deposit in Tibet and its ore-prospecting significance[J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 318-326(in Chinese with English abstract).
- YONG Yong-yuan. 2007. Tin and tungsten: potential dominant mineral species in the Gangdise belt, Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 27(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- ZENG Yun-fu, WANG Zheng-ying, TIAN Hong-jun. 1982. New consideration on the origin of cassiterite-sulfide deposits in Longtou Mountain, Dachang, Guangxi[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, (3): 15-26(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qi-zuan. 1999. Geological Characteristics And Genetic Mechanism Of The No. 100 Ore Body In Dachang Tin Polymetallic Ore Field, Guangxi[J]. *Mineral Resources and Geology*, 13(6): 324-329(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Rong-qing, LU Jian-jun, ZHU Jin-chu, YAO Yuan, GAO Jian-feng, CHEN Wei-feng, ZHAO Zhan-jie. 2010. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Compositions of Hehuaping Granite Porphyry, Southern Hunan Province, and its Geological Significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 16(4): 436-447(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wen-lan, HUA Ren-ming, WANG Ru-cheng, LI Hui-ming, QU Wen-jun, JI Jian-qing. 2009. New Dating of the Piaotang Granite and Related Tungsten Mineralization in Southern Jiangxi[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(5): 659-670(in Chinese with English abstract).
- ZHU Jin-chu, WANG Ru-cheng, ZHANG Pei-hua, XIE Cai-fu, ZHANG Wen-lan, ZHAO Kui-dong, XIE Lei, YANG Ce, CHE Xu-dong, YU A-peng, WANG Lu-bin. 2009. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China[J]. *Science in China Serial D: Earth Science*, 52(9): 1279-1294.