

广东天堂山铷锡多金属矿床成矿地质特征及其成因

刘铁生¹, 陈文辉², 黄翔宽³, 曹运江⁴, 叶顺⁵, 赵彦名⁴

(1. 湖南省地质矿产勘查开发局 408 队, 湖南 郴州 412300; 2. 湖南省地质矿产勘查开发局 418 队, 湖南 娄底 417000; 3. 四川广旺能源发展(集团)有限责任公司, 四川 广元 628017; 4. 湖南科技大学煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 5. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083)

摘要: 广东天堂山铷锡多金属矿床位于 NNE 向武夷山多金属成矿带南段与南岭纬向多金属成矿带东端的交汇部位。通过对广东天堂山铷锡多金属矿体的地质特征、成矿特征的研究, 查明矿体主要赋存于上侏罗统高基坪群第二亚群火山岩及其构造破碎蚀变带、节理裂隙蚀变带和花岗岩岩体隆起部位, 其中侏罗系上统高基坪群第二亚群火山岩岩石主要成矿元素 Rb 的背景浓度较高, 该地层是铷矿(化)体的主要赋矿层位。通过地质特征和地球化学证据认为矿物质来源与火山岩和燕山期岩体有关, 区内角闪型铷矿、云英岩型铷矿、钠长石化花岗岩型铌钽矿、构造破碎蚀变带(岩)型锡矿、云英岩型钨锡矿及细脉浸染型锡矿、铅锌矿、铜矿矿床成因是以岩浆期后气成-热液充填交代作用为主的多阶段、多期次成矿的, 是在不同的演化阶段、不同的成矿地质条件及不同的部位形成的具成因联系的一组矿床。

关键词: 广东省天堂山; 铷锡多金属矿; 地质特征; 矿床成因; 成矿模式

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.01.013

中图分类号: TD983 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)01-0104-12

矿区位于广东龙川县城 11°方向麻布岗镇, 根据测区 Ag、Sn、Pb、Zn、Cu 主要成矿元素特征和成矿地质条件划分出 6 个找矿远景区, 其中 I 类 2 个, II 类 1 个, III 类 3 个, 其中天堂山矿区位于 I-2 远景区。经中国矿业联合会组织专家评审, 天堂山矿区铷锡多金属矿床铷储量达 17.56 万 t, 锡储量 763 t, 是迄今为止世界上探明的首个超大型独立铷矿床, 也是世界上罕见的“较易选、易取”的铷矿床^[1]。

章涛等对广西栗木钨锡多金属矿区铷矿床研究认为铷金属矿化随着岩浆分异而逐渐增强, 栗木矿区铷金属主要产于花岗岩中^[2]。邱增旺等对大道山锡矿床研究认为, 在侏罗系斑状花岗岩和下侏罗统金鸡组沉积围岩中的锡矿化被认为与花岗岩有关, 大道山花岗质岩浆的还原和高度分馏性质可能在锡矿化中发挥了关键作用^[3]。姜海等

对广东北部石人杖钨矿床成矿作用研究认为, 钨-锡矿化与隐藏的花岗岩岩石有遗传联系。分级结晶和熔体-流体相互作用对钨-锡矿化起重要作用^[4]。对于麻布岗地区的矿床研究中, 林长慧据附近金石嶂、矿山宝等矿点及麻布岗火山岩盆地银铅锌矿床成矿规律, 认为龙川麻布岗火山岩盆地棉径矿区区内具有很好的寻找火山-次火山热液型多金属矿床的找矿前景^[5], 罗卫等认为麻布岗火山盆地区域地质背景、成矿地质条件与上杭火山盆地形成的紫金山铜金矿床成矿条件相似, 具有优越的多金属矿的成矿地质条件, 是寻找大中型多金属矿床的有利盆地^[6]。孙宁等认为麻布岗火山盆地南缘上侏罗统火山盆地盖层深部为夕卡岩型矿体及热液充填型矿体的产出层位^[7], 覃忠对广东龙川麻布岗小长沙铁多金属矿区研究认为, 已知矿体以夕卡岩型金属矿体为主, 夕卡

收稿日期: 2020-11-13

基金项目: 湖南省自然科学基金项目资助(2020JJ4020、2018JJ2114)

作者简介: 刘铁生(1968-), 男, 高级工程师, 长期从事地质找矿及研究。

通信作者: 曹运江(1967-), 男, 教授, 博士, 长期从事地质资源与地质工程方面的教学与研究。

岩型金属矿体具有接触交代矿床的成因特征^[8-9]。通过对天堂山钨锡多金属矿床的研究，贾宏翔等认为可能为锡石-云英岩型矿床^[10-11]。由于天堂山多金属矿区成矿条件优越，国内专家学者对其进行各类研究，却未能认识到天堂山多金属矿床的主要成因和火山岩和燕山期岩体与矿床在成因上的联系未能够充分认识。因此，本文在结合前人研究成果基础上，针对矿床成因问题，对该矿床的地质特征、矿床成因等方面展开全面研究，提出天堂山成矿模式，为后续进一步找矿提供理论依据。

1 区域地质背景

广东天堂山位于NNE向武夷山多金属成矿带南段与南岭纬向多金属成矿带东端的交汇部位（图1），区域NE向基底焦岭-增城-腰鼓-云开复背斜带北东段、河源深断裂带的北西侧与贵东大山-浏源-罗浮EW向深断裂带交汇处，区域浙闽粤火山喷发带（Ⅱ级）之新丰-连平火山喷发带

（Ⅲ级）麻布岗晚侏罗世火山喷发盆地中北部。

区域内地层除前震旦系、奥陶系、三叠系和新近系缺失外，其他皆有出露。震旦系为一套巨厚的浅海相类复理石碎屑岩建造；中泥盆统为滨海相碎屑岩建造；下二叠统以滨海相泥砂碎屑岩为主，但多遭受剥蚀和掩盖；上侏罗统为陆相火山岩和碎屑岩建造；白垩系和古近系以内陆湖河相红色碎屑岩建造为主，火山岩建造次之。中新世和大区域一样，多呈NE或NNE向展布。

区域内地质构造较简单。褶皱构造主要为分布于区域中部矿山宝~野猪嶂一带，以上侏罗统高基坪群的中酸性火山岩组成核部的大长沙向斜；断裂构造以NE~NNE向为主，次为NW向和近EW向，其中以NE~NNE向压扭性断裂最为发育。构造盆地主要为麻布岗构造盆地，面积约150 km²，基底以加里东期的混合花岗岩、片麻状混合岩、云母片岩及印支期的花岗闪长岩和燕山期的花岗岩为主，其次是盆地南部见少量前泥盆系浅变质砂岩、千枚岩。盖层岩性主要由侏罗

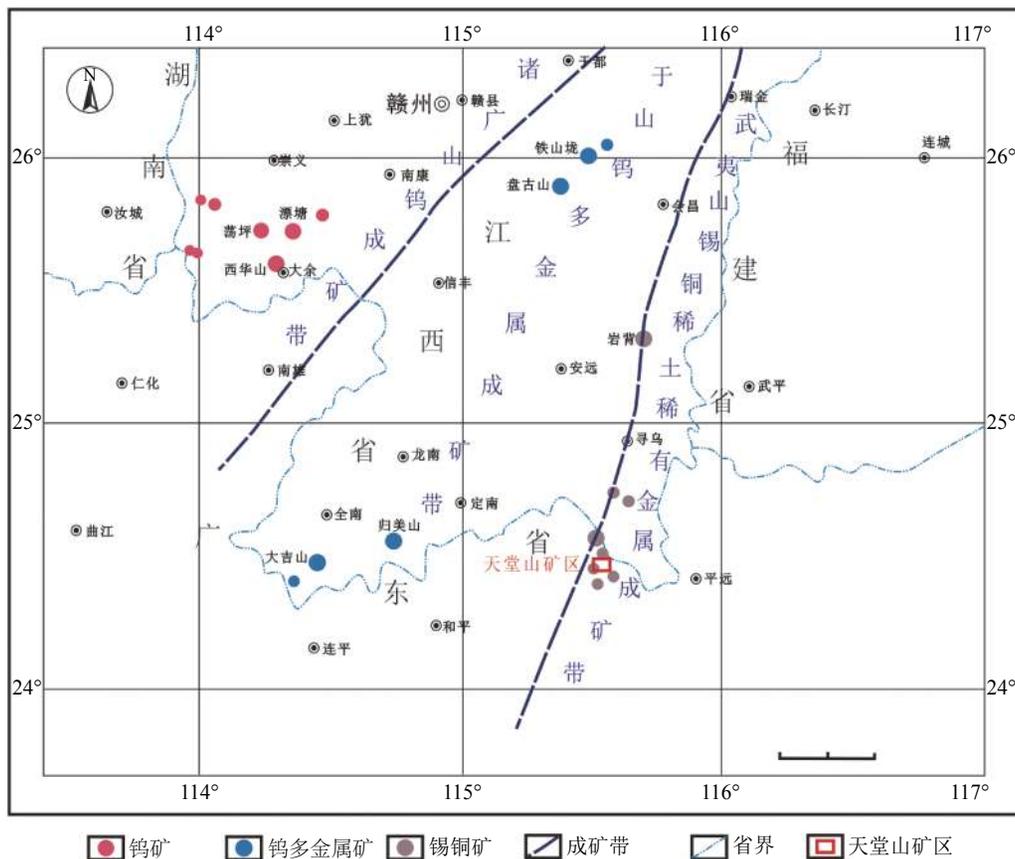


图1 南岭成矿带南段与武夷山多金属成矿带南段成矿区带

Fig.1 Ore-forming zone in the southern section of the Nanling metallogenic belt and the southern section of the Wuyishan polymetallic metallogenic belt

系的一套中酸性火山岩及沉积岩层组成。

区域岩浆活动频繁，多期次而强烈，从加里东期至燕山期，每次构造活动都伴随相应的岩浆活动。燕山期为区内最主要的构造岩浆活动期，分布面广，遍及全区，岩浆侵入-火山喷发均十分强烈，以酸性岩类为主，侵入体不规则，呈大小不一的岩体产出，分别呈 NW-NWW、SN 向或 NE 向延伸。火山岩主要为侵入于白垩系中的流纹斑岩、流纹质熔结凝灰岩及侏罗系中的安山玢岩、安山凝灰岩等。

区域变质作用较发育，变质作用时期主要在加里东期，有区域动力、热力变质及混合岩化作用，相应形成了区域变质岩、混合岩、混合花岗岩。其混合岩化的时代为早、中侏罗世。

2 矿区地质特征

2.1 地层岩性

矿区内出露的地层有上侏罗统高基坪群第二亚群中酸性火山岩和第四系等，其中上侏罗统均为喷出相产物，岩石普遍遭受钾长石化、硅化、黑云母化、绢云母化、绿泥石化等蚀变。按其岩性组合特征自下而上分为三个岩性段。

第四系分布山间低洼处，主要为残坡积层，局部可见冲积层，零星分布。

2.2 地质构造

矿区内断裂构造较发育（图 2），矿区位于上侏罗统麻布岗火山岩盆地北西部，区内褶皱不发育，但断裂构造、节理裂隙较发育。地层总体走向 NE，倾向 SE，倾角一般 25~45°，总体呈一向 SE 倾斜的单斜构造。

按其走向可将矿区内断裂构造划分为近 SN 向（F₈）、NNE 向（F₂、F₄、F₁₀₋₂）、NE 向（F₃）、和 NW 向（F₅、F₆）四组。按其成生发展及矿化作用可划分为成矿前断裂、成矿期断裂、成矿后断裂，断裂特征各异。

2.3 岩浆岩

矿区内岩浆岩主要为燕山第四期（ γ_5^3 （1））产物，为浅成-超浅成的侵入花岗岩体，岩性主要有碱长花岗岩、花岗斑岩及石英斑岩。由于该花岗斑岩及石英斑岩与火山岩同源，空间上受火山成因构造控制，时间上与火山岩同时或稍晚，所以也称其为次火山岩。碱长花岗岩主要呈岩株状

产出，花岗斑岩及石英斑岩呈岩脉状产出。

2.4 围岩蚀变

矿区岩石较普遍发生了强弱不等、类型不一的蚀变，由于岩浆热液的影响及围岩性质的不同，围绕断裂破碎带及成矿岩体，不同的部位发育不同的热液蚀变，形成不同的蚀变岩和蚀变分带。

矿区蚀变种类主要有硅化、黄玉化、云英岩化、钠长石化、黑云母化、绢云母化、绿泥石化、萤石化及角岩化、黏土化、赤铁矿化、褐铁矿化等。其中黑云母化、绢云母化、绿泥石化与铀矿化关系密切，强硅化、云英岩化、黄玉化、赤铁矿化蚀变与钨锡矿化关系密切；硅化绢云母化绿泥石化蚀变则与 Cu、Pb、Zn 矿化较为密切。

3 成矿特征

3.1 矿体特征

矿区存在六种矿体类型，角砾岩型铀矿体、云英岩型铀矿体、构造破碎蚀变带（岩）型锡矿体、云英岩型钨锡矿体、隐爆角砾岩型铅锌矿体和细脉浸染型锡矿体、铅锌矿体、铜矿体（表 1）。矿区共圈定 28 个独立铀矿体，角砾岩型铀矿体的主要矿体 2 个，云英岩型铀矿体的主要矿体 1 个；其中角砾岩型铀矿体 1 号呈不规则马鞍、厚板状，北部倾向为南西西倾、南部倾向为北东东倾，倾角为 10~55°，矿体长度为 675 m，平均视厚度为 197.67 m，矿体平均品位为 0.119%。角砾岩型铀矿体 2 号呈不规则厚板状，倾向为东倾，倾角为 26~44°，矿体长度为 475 m，平均视厚度为 25.77 m，矿体平均品位为 0.107%。云英岩型铀矿体呈不规则薄-厚板状，倾向为东倾，倾角 0~23°，矿体长度为 450 m，平均视厚度为 38.49 m，矿体平均品位为 0.096%。主矿体具中型规模、形态较简单、构造影响程度小、厚度变化较稳定、品位变化均匀等特点，其勘查类型属 II 类。其它铀矿体规模大小不一，均属小型；形态较简单，构造影响程度小，品位变化均匀~较均匀、厚度变化稳定~不稳定，勘查类型为 III 类。矿区矿体平均品位 0.119%。矿区共圈定 96 个锡矿体。其中构造破碎蚀变带（岩）型锡矿体 15 个，细脉浸染型锡矿体 81 个。构造破碎蚀变带（岩）型锡矿体的规模、形态及产状严格受断裂破碎蚀变带

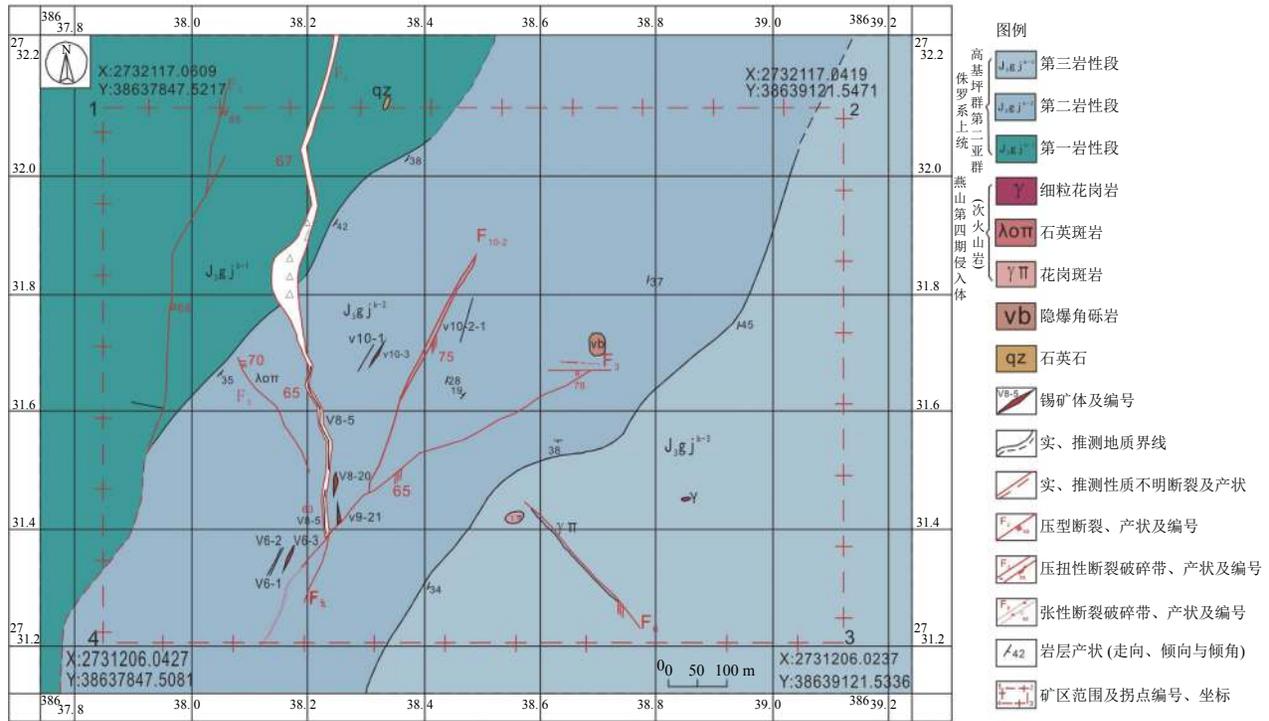


图2 矿区地质构造

Fig.2 Geological structure map of mining area

表1 矿区内主要矿体、矿石类型及其特征

Table 1 Main ore body types and their characteristics in the mining area

| 类型 | 亚类 | 与铷矿体关系 | 矿区所圈矿体数/个 |
|------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------|
| 铷矿体 | 据Rb ₂ O的品位，按工业指标划分 | 工业矿体 | / |
| | | 低品位矿体 | |
| | | 角岩型铷矿体 | |
| | 按围岩蚀变程度划分 | 云英岩型铷矿体 | 28 |
| 锡矿体 | 构造破碎蚀变带（岩）型锡矿体，次为细脉浸染型锡矿体 | 分布于火山岩，叠加于角岩型铷矿体，与角岩型铷矿体呈异体共生 | 96 |
| 钨锡矿体 | 隐伏矿体，矿体围岩为火山岩或细粒-细中粒黑云母花岗岩或石英斑岩或云英岩 | 与云英岩型铷矿体属异体共生，含矿岩石为云英岩 | 22 |
| 铅锌矿体 | 隐爆角砾岩型铅锌矿体、细脉浸染型铅锌矿体、铜矿体 | 分布于火山岩，叠加于角岩型铷矿体之内，与角岩型铷矿体呈异体共生 | 11 |

（岩）的控制，以受 F₈ 断裂破碎带控制的规模最大，规模属中型，勘查类型属 II 类；其他矿体规模属小型，勘查类型属 III 类。细脉浸染型锡矿体的规模及形态、产状严格受节理裂隙蚀变强弱和蚀变带（岩）的控制，规模大小不一，均以陡倾斜为主要特征，规模均属小型，勘查类型属 III 类。圈定钨矿体或钨锡共生矿（化）体 40 个，主要矿体 14 个，矿体规模均属小型。矿区共划分为隐爆角砾岩型铅锌矿体 2 个及细脉浸染型铅锌矿

体 5 个、细脉浸染型铜矿体 4 个。

3.2 矿石特征

广东天堂山铷锡多金属矿床矿石特征见表 2，矿石类型依据工业类型划分。

通过对含铷粗安岩、粗面岩、石英斑岩、凝灰熔岩和赤铁矿化类矿石、云英岩工艺矿物学研究，Rb₂O 主要呈类质同像形式赋存于黑云母（含水黑云母）、绿泥石、绢云母和钾长石四种矿物

表 2 广东天堂山铷锡多金属矿床矿石特征
Table 2 Ore characteristics of rubidium tin polymetallic deposit in tiandenshan, guangdong

| 类别 | 矿石矿物 | 稀有放射性矿物 | 脉石矿物 | 少量及微量矿物 | 矿石类型 |
|--------|-----------------------|------------------------|-----------------------------|--|---|
| 铷矿 | 黑云母和水黑云母、锂云母 | 锆石、独居石、钽石、磷灰石、铌铁矿、钽铌铁矿 | 主要为石英、黄玉，次为钾长石、斜长石、绢云母、绿泥石 | / | / |
| 锡矿 | 锡石、黑云母、黄铜矿、黑钨矿 | / | 石英、绢云母、长石、黑云母、黄玉、萤石、高岭土、绿泥石 | / | / |
| 钨锡矿 | 黑钨矿、锡石、云母，黄铜矿、方铅矿、闪锌矿 | 锆石、独居石、钽石、磷灰石、铌铁矿、钽铌铁矿 | 主要为石英、黄玉、高岭土、萤石、长石、绢云母、绿泥石等 | / | 粗安质角砾熔岩、粗安质晶屑（岩屑）凝灰熔岩、粗面安山岩、粗安质熔结凝灰岩，局部存在熔结凝灰岩、含角砾粗熔结凝灰岩、隐爆角砾岩等矿石 |
| 铅锌矿及铜矿 | 铅锌矿 | 方铅矿、闪锌矿，黄铜矿、黑云母等 | 石英、萤石、长石、绢云母、绿泥石 | 锂云母-石英型、钾长石-锂云母-石英型等矿石 | 褐铁矿、赤铁矿、黄铁矿、辉铋矿、斑铜矿、铜蓝等 |
| | 铜矿 | 黄铜矿，次为辉铜矿、斑铜矿、铜蓝、黑云母等 | 石英、长石、白云母、绢云母、绿泥石等 | 赤铁矿-锡石、黄铜矿-黄铁矿-锡石、石英-黑钨矿-锡石等矿石 | 褐铁矿、赤铁矿、蓝辉铜矿、黄铁矿、锡石、白铁矿、辉铋矿、辉铜矿等 |
| | | | | 石英-黄玉-黑钨矿-锡石、石英-黄玉-黑钨矿、石英-黄玉-锡石等矿石 | |
| | | | | 铅锌银、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等矿石 黄铜矿、黄铜矿-辉铜矿、黄铜矿-辉铜矿-黄铁矿等矿石 | |

中， Rb_2O 的分配率分别为 17.15%、9.12%、50.29% 和 19.00%，少量赋存于粘土矿物和石英中，分别为 3.95% 和 0.49%；其他矿物不含 Rb_2O 。通过化学物相分析矿石中 Sn 元素主要以锡石 Sn 的状态存在，仅有少量硫化锡、含锡硅酸盐类矿物产出，锡石 Sn 在矿石中的占有率达 88.30%~91.32%，其他状态仅为 8.68%~11.70%。矿石中钨元素主要以黑钨矿的状态存在，次为白钨矿和钨华。黑钨矿 WO_3 在矿石中占有率为 82.57%~91.43%，其他状态仅为 8.57%~17.43%。矿石中的 Pb 元素以硫化铅的方铅矿矿物状态为主要赋存形式，其次有少量的结合相、氧化物相铅矿物产出。矿石中的 Zn 元素以硫化锌的闪锌矿矿物状态为主要赋存形式，其次有少量的结合相、氧化物相锌矿物产出。矿石中 Cu 主要以硫化物相中的铜的矿物形式

出现，次为结合相、氧化物相中的铜。

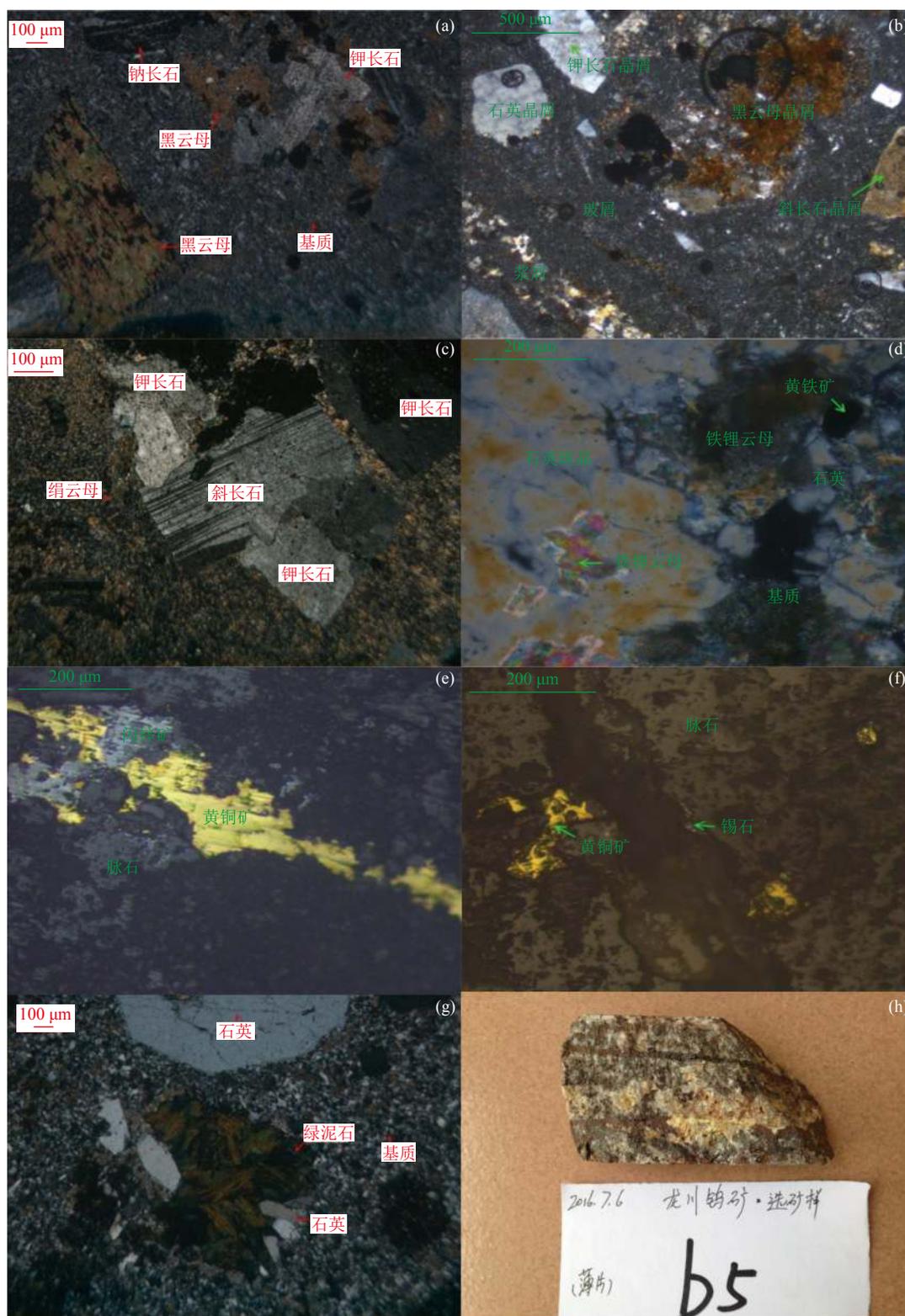
3.3 矿石结构构造

多期次的岩浆活动使区内多次成矿，且矿床类型多，有用矿物生成的方式各异，矿石的结构构造则不同，矿石结构主要包括斑状结构、片状粒状变晶结构、粗面结构、强熔结凝灰结构、半自形~自形粒状结构、他形粒状结构、镶嵌结构、乳浊状结构、交代结构、连生结构、碎裂结构，矿石构造主要为块状构造、角砾状构造、杏仁状构造、脉状构造、细脉浸染状构造。部分结构构造见图 3。

3.4 成矿期次

3.4.1 成矿期与成矿阶段的划分

据矿石结构、构造和矿物共生组合关系，矿区铷矿床成矿过程可划分为岩浆晚期结晶分异-交



a 粗面安山岩呈斑状结构，由钠长石、钾长石、黑云母斑晶和结晶微细的基质组成；b 粗面安山岩呈粗面结构，由斜长石斑晶和微细结晶的基质组成；c 含角砾粗安质熔结凝灰岩呈熔结凝灰结构；d 余斑状结构，基质为鳞片粒状变晶结构；e 黄铜矿闪锌矿矿石中的闪锌矿呈半自形晶粒结构；闪锌矿中常有细小固体的分离形成的乳浊状黄铜矿，形成乳浊状结构；f 含黄铜锡石矿石中的它形粒状结构，主要为黄铜矿呈它形晶粒状，粒径 0.01~0.08 mm；g 石英斑岩中绿泥石与疏状石英充填于气孔中，呈杏仁状构造；h 金属矿物沿着岩石的裂隙穿插，形成脉状构造

图3 矿石结构构造

Fig.3 Ore structure

代期, 岩浆晚期结晶分异-期后气液交代期, 岩浆期后气成-热液作用期三个成矿期。

(1) 成矿前期, 岩浆晚期结晶分异-交代期主要为碱交代阶段, 该阶段的蚀变矿化从碱交代开始, 碱交代始于岩浆晚期自变质作用。

(2) 成矿早期, 岩浆晚期结晶分异-期后气液交代期主要为黄玉云英岩化阶段, 该阶段主要表现为形成大量硅酸盐矿物黄玉, 云英岩中可见黄铁矿化, 并可见自形锡石、自形柱状~短柱状黑钨矿等。

(3) 主成矿期, 岩浆期后气成-热液作用期, 具体可分为两个阶段。首先是最主要的成矿阶段, 锡石-黑钨矿氧化物阶段, 该阶段主要形成本区的石英脉型锡石黑钨矿矿体和云英岩型钨锡矿体, 以及沿早期构造破碎带和节理裂隙带形成铷锡多金属矿。坑道中可见到石英脉与强烈蚀变的云英岩接触部位以及外接触带的围岩中发育黑云母化, 使围岩中 Rb 富集成矿。通过镜下观察, 可见到锡石、黑钨矿交代早期形成的黄玉, 此外晚形成的赤铁矿呈网脉状交代黄玉、黄铁矿、黑钨矿, 锡石与黑钨矿相伴或各自独立产出。主成矿期的另一个成矿阶段是石英-萤石多金属硫化物阶段, 此阶段发育大量金属硫化物及硫酸盐矿物: 主要为黄铜矿、闪锌矿、方铅矿, 次为辉钼矿、毒砂、辉铋矿等。镜下可见到硫化物脉体由边部到中央依次为铁白云母-锡石-黄铜矿和闪锌矿的顺序, 以及黄铜矿交代锡石的现象。

3.4.2 矿物生成顺序

据上述天堂山多金属矿床矿物的共生组合即矿物之间的关系, 可将天堂山多金属矿床的成矿过程分为 3 个成矿期次和 4 个成矿阶段(表 3)。

4 矿床成因探讨

4.1 控矿因素

4.1.1 岩性对成矿的控制

(1) 岩性的含矿性

依据表 4, 侏罗系高基坪群第二亚群粗安质角砾熔岩、粗安质晶屑(岩屑)凝灰熔岩、粗面安山岩、粗安质熔结凝灰岩、含角砾粗安质熔结凝灰岩、云英岩, 岩石中主要成矿元素 Rb、W、Sn、Cu、Pb、Zn、F 含量均较高, 呈富集趋势, 在有利的构造和岩浆活动等条件下有可能富集成矿。

(2) 岩性的控矿作用

上侏罗统高基坪群第二亚群粗面安山岩、粗安质熔结凝灰岩、含角砾粗安质熔结凝灰岩虽岩石性质不活泼, 但具较高的刚性, 在各种构造应力作用下, 易破碎, 产生大量的节理、裂隙而成为岩浆期后矿液运输和沉淀的场所, 从而形成构造蚀变带(岩)型锡多金属矿; 也由于岩浆的侵入, 使岩石发生强烈的硅化、黑云母化、绿泥石化、绢云母化蚀变, 岩石变质形成角岩化和角岩带, 岩石中铷元素相对富集成角岩型铷矿。

(3) 蚀变岩体控矿作用

花岗岩顶部的石英斑岩由于热液蚀变广泛, 均已发生其强烈的云英岩化形成云英岩, 并叠加有晚期的绿泥石化蚀变。强烈云英岩化的石英斑岩体与矿化密切相关。云英岩化石英斑岩由浅部到深部黄铁矿化变得强烈, 并且镜下观察发现, 云英岩化石英斑岩普遍含矿, 可见矿石矿物有锡石、黑钨矿、辉铋矿、黄铁矿等。

4.1.2 构造对成矿的控制

(1) 断裂破碎蚀变带(岩)的控矿作用

矿区位于麻布岗火山岩盆地, 处于河源深断裂带的 NW 侧与贵东大东山—浏源—罗浮 EW 向深断裂带交汇处, 与其相伴生各组构造破碎带矿区较发育。由于岩浆的侵位, 早期断裂进一步活化, 含矿热液中 Sn、W 等则沿断裂破碎带充填交代形成构造破碎蚀变带(岩)型锡多金属矿体。

(2) 节理裂隙的控矿作用

岩浆侵入时沿岩体隆起方向, 外接触带岩石中相伴生呈放射性密集发育的节理、裂隙, 同时发生充填交代相应成为细脉浸染型锡铜铅锌矿脉的赋矿场所。

4.1.3 岩浆岩对成矿的控制

岩石化学资料表明岩石为准铝质-弱过铝质、壳源铝质 A 型花岗岩, 并且分异演化程度比较高。区内 W、Sn、Pb、Zn 等矿产主要与岩浆活动有关, 不同阶段岩体侵入均伴有不同类型和强度的矿化作用, 岩浆活动不仅提供了成矿物质和汽水热液, 而且控制了矿床的分布。

4.1.4 蚀变与成矿

矿区内蚀变种类多, 与矿床形成有关的蚀变

表3 成矿期次及矿物生成顺序
Table 3 Mineralization stage and formation order of minerals

| 成矿期 成矿阶段 矿物 | 岩浆晚期结晶 分异-交代 | 岩浆晚期结晶 分异-期后气液交代 | 岩浆期后气成-热液作用 | |
|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| | 交代阶段 | 黄玉云英岩化 阶段 | 锡石-黑钨矿 氧化物阶段 | 石英-萤石多金属 硫化物阶段 |
| 钾长石 | ██████████ | | | |
| 钠长石 | ██████████ | | | |
| 黑云母 | ██████████ | | | |
| 黄玉 | | ████████████████████ | | |
| 石英 | ████████████████████ | | | |
| 铁白云母 | | ██████████████████ | | |
| 黄铁矿 | | ████████████████████ | | |
| 黑钨矿 | | ██████████████████ | ██████████████ | |
| 锡石 | | ██████████████████ | ██████████████ | |
| 辉钼矿 | | | | ██████████████ |
| 毒砂 | | | | ██████████████ |
| 辉铋矿 | | ██████████ | | ██████████████ |
| 磁铁矿 | | | ██████████████ | |
| 赤铁矿 | | | ██████████ | |
| 萤石 | | | ██████████████████ | |
| 绿泥石 | | | ██████████████████ | |
| 绢云母 | | | | ██████████████ |
| 黄铜矿 | | ██████████ | | ██████████████ |
| 闪锌矿 | | ██████████ | | ██████████████ |
| 方铅矿 | | | | ██████████████ |
| 斑铜矿 | | | | ██████████████ |
| 辉铜矿 | | | | ██████████████ |
| 自然铋 | | | | ██████████████ |
| 辉铅铋矿 | | | | ██████████████ |
| 斜方辉铅铋矿 | | | | ██████████████ |

表4 X 荧光光谱半定量检测结果 /%
Table 4 X-ray fluorescence spectrum semi-quantitative test result

| 岩性 | Rb | Sn | W | Cu | Pb | Zn | F |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 粗安质熔结凝灰岩 | 0.15 | 0.042 | 0.046 | 0.14 | 0.025 | 0.15 | 1.41 |
| 粗面安山岩 | 0.18 | 0.015 | 0.042 | 0.007 | 0.019 | 0.023 | 1.37 |
| 含角砾粗安质熔结凝灰岩 | 0.20 | 0.035 | 0.033 | 0.014 | 0.21 | 0.14 | 1.23 |
| ※酸性火山岩/ppm | 200 | 3 | - | 20 | 20 | 60 | 800 |
| 云英岩 | 0.13 | 0.008 | 0.061 | 0.008 | 0.12 | 0.12 | 1.07 |

※根据A·II·BHHorpa II oB, 1962

主要有赤铁矿化、硅化、黄玉化、云英岩化、黑云母化、绿泥石化、绢云母化、萤石化及黏土化等，蚀变的强弱程度是使矿化富集的主要因素。强硅化、云英岩化、黑云母化、绿泥石化、绢云母化与铷矿化关系密切；强硅化、黄玉化、云英岩化、赤铁矿化蚀变与钨锡矿化关系密切；硅化、黄玉化、赤铁矿化、绢云母化、绿泥石化蚀变则与 Cu、Pb、Zn 矿化较为密切，黏土化蚀变大致环绕绢云母化、绿泥石化蚀变带分布，有时穿插在绢云母化、绿泥石化带中。

4.2 矿化富集规律

4.2.1 矿床空间分布规律

(1) 角岩化火山岩直接控制了铷矿体的空间分布；岩体隆起部位外接触带岩石次级节理裂隙发育，普遍遭受黑云母化、绿泥石化、绢云母化蚀变。随着蚀变增强，则形成角岩化火山岩，工业品位铷矿体均分布于角岩化带中。远离岩体，构造欠发育，岩石蚀变弱，则以铷矿化为主。

(2) SN 向构造破碎蚀变带（岩）直接控制了较大规模的锡矿的规模及形态、产状；见部分矿体产于 F_8 南北向断裂破碎蚀变带，其形态产状严格受断裂形态产状的控制。

(3) 云英岩体直接控制了云英岩型钨锡矿的空间位置、规模及形态、产状。云英岩型钨锡矿均分布于深部隐伏岩体隆起部位，而隆起呈峰地段，由于石英斑岩的侵位和自变质作用，云英岩化、黄玉化最强，矿化最好。

(4) 隐爆角砾岩岩筒直接控制了隐爆角砾岩型铅锌矿的分布、形态、产状及规模。矿区部分铷铅锌矿均分布于隐爆角砾岩岩筒内部。

(5) 次级节理裂隙蚀变带（岩）直接控制了细脉浸染型锡矿、铅锌矿、铜矿的空间位置、规模及形态、产状；节理裂隙愈发育、蚀变愈强，矿化愈强，矿体厚度愈大。部分矿体在节理密集发育地段，硅化、赤铁矿化、黄玉化强烈，矿体真厚度较大。

4.2.2 矿化富集规律

(1) 距岩体顶部愈近，角岩化愈强，铷的氧化物含量愈高；远离岩体，角岩化愈弱，并出现矿化不均匀及分支现象，铷的氧化物含量愈低。

(2) 构造破碎蚀变带（岩）变宽，硅化、赤铁矿化等蚀变越强，矿化愈好，矿体厚度愈大。

(3) 石英斑岩体云英岩化、黄玉化愈强，钨

锡矿含量愈高，且在岩体中心易形成厚大、品位高的钨富矿体；往岩体边部云英岩化、黄玉化减弱，矿化相应变弱。

(4) 围绕隐爆角砾岩筒，主要分布硅化、绿泥石化，与铅锌矿化相关的围岩蚀变主要为硅化、绿泥石，其硅化、绿泥石化愈强，铅锌矿化愈强。

(5) 矿区矿化较普遍，自北往南铷、锡、钨、铅锌、铜矿化加强，矿化特征在纵向上总体表现为：浅部以锡、铅锌矿化为主；中部以锡、铜、铅锌矿化为主；深部以钨、锡矿化为主。铷、锡矿化在不同深度均存在不同程度的富集现象；黄铜矿、铅锌矿主要富集于氧化还原界面之下，构造破碎蚀变带（岩）中；黑钨矿富集于中深部岩体与次火山岩接触带附近。

4.2.3 铷矿化富集规律

(1) 矿区火山岩地层中的粗安质角砾熔岩、粗面安山岩、粗安质晶屑（岩屑）凝灰熔岩、粗安质熔结凝灰岩、隐爆角砾岩等岩石中断裂及节理裂隙发育，其发育地段，不同程度遭受黑云母化、绢云母化、绿泥石化蚀变，蚀变强度随成矿岩体（碱长花岗岩）上凸而增强，并伴随铷矿化的发育。发育于火山岩地层中的构造破碎蚀变带、锡多金属矿体、含云母石英脉，以及（云英岩化）石英斑岩、花岗斑岩脉和云英岩同时发育较强的铷矿化。

(2) 深部隐伏花岗岩、石英斑岩、花岗斑岩石普遍遭受云英岩化、黑云母化、绢云母化、硅化、绿泥石化，蚀变强烈地段可形成云英岩，节理裂隙发育地段则岩石蚀变强烈，铷矿化相应强烈，可形成铷矿（化）体。

(3) 铷矿化蚀变带呈北北东走向，长约 850 m，东西宽最大约 920 m，埋深最大约 820 m，平面蚀变及矿化范围与土壤测量铷异常范围基本一致，也直接控制了铷矿化体（ $Rb_2O \geq 0.07\%$ ）的分布范围、规模及形态产状。矿（化）带的分布范围及规模受岩石蚀变范围和蚀变强度的控制。组成矿（化）带的矿体有角岩型铷矿体、云英岩型铷矿体。

结合铷矿化分布空间位置、赋矿层位等，可将铷矿化划分为 I、II 两个带。

I 矿化带：分布于矿床西部，赋矿地层为侏罗系上统高基坪群第二亚群，矿化带岩性主要由蚀变的粗安质角砾熔岩、粗安质晶屑（岩屑）凝

灰熔岩、粗面安山岩、含角砾粗安质熔结凝灰岩、爆破角砾岩（隐爆角砾岩）组成。矿化带走向南北，北高南低，南北展布长达 850 m，东西延展宽达 743 m，倾斜延深最大约 486 m。矿（化）带的分布范围及规模受角岩化蚀变带范围的控制。总体以岩体隆起部位分界，东部东倾、西部西倾，倾角变化大，北部缓，南部东、西两侧顺岩体界面产出，倾角达 70°。矿化类型以铷矿化为主，局部见锡、铅锌、铜矿化。组成矿化带的矿体主要为角岩型铷矿体，局部叠加构造破碎蚀变带（岩）型锡矿体、细脉浸染型锡铅锌铜矿体、隐爆角砾岩型铅锌矿体。

II 矿化带：主要分布矿床深部岩体内接触带云英岩及云英岩化花岗岩中，北高南低，矿化带呈北北东向不规则厚板状展布，展布长最大约 550 m，展布宽最大约 470 m，倾斜延深最大约 264 m。以岩体隆起中心垂线为界，东部东倾、西部西倾，倾角变化大，北部缓，南部顺岩体接触界面产出，倾角达 67°；埋深 50~420 m。矿化类型以铷矿化为主，其次为铋钽矿化，局部叠加铋锡铅锌铜矿化。组成矿化带的矿体主要为云英岩型铷矿体，其次为钠长石化花岗岩型铋钽矿体，局部叠加云英岩型铋锡矿体。

4.3 矿床成因与成矿模式

4.3.1 成矿物质来源

①上侏罗统高基坪群第二亚群粗面安山岩、粗安质熔结凝灰岩、含角砾粗安质熔结凝灰岩石中主要成矿元素 Rb、W、Sn 含量均较高（表 4），矿床的形成可能与含矿热液迁移过程渗透、淬取地层中有效组份有一定关系。

②贾宏翔通过地质证据、岩石地球化学证据、同位素证据、成岩成矿年龄证据等认为天堂山锡多金属矿床的成矿地质体为矿区内早白垩世的云英岩化石英斑岩^[10-11]。因此可判断燕山期岩体为主要成矿来源。

4.3.2 矿床成因与成矿模式

通过对广东天堂山铷锡多金属矿的成因研究发现，矿区角岩化火山岩及角岩化带、云英岩及云英岩化岩石直接控制了铷矿体的空间分布；构造破碎蚀变带（岩）直接控制铷锡多金属矿的形态产状及规模；云英岩体直接控制了云英岩型铋锡矿的空间位置、规模及形态、产状。隐爆角砾岩筒直接控制了隐爆角砾岩型铅锌矿的分布、

形态、产状及规模。据矿体的空间分布位置及矿石的矿物组合特征认为，区内角岩型铷矿、云英岩型铷矿、构造破碎蚀变带（岩）型锡矿、云英岩型铋锡矿及细脉浸染型锡矿、铅锌矿、铜矿矿床成因是以岩浆期后气成-热液充填交代作用为主的多阶段、多期次成矿的，是在不同的演化阶段、不同的成矿地质条件及不同的部位形成的具成因联系的一组矿床，构成一个较完整的成矿系列。

由于燕山期火山活动和岩浆作用的多次发生，因此成矿模式较复杂（图 4），总体可总结为：

（1）在燕山期频繁的火山活动、岩浆作用下，致使大量幔源成矿物质在晚侏罗世火山岩地层中富集。

（2）在早白垩世，天堂山隐伏花岗岩体侵入，晚期花岗岩岩浆发生强烈分异演化形成石英斑岩，分异演化形成富含挥发分的岩浆沿着 NNW 向断裂进入围岩形成石英斑岩脉。岩浆结晶分异的过程中，产生自变质作用，在早期结晶的花岗岩中发生钠化、钾化等碱质交代作用，部分形成络合物存在于熔浆中。

（3）随着岩浆结晶分异作用的继续进行，气液不断涌向岩体顶部，石英斑岩发生强烈的气液蚀变，形成云英岩化石英斑岩，并在云英岩化石英斑岩体顶部与围岩接触带形成似云英岩。云英岩化过程中形成大量的黄玉，以及少量锡石、黑钨矿、黄铁矿的金属矿物。

（4）岩浆侵入活动晚期，岩体顶部聚集了大量的挥发分，当挥发分积聚的压力超过临界点时，会沿着薄弱部位迅速释放而发生隐爆作用，形成隐爆角砾岩，或产生大量裂隙，随着流体体系温度和压力的降低，并伴随流体的不混溶作用，导致锡石、黑钨矿、磁铁矿等氧化物在该阶段大量沉淀，首先在云英岩化石英斑岩体顶部形成石英脉型、云英岩型铋锡黑钨矿矿体，这一成矿阶段的成矿温度集中在 340~380℃。同时岩浆期后热液带来的 H₂O、F、S、As、Li、Rb 等元素，在酸性淋滤作用下发生转移，与 Al、Fe、K、Na 等亲氧元素结合并沉淀，形成云英岩型铷矿床。

（5）含矿热液继续向上运移，此时成矿流体在压力差的驱动下沿裂隙由岩体中心向外迁移，并在迁移的过程中与自然对流的大气降水混合，温度和盐度进一步降低，大气降水的注入以及流

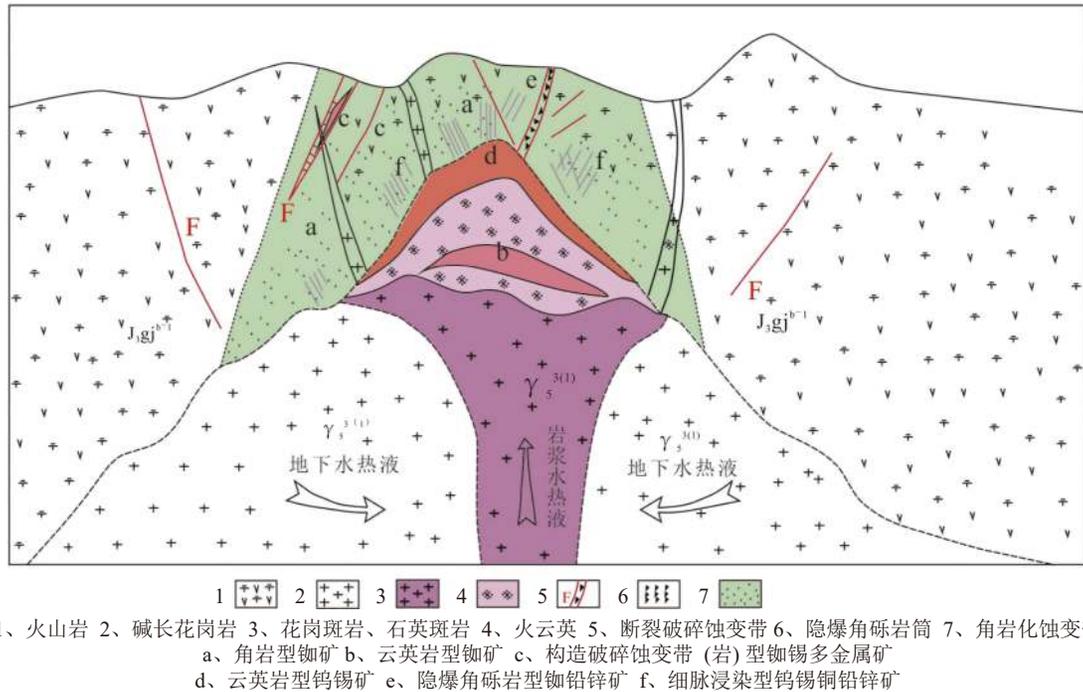


图4 天堂山矿区铷锡多金属矿成矿模式示意图

Fig.4 Schematic diagram of metallogenetic model of the Rb-Sn polymetallic deposit in the Tiantangshan mining area

体强烈的沸腾作用，在岩浆的发生和侵位形成的构造破碎蚀变带及节理裂隙有利部位沉淀大量的金属矿物，形成构造破碎蚀变带（岩）型锡多金属矿等。在隐爆角砾岩有利部位则形成小而富铅锌矿体。

(6) 同时由于热力交代作用，使岩体顶部一定范围火山岩围岩发生不同程度的硅化、黑云母化、绿泥石化、绢云母化，气成高温热液中与火山岩中的 Rb 等有用元素与亲氧元素结合并沉淀，一部分进入锡矿体或铅锌矿体、铜矿体，大部分则形成独立的铷矿体。

5 结 论

(1) 查明铷锡多金属矿床的矿体主要赋存于上侏罗统高基坪群第二亚群火山岩及其构造破碎蚀变带、节理裂隙蚀变带和花岗岩岩体隆起部位。

(2) 成矿过程可分为岩浆晚期结晶分异-交代期，岩浆晚期结晶分异-期后气液交代期，岩浆期后气成-热液作用期等 3 个成矿期次以及碱交代、黄玉云英岩化、锡石-黑钨矿氧化物、石英-萤石多金属硫化物等 4 个成矿阶段。

(3) 系统地总结了矿床的成因类型与成矿物

质来源，认为其成矿物质来源与火山岩和燕山期岩体有关，区内角岩型铷矿、云英岩型铷矿、钠长石化花岗岩型铷钽矿、构造破碎蚀变带（岩）型锡矿、云英岩型钨锡矿及细脉浸染型锡矿、铅锌矿、铜矿矿床成因是以岩浆期后气成-热液充填交代作用为主的多阶段、多期次成矿的，是在不同的演化阶段、不同的成矿地质条件及不同的部位形成的具成因联系的一组矿床。

(4) 厘定出矿床空间分布规律和矿化富集规律，建立了独特的成矿模式，很好地解释铅锌矿体，特别是铷矿体等多种铅锌矿体的形成问题。

参考文献:

[1] 李家庆. 广东省 2019 年重点建设项目计划名单公布 天堂山矿区铷锡多金属矿勘探项目入选 [EB/OL]. 中国矿业报, 2019-04-17.
LI J Q. The list of Guangdong Province's 2019 key construction project plans announced. The Tiantangshan mining area rubidium-tin polymetallic ore exploration project was selected [EB/OL]. China Mining News, 2019-04-17.
[2] 章涛, 缪秉魁, 姚明, 等. 广西栗木钨锡多金属矿区铷矿床地质特征及其资源评估 [J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(1):137-143.
ZHANG T, MIU B K, YAO M, et al. Geological characteristics

and resource assessment of rubidium deposits in the Limu tungsten-tin polymetallic mining area in Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(1):137-143.

[3] Z Qiu, S Li, Q Yan, et al. Late Jurassic Sn metallogeny in eastern Guangdong, SE China coast: evidence from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-S isotopes of the Dadaoshan Sn deposit[J] Ore Geology Reviews (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.11.015>.

[4] H Jiang, S Y Jiang, W Q Li, et al. Highly fractionated Jurassic I-type granites and related tungsten mineralization in the Shirenzhang deposit, northern Guangdong, South China: Evidence from cassiterite and zircon U-Pb ages, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes. The address for the corresponding author was captured as affiliation for all authors. Please check if appropriate. Lithos(2018),doi:10.1016/j.lithos.2018.04.030.

[5] 林长慧. 浅谈龙川县麻布岗火山岩盆地棉径矿区的成矿地质条件与找矿前景[J]. 甘肃冶金, 2016, 36(1):137-143.

LIN C H. Geological characteristics and resource assessment of rubidium deposits in the Limu tungsten-tin polymetallic mining area in Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(1):137-143.

[6] 孙宁, 孔凡乾, 韦龙明, 等. 广东省麻布岗地区银多金属矿床地质特征及找矿方向[J]. 有色金属(矿山部分), 2015, 67(1):43-46.

SUN N, KONG F Q, WEI L M, et al. Geological characteristics and prospecting direction of silver polymetallic deposits in Mabugang area, Guangdong Province[J]. Non-Ferrous Metals (Mining Section), 2015, 67(1):43-46.

[7] 罗卫, 李文光, 缪远兴, 等. 广东省麻布岗火山盆地银多金属矿成矿地质条件分析及找矿方向初探 [A]. 第一届全国青年地质大会论文集 [C]. 中国地质学会青年工作委员会: 中国地质学会地质学报编辑部, 2013: 4.

LUO W, LI W G, MIU Y X, et al. Analysis of the mineralization geological conditions of the silver polymetallic deposit in the Mabugang volcanic basin, Guangdong Province and preliminary exploration of the prospecting direction[A]. Proceedings of the First National Youth Geological Conference [C]. Editorial Office of the Geological Journal of the Geological Society of China, 2013: 4.

[8] 覃忠. 广东省龙川县麻布岗小长沙铁多金属矿区成矿地质特征及找矿方向[J]. 中国科技信息, 2008(16):25-27.

TAN Z. Metallogenic Geological Characteristics and Prospecting Direction of the Xiaochangsha Iron Polymetallic Deposit in Mabugang, Longchuan County, Guangdong Province[J]. China Science and Technology Information, 2008(16):25-27.

[9] 康博, 颜志强, 李恋宇. 湖南省临湘市桃林铅锌矿成矿模式及找矿标志 [J]. 资源环境与工程, 2015, 29(2):160-163,127.

KANG B, YAN Z Q, LI L Y. Metallogenic Model and Prospecting Indicators of Taolin Lead-Zinc Deposit in Linxiang City, Hunan Province[J]. Resources Environment and Engineering, 2015, 29(2):160-163,127.

[10] 贾宏翔, 庞振山, 耿林, 等. 广东天堂山锡多金属矿床成因探讨[J]. 矿床地质, 2014, 33(S1):1071-1072.

JIA H X, PANG Z S, GENG L, et al. Discussion on the genesis of Tiantangshan tin polymetallic deposit in Guangdong[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(S1):1071-1072.

[11] 贾宏翔. 广东省龙川县天堂山锡多金属矿床地质地球化学特征和成因 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.

JIA H X. Geological and geochemical characteristics and genesis of Tiantangshan tin polymetallic deposit in Longchuan County, Guangdong Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.

(下转第 135 页)