

广西大厂矿田泥盆系地层地球化学及其成矿指示

成永生^{1,2,3}, 黄惠明⁴

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

3. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

4. 广西二一五地质队有限公司, 柳州 545006)

摘 要: 利用岩石地球化学的理论与方法, 对大厂矿田的主要赋矿地层泥盆系中、上统开展了主量元素地球化学、稀土元素地球化学以及微量元素地球化学的分析与研究, 对泥盆系地层与大厂矿田矿床与矿产的关系进行了探讨, 阐述了泥盆系的有利成矿条件及其对矿床的关键控制作用。结果表明, 泥盆系地层主量元素成分为 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 以及 K_2O 等, 以 SiO_2 和 CaO 为主体, 其中, 纳标组地层 CaO 含量最高, 其余各组地层 SiO_2 含量均表现为不同程度的偏高, 这与大厂矿区泥盆系地层的岩性特征以及岩石组合密切相关。利用 Al_2O_3 — SiO_2 岩石热水成因模式显示, 泥盆系形成过程中沉积环境多变, 岩石物源具有多来源的特点, 也从一定程度上导致了泥盆系地层多样化的岩性特点以及复杂的岩石建造。泥盆系 ΣREE 含量变化于 $(2.9\sim 318.77)\times 10^{-6}$ 之间, 其中, 纳标组地层表现出轻、重稀土元素亏损, 罗富组地层则表现为轻、重稀土元素富集。泥盆系地层的微量元素组成主要包括 Ba、Rb、Sr、Th、U、La、Ce、Pr、Nd 等。泥盆系不同组地层独特的岩石类型与岩性组合, 是金属成矿元素发生富集有利因素。

关键词: 大厂; 泥盆系; 地球化学; 控矿因素; 成矿作用

中图分类号: P611.1

文献标志码: A

Geochemical characteristics and mineralization indication of Devonian strata in Dachang ore field, Guangxi

CHENG Yong-sheng^{1,2,3}, HUANG Hui-ming⁴

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

4. Guangxi No. 215 Geological Party, Liuzhou 545006, China)

Abstract: Based on the theory and method of the petrogeochemistry, the major element, REE and trace element of the Middle and Upper Devonian in the Dachang ore field were analyzed, the relationship between the Devonian and minerals was discussed, the favorable metallogenic conditions and its critical control to the ore deposit were also elaborated. The results suggest that the major elements of the Devonian consist of SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , Na_2O and K_2O , yet SiO_2 and CaO are dominant. The calcium oxide content of Nabiao formation is the maximum, but the SiO_2 content of the other formations seems to be too high in different degrees, which closely relates to the lithological characteristics and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41202051); 中国博士后科学基金资助项目(2012M521721); 中南大学贵重仪器设备开放中心基金资助项目(CSUZC2013021); 广西华锡集团科技攻关项目(0165201203011)

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 成永生, 副教授, 博士; 电话: 13017386868; E-mail: cys968@163.com

rock assemblage of Devonian in Dachang orefield. According to the hydrothermal mode of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, the depositional environment of Devonian was variable with multiple sources, which led to the diverse lithology and complex rock formations. The content of ΣREE of Devonian is 2.9×10^{-6} – 318.77×10^{-6} , among which the Nabiao formation depletes LREE and HREE elements, yet the Luofu formation relatively enriches LREE and HREE elements. The trace elements of Devonian are composed of Ba, Rb, Sr, Th, U, La, Ce, Pr and Nd. The special rock type and lithological combination of Devonian are the favorable factors for the metal enrichment.

Key words: Dachang; Devonian; geochemistry; ore-controlling factor; mineralization

泥盆系是广西最重要的含矿层位, 赋存于其中的矿产极为丰富^[1], 部分矿种储量位居全国前列, 具有十分重要的经济地位。泥盆系地层中矿产的地理分布以高度集中为特色^[2], 据早期统计资料表明, 广西泥盆系各类矿产地达 307 处, 其中包括大型矿床 10 处、中型矿床 22 处、小型矿床 77 处、矿点 200 多处^[3]。

已有研究表明, 广西泥盆系是加里东地槽回返后第一个地台沉积盖层, 泥盆纪的地质构造除了具有自身的特点外, 在一定程度上还受到基底构造的影响和制约^[4]。为此, 泥盆系地层作为广西诸多矿床(体)的主要赋矿层位, 也是大量矿产形成的主要控制因素, 尤其是地层的沉积特征、分布形态、空间展布、化学成分、岩石力学等均从不同程度上影响并控制着各类矿产的分布与产出^[5-8]。长期以来, 关于泥盆系的有关研究一直属于广西地区找矿勘探与矿产开发的重要课题, 对矿产资源的可持续发展具有重要意义。然而, 以往的研究工作主要集中在泥盆系地层的沉积相与古地理特征、展布规律、控矿机制等方面, 重点对泥盆系的硅质岩以及生物礁灰岩探讨较多^[9], 对泥盆系的其它岩性地层则涉及较少。

广西大厂是我国著名的锡多金属矿产地, 从该区目前矿产的产出层位来看, 泥盆系地层中、上统均有矿体产出^[10-11]。为此, 深化控矿地层的进一步研究具有重要意义。本次在对泥盆系中、上统各组系地层系统采样的基础上, 采用地球化学的方法对赋矿地层的特征进行了分析与研究, 对泥盆系的成矿作用与成矿条件进行了探讨, 旨在进一步丰富大厂矿田赋矿地层的理论研究, 为今后的找矿勘探实践提供新资料。

1 区域地质与地球物理

丹池成矿带全长约 100 km, 自北而南分布有麻阳、芒场、大厂、北香、芙蓉厂等重要的矿田, 其中在大厂矿田约 20 km 范围内, 产出有铜坑—长坡、巴力、龙头山、茶山、大福楼、毛坪、坑马等矿床。据统计, 广西境内泥盆系中的各类矿产地 300 多处, 其

中大型矿床 10 余处, 中小型矿床 99 处, 矿种包括锡、锰、钨、锌、铅、锑、银、汞、重晶石等。

丹池成矿带大地构造位置在元古宙—早古生代属扬子准地台南缘, 晚古生代至中生代则为右江盆地内部的次级裂陷盆地。该区的构造演化序列主要经历了 3 个大的历史阶段: 一是元古宙至早古生代的陆内—陆缘裂陷阶段; 一是泥盆纪至早二叠世的陆内到陆缘裂陷阶段; 一是晚二叠世到三叠纪的弧后裂陷阶段^[4]。从大地构造上来看, 右江陆缘裂谷盆地属于一级构造盆地, 丹池盆地是其次级盆地, 这个二级盆地内的泥盆系是大厂锡—多金属矿带的控矿层位, 它的形成和演化与大厂锡—多金属矿带的形成有着密切的联系^[1,3]。丹池盆地北东侧的 NW 向紫云—丹池断裂为同沉积活动断裂, 盆地的形成和演化主要受该活动断裂的控制。泥盆纪时期, 紫云—丹池断裂主要发生拉张裂陷作用, 形成一北东侧沉降幅度大于南西侧的箕状断陷沉积盆地。丹池成矿带内主要有燕山中、晚期的花岗岩浆活动, 主要分布在龙箱盖、大厂、芒场等地, 以岩脉、岩株、岩床产出, 属浅成—超浅成岩浆岩^[2], 岩石种类有黑云母花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩、云煌岩、闪长玢岩等。

丹池成矿带区域布格重力异常显示, 区域重力场呈南东高, 逐渐往北西方向降低的斜坡。主要的区域性重力低异常包括芒场重力低异常和大厂重力低异常^[12]。芒场重力低异常位于南丹县芒场乡, 分布形态呈近椭圆形, 场源性质为隐伏酸性岩体; 大厂重力低异常位于南丹县大厂镇和车河镇一带, 分布面积约 700 km², 展布形态呈近椭圆形, 场源性质亦为隐伏酸性岩体。前泥盆系基底和盖层之间可能存在一个密度界面, 表现为上高下低; 前震旦系结晶基底及其上覆地层也可能存在一个密度界面, 亦为上低下高; 由浅至深, 地台盖层至基底密度值呈高—低—高的特征^[13]。根据布格重力异常推断基底构造特征为北西向的两隆夹一拗, 区域磁场宏观特征显示, 东部、北部和西北部磁场值偏高, 西部、西南部磁场值偏低。区域磁场背景上出现了北西向排列的拉赖、罗富、隘洞、东兰、芒场、大厂、花英、里湖、芙蓉厂和东西向排列的芒

场、里湖、水伦等局部磁力高异常。区域性航磁异常主要为芒场磁异常、里湖磁异常、大干磁异常、大厂磁异常等。芒场磁异常位于南丹县芒场乡,呈圆形。里湖磁异常位于南丹县里湖,呈圆形,磁源性质不明。大干磁异常,位于环江县木伦、大干村,呈圆形状,磁源性质亦不明。大厂磁异常群位于南丹县大厂镇至车河镇,分布面积约为 200 km²,由六处局部异常所组成,磁源为含磁黄铁矿的矿化、蚀变岩石,与大厂锡多金属矿田成矿具有一定的关系^[14]。

2 泥盆系地层基本特征

丹池成矿带内泥盆系地层厚约 2 138~5 000 m,于麻阳、芒场、罗富、大厂、北香、五圩等隆起区大面积出露,地貌上构成浑圆状中低山和低缓山丘,为一套含浮游生物化石的砂岩、页岩、灰岩及硅质岩组成的地台型沉积,即所谓的“南丹型”沉积,与广西大部分地区含底栖生物的碎屑岩-碳酸岩沉积的“象州型”泥盆系形成鲜明对比,其与上覆的石炭系呈整合接触,局部为平行不整合^[3]。

上泥盆统为海槽-海盆型沉积环境,自上而下为同车江组、五指山组和榴江组。同车江组为一套浅海相陆源细碎屑沉积,部分地区在其底部见有海底火山碎屑沉积。五指山组自上而下依次为大扁豆状灰岩、小扁豆状灰岩、细条带灰岩以及宽条带灰岩。榴江组为灰-灰黑色薄层状硅质岩,夹硅质页岩、硅质泥岩,局部含炭质及钙质较高,常可见大小不等的钙质结核分布在硅质岩中。中泥盆统以泥岩、页岩与泥灰岩、灰岩互层偶夹硅质岩层为特点。局部地段发育有较多细粒黄铁矿。罗富组为深灰-灰黑色含钙质泥岩、页岩与灰-深灰色泥质灰岩互层,夹砂岩、炭质泥岩,局部夹少许硅质岩,底部以砂岩与纳标组分界。纳标组为灰黑-黑色泥岩、页岩为主,夹钙质结核,泥质灰岩、细砂岩等,其中泥岩、页岩以薄层状为主,普遍含有较多的钙质和砂质,局部发育有礁灰岩。下泥盆统以砂岩和泥岩为主,自上而下为塘丁组、益兰组、那高岭组以及莲花山组^[4, 15]。

3 采样与分析

本次研究主要对泥盆系地层的中、上统进行了采样,具体包括同车江组(2件)、五指山组(3件)、榴江组(2件)、罗富组(2件)以及纳标组(6件),总体能够反

映泥盆系地层的岩石特征及其岩性组合,也是大厂矿田主要的赋矿地层。岩石样品的主量元素、微量元素以及稀土元素的分析与测试由澳实分析检测(广州)有限公司承担完成,地层岩石样品的常量元素测试采用 ME-XRF06 分析方法,利用硼酸锂或偏硼酸锂熔融, X 荧光光谱定量分析,共计检测出 13 种元素氧化物及灼烧损失(LOI),包括 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Cr₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、MgO、MnO、Na₂O、P₂O₅、TiO₂、BaO 以及 SrO。微量与稀土元素系列分析采用碱熔法(即 ME-MS81 法),利用 LiBO₂ 熔融,质谱仪定量分析,共检测出 38 个元素。

4 泥盆系地层地球化学

4.1 主量元素地球化学

根据对中、上泥盆统 5 组地层 15 个岩石样品的分析结果来看(见表 1), SiO₂ 和 CaO 占据了主量元素成分的主体,其次为 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 以及 Na₂O、K₂O 等。泥盆系中统的纳标组地层 SiO₂ 含量并不高,介于 0.19%~3.57%之间,大多数样品 SiO₂ 含量低于 1%。该组地层的主体成分则为 CaO,且 CaO 含量介于 52.98%~55.5%之间,平均值为 54.89%。这与纳标组地层的岩性和成分有关系,纳标组地层在大厂矿区由生物结晶灰岩、生物障积岩、生物骨架灰岩、泥晶生物屑灰岩、泥晶灰岩等组成,内含丰富的珊瑚、层孔虫、竹节石、藻类、棘皮类、腕足类等化石,偶见菊石、薄壳腕足、三叶虫等,从而致使岩石的钙质含量明显增加。从罗富组地层两个样品的主量成分分析结果来看,以 SiO₂ 含量为主,分别为 49.48%和 43.76%,其次为 Al₂O₃ 和 Fe₂O₃,岩石中 CaO 的含量并不高,仅为 7.03%和 5.35%。总体来看,岩石样品的硅质成分含量较高,这可能与该组地层的岩性组合以及野外岩石采样有关系,因为罗富组地层在大厂矿田内主要表现为含钙质泥岩、页岩与泥质灰岩互层,夹有砂岩、炭质泥岩,局部夹硅质岩,因此,岩石样品具有一定的硅质岩特征,表现为较高的硅质成分。榴江组地层两个样品的主量元素分析结果表明, SiO₂ 含量特别高,达到 94.57%和 83.38%,少量的 Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 CaO。榴江组地层在大厂矿区内主要为灰黑色至黑色隐晶细粒结构的薄(中)层状硅质岩、硅质页岩,具纹层状和条带状构造,主要成分为石英,含有少量的泥质和碳酸盐等,从而使得岩石具有十分高的 SiO₂ 含量。五指山组地层 3 个岩石样品的主量元素含量差别较大, SiO₂ 含量分别为 11.38%、32.13%以及 74.13%, Al₂O₃

含量分别为 3.12%、8.16% 和 14.38%， Fe_2O_3 含量相对较为均一，介于 0.9%~1.65% 之间，均值为 1.29%。 CaO 含量差异也十分明显，分别为 44.64%、28.94% 及 0.88%。从大厂矿区上泥盆统五指山组地层岩性组合来看，主要由灰岩与硅质岩以互层的组合形式出现，局部夹有泥质岩、钙质泥岩等。因此，该组地层主量元素含量悬殊的原因可能在于岩石样品分别代表了灰岩以及硅质岩，由于这是本组两种主要的岩石类型以及岩性特征。同车江组地层岩石的 SiO_2 含量介于 57.97%~74.38% 之间，也显示出了较高的硅质含量，其次为相对较高的 Al_2O_3 含量(14.19%~19.34%)，其余成分含量均较低。该组地层在矿区内主要为一套浅海相陆源细碎屑沉积，岩性主要表现为(粉砂质)泥岩、泥灰岩夹灰岩、钙质细砂岩、页岩、粉砂岩等，较高的 SiO_2 含量可能反映了砂质岩的特征。

TAYLOR 等^[16]于 1985 年提出 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值是区分岩石物源的重要标志，陆壳 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 3.6，与此比值接近的岩石其物源应以陆源为主，超过此值则有生物成因或热水成因物质补充^[17-18]。本次研究泥盆系地层的岩石样品 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值多数大于 3.6，少数甚至低于 3.0，从一定程度上表明泥盆系地层的物源以生物成因或热水成因物质补充的形式为主体，少量岩石类型具有陆源的特点。

通过 Al_2O_3 — SiO_2 岩石热水成因模式图可以看出(见图 1)，样品点散落于热水区、水成区、深海沉积物等区域，表明泥盆系地层经历了比较复杂的沉积环境，或者说泥盆系地层形成的过程中沉积环境或海平面发生了多次的动荡和变化，导致泥盆系地层的形成环境如此复杂，在整个泥盆系地层沉积形成的过程中，岩石的物源也发生了一定的变化。这种变化一方面体现

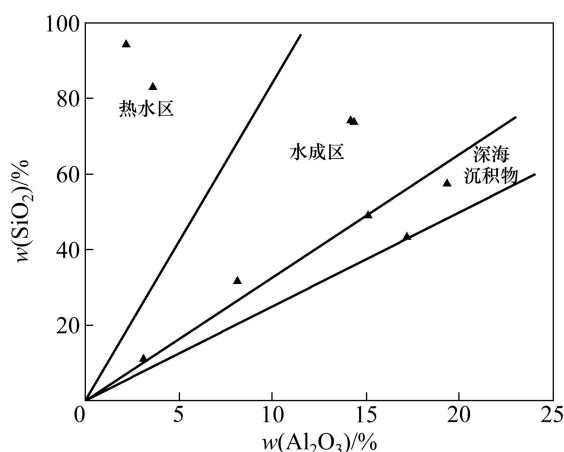


图 1 广西大厂泥盆系地层 Al_2O_3 — SiO_2 岩石热水成因模式图
Fig. 1 Al_2O_3 — SiO_2 diagrams for hydrothermal formations of Devonian in Dchang ore field, Guangxi

了岩石形成环境的转换，另一方面也导致了泥盆系地层多样化的岩性特点以及复杂的岩石建造。

4.2 稀土元素地球化学

稀土元素是反映深部地质作用过程的指示剂，通过研究地质体中稀土元素的组成特征与分布特点，对探讨成岩成矿作用、构造环境判断、地球形成与演化等均具有重要作用^[16]。

大厂矿区泥盆系地层稀土元素和微量元素分析结果列于表 2，通过对稀土元素含量进行综合分析显示(见表 3)，总体看来， ΣREE 含量差异较大，介于 $(2.9\sim318.77)\times10^{-6}$ 之间，其中，纳标组地层的 ΣREE 含量相对较小，为 $(2.9\sim7.03)\times10^{-6}$ ，罗富组地层的 ΣREE 含量最大，为 318.77×10^{-6} 和 171.70×10^{-6} ，均值为 245.23×10^{-6} ；榴江组地层的 ΣREE 值分别为 14.08×10^{-6} 和 55.79×10^{-6} ，均值为 34.93×10^{-6} ；五指山组地层的 ΣREE 值相对较为均一，介于 $(56.30\sim80.17)\times10^{-6}$ 之间，平均值为 71.11×10^{-6} ；同车江组地层的 ΣREE 值也相对偏高，为 161.50×10^{-6} 和 180.84×10^{-6} ，均值为 171.07×10^{-6} 。

泥盆系地层的 LREE 值介于 $(2.26\sim298.13)\times10^{-6}$ 之间，以罗富组地层表现的最高，为 151.40×10^{-6} 和 298.13×10^{-6} ，另外，同车江组地层的 LREE 值也较高 $(143.65\times10^{-6}$ 和 $161.20\times10^{-6})$ ，纳标组地层的 LREE 值最低，介于 $(2.26\sim5.84)\times10^{-6}$ 之间，均值仅为 4.3×10^{-6} 。

泥盆系地层的 HREE 值范围为 $(0.64\sim20.64)\times10^{-6}$ ，罗富组地层的 HREE 值是最高者，达到 20.30×10^{-6} 和 20.64×10^{-6} ，其次是同车江组地层，其值为 17.85×10^{-6} 和 19.44×10^{-6} ，纳标组地层的 HREE 值最低，介于 $(0.64\sim1.19)\times10^{-6}$ 。泥盆系 LREE/HREE 的取值范围为 3.53~14.44，均值为 6.48； $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 介于 0.47~3.18 之间，平均值为 1.16； δEu 介于 0.27~7.69 之间，均值为 1.43； δCe 介于 0.52~1.01 之间，平均值为 0.71。总体而言，罗富组地层硅质岩中的 ΣREE 、LREE 以及 HREE 均表现为最高值，轻、重稀土元素均富集；而纳标组地层的生物礁灰岩中的 ΣREE 、LREE 以及 HREE 值均为最小值，轻、重稀土元素则均为亏损。

从泥盆系地层稀土元素北美页岩标准化分布型式图可以看出(见图 2)，标准化曲线的分布形式大致相同，表明泥盆系地层相似的性质。总体来说，可以划分为两种类型：一为曲线纵坐标大于 0.1 的形态，包括罗富组、榴江组(除 Y006 号样品)、五指山组以及同车江组，主要表现为 Eu 的正异常；另一组为曲线纵

表 1 广西大厂矿田泥盆系地层主量元素组成

Table 1 Main elements of Devonian in Dchang ore field, Guangxi

地层	编号	w/%														
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	SrO	BaO	LOI	Total
纳标组	Y001-2	3.57	0.19	0.43	52.98	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.016	0.02	0.01	41.6	99.40
	Y002	0.19	0.07	0.06	55.43	0.34	0.01	0.01	0.01	<0.01	0.02	0.010	0.02	0.01	43.6	99.78
	Y015	0.56	0.11	0.18	55.21	0.36	0.02	0.03	<0.01	<0.01	0.29	0.014	0.01	0.01	43.0	99.79
	Y032	0.48	0.19	0.10	54.84	0.35	0.02	0.03	<0.01	<0.01	0.06	0.013	0.01	0.01	42.9	99.00
	Y033	0.40	0.18	0.15	55.5	0.40	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.009	0.02	0.01	43.2	99.93
	Y034	0.23	0.09	0.05	55.4	0.37	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.012	0.01	0.01	43.6	99.81
罗富组	Y030	49.48	15.12	8.66	7.03	6.21	2.58	3.52	0.03	1.51	0.16	0.599	0.06	0.18	4.38	99.52
	Y031-2	43.76	17.17	15.48	5.35	1.91	0.32	5.90	0.02	0.57	0.05	0.049	0.03	0.25	8.93	99.79
榴江组	Y006	94.57	2.18	1.09	0.15	0.27	0.01	0.51	<0.01	0.04	0.05	0.039	0.02	<0.01	0.81	99.74
	Y025-1	83.38	3.58	3.24	1.94	0.36	0.10	0.99	0.02	0.13	0.04	1.19	0.02	<0.01	4.28	99.27
五指山组	Y004	11.38	3.12	1.33	44.64	1.24	0.14	0.77	0.01	0.15	0.15	0.03	0.02	0.02	36.5	99.50
	Y005	32.13	8.16	1.65	28.94	0.84	0.04	2.35	<0.01	0.28	0.28	0.056	0.02	0.03	24.6	99.38
	Y040	74.13	14.38	0.9	0.88	0.18	3.38	4.68	<0.01	0.08	0.06	0.278	0.02	<0.01	0.9	99.87
同车江组	Y020	74.38	14.19	2.58	0.23	0.60	0.50	1.88	0.01	0.60	0.01	0.053	0.03	0.06	4.94	100.05
	Y039	57.97	19.34	3.87	8.05	1.87	1.00	5.15	0.02	0.58	0.08	0.097	0.07	0.09	1.93	100.10

表 2 广西大厂矿田泥盆系地层稀土元素及微量元素组成

Table 2 REE and trace elements of Devonian in Dachang ore field, Guangxi

地层	编号	w/10 ⁻⁶																	
		Ag	Ba	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy	Er	Eu	Ga	Gd	Hf	Ho	La	Lu	Mo	Nb
纳标组	Y001-2	<1	32.2	1.7	1.0	20	0.32	40	0.25	0.16	0.04	0.3	0.23	0.2	0.05	1.4	0.02	<2	0.4
	Y002	<1	9.3	0.7	0.5	10	0.15	13	0.17	0.12	0.04	0.1	0.16	0.2	0.05	0.8	0.01	<2	0.3
	Y015	<1	22.3	2	<0.5	<10	0.59	<5	0.18	0.12	0.29	0.4	0.20	<0.2	0.04	1.6	0.01	<2	0.3
	Y032	<1	29.9	1.7	0.6	<10	0.81	6	0.31	0.22	0.07	0.3	0.32	<0.2	0.07	1.6	0.02	<2	0.4
	Y033	<1	23.8	1.9	0.6	<10	0.57	5	0.32	0.19	0.08	0.2	0.36	<0.2	0.06	1.8	0.02	<2	0.2
	Y034	<1	15.4	1	0.5	<10	0.40	<5	0.15	0.14	0.04	0.1	0.20	<0.2	0.03	1.0	0.01	<2	<0.2
罗富组	Y030	<1	1570	141.5	38.9	220	33.9	49	4.89	2.87	1.99	16.7	7.80	4.8	0.94	81.9	0.36	4	89.6
	Y031-2	2	2130	66.7	10.1	100	129	907	5.4	3.41	1	19.5	5.38	3.7	1.15	39.6	0.42	<2	11.9
榴江组	Y006	<1	61.3	5.6	2.1	10	3.61	44	0.47	0.35	0.11	2.6	0.48	0.4	0.11	2.2	0.07	<2	1.5
	Y025-1	<1	117	15.2	4.9	70	8.22	66	2.65	1.62	0.51	7.5	3.05	1.2	0.55	11.7	0.20	2	2.7
五指山组	Y004	<1	116.5	24.7	6.6	10	4.23	12	3.19	2.05	0.77	4.8	3.56	1.0	0.70	17.2	0.26	<2	3.7
	Y005	<1	248	32.8	14	40	16.50	24	2.23	1.35	0.58	10.9	2.62	1.4	0.45	18.0	0.18	<2	6.6
	Y040	<1	79.4	22.4	1.2	10	50.30	19	2.36	1.27	0.13	25.5	2.27	2.5	0.42	10.7	0.22	2	62.6
同车江组	Y020	<1	579	69.2	4.7	80	35.3	23	4.97	3.13	1.12	17.5	5.59	4.3	1.05	43.0	0.44	3	12.9
	Y039	<1	785	65.8	13.1	130	67.6	42	4.52	3.02	0.9	24.2	4.90	4.1	0.98	36.5	0.41	<2	12.7

续表 2 广西大厂矿田泥盆系地层稀土元素及微量元素组成

Continued Table 2 REE and trace elements of Devonian in Dachang ore field, Guangxi

地层	编号	$w/10^{-6}$																			
		Nd	Ni	Pb	Pr	Rb	Sm	Sn	Sr	Ta	Tb	Th	Tl	Tm	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr
纳标组	Y001-2	1.0	8	6	0.24	2.3	0.20	1	273.0	<0.1	0.04	0.24	<0.5	0.02	1.22	17	6	2.4	0.17	39	8
	Y002	0.5	<5	7	0.12	0.7	0.10	1	180.0	<0.1	0.02	0.13	<0.5	0.01	0.22	<5	23	2.0	0.10	44	9
	Y015	0.9	<5	24	0.25	4.4	0.15	1	150.0	0.1	0.03	0.15	<0.5	0.01	9.91	14	2	2.1	0.09	361	3
	Y032	1.1	<5	<5	0.30	5.0	0.24	1	161.5	<0.1	0.05	0.20	<0.5	0.02	1.66	10	2	3.5	0.15	13	4
	Y033	1.4	<5	<5	0.33	3.8	0.33	<1	186.0	<0.1	0.05	0.26	<0.5	0.03	1.58	10	1	3.0	0.16	13	3
	Y034	0.6	<5	<5	0.15	2	0.13	<1	130.0	<0.1	0.02	0.13	<0.5	<0.01	7.19	<5	1	2.1	0.09	8	3
罗富组	Y030	50	115	17	14.85	284	7.89	5	613.0	4.6	0.95	17.80	1.0	0.40	5.58	160	8	25.9	2.43	119	194
	Y031-2	30.9	95	19	8.10	686	5.10	476	272.0	0.9	0.87	13.90	2.4	0.50	2.51	122	6	35.0	3.17	227	126
榴江组	Y006	2.8	16	20	0.76	22.3	0.56	2	7.0	0.1	0.07	0.80	<0.5	0.06	0.39	29	1	4.0	0.44	58	15
	Y025-1	12.6	51	17	3.04	80.7	2.67	62	32.7	0.2	0.44	3.22	0.6	0.21	4.22	417	5	19.4	1.35	2610	44
五指山组	Y004	15.0	9	9	3.77	48	3.05	1	197.5	0.3	0.53	4.21	<0.5	0.30	0.49	16	4	24.0	1.79	29	34
	Y005	13.7	18	9	3.74	154	2.65	2	183.5	0.5	0.38	6.39	0.7	0.20	1.27	40	4	13.4	1.29	54	50
	Y040	9.4	<5	15	2.61	730	2.33	18	31.1	18.1	0.39	12.05	1.7	0.22	27.2	<5	81	13.5	1.58	31	57
同车江组	Y020	32.9	32	21	9.02	129.5	5.96	3	228.0	1.0	0.82	13.40	0.8	0.47	3.23	139	4	32.1	2.97	64	145
	Y039	28.2	43	15	7.65	380	4.6	8	704.0	1.1	0.75	14.60	1.3	0.45	3.20	153	6	28.7	2.82	155	132

表 3 广西大厂矿田泥盆系地层稀土元素特征参数

Table 3 REE characteristic parameters of Devonian in Dchang ore field, Guangxi

地层	编号	$\Sigma\text{REE}/10^{-6}$	$\text{LREE}/10^{-6}$	$\text{HREE}/10^{-6}$	LREE/HREE	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	δEu	δCe
纳标组	Y001-2	5.52	4.58	0.94	4.87	0.78	0.87	0.68
	Y002	2.9	2.26	0.64	3.53	0.75	1.42	0.52
	Y015	5.87	5.19	0.68	7.63	1.68	7.69	0.73
	Y032	6.17	5.01	1.16	4.32	1.01	1.16	0.58
	Y033	7.03	5.84	1.19	4.91	1.06	1.08	0.58
	Y034	3.57	2.92	0.65	4.49	1.05	1.12	0.59
罗富组	Y030	318.77	298.13	20.64	14.44	3.18	1.19	0.95
	Y031-2	171.70	151.40	20.30	7.46	1.18	0.89	0.88
榴江组	Y006	14.08	12.03	2.05	5.87	0.47	1.00	1.01
	Y025-1	55.79	45.72	10.07	4.54	0.82	0.83	0.60
五指山组	Y004	76.87	64.49	12.38	5.21	0.91	1.09	0.73
	Y005	80.17	71.47	8.70	8.21	1.32	1.03	0.94
	Y040	56.30	47.57	8.73	5.45	0.64	0.27	1.01
同车江组	Y020	180.64	161.20	19.44	8.29	1.37	0.91	0.83
	Y039	161.50	143.65	17.85	8.05	1.22	0.89	0.93

坐标小于 0.1 的形态，主要为纳标组地层以及榴江组的一个样品，总体表现为 Eu 的负异常。

4.3 微量元素地球化学

微量元素地球化学研究已成为现代矿床学研究的重要内容，微量元素具有地球化学指示剂的功能，微

量元素的含量和分配以及与相近似元素的比值，可作为成岩成矿物理化学条件的灵敏指示剂，尤其对指导矿床成因、成矿规律以及成矿预测等方面发挥着重要作用^[16-17]。

从泥盆系地层微量元素分析结果可以看出(见表 2)，微量元素组成主要包括 Ba、Rb、Sr、Th、U、La、

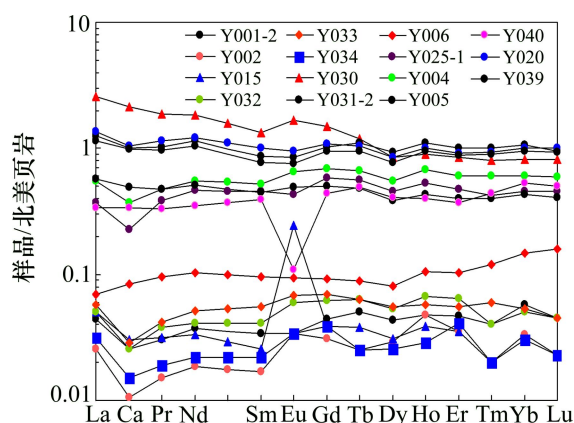


图2 广西大厂矿田泥盆系地层稀土元素北美页岩标准化分布型式

Fig. 2 Nasc-normalized distribution pattern of REE for Devonian in Dachang ore field, Guangxi

Ce、Pr、Nd 等元素。其中地层 Ba 含量普遍较高,最高达 2130×10^{-6} ; 其次为 Rb 含量,最高者可达 730×10^{-6} ; Sr 含量也相对较高,介于 $(7 \sim 704) \times 10^{-6}$ 之间,多数大于 100×10^{-6} ; Th 含量介于 $(0.13 \sim 17.8) \times 10^{-6}$ 之间, U 含量介于 $(0.22 \sim 27.2) \times 10^{-6}$ 之间, La 含量介于 $(0.8 \sim 81.9) \times 10^{-6}$ 之间, Ce 含量介于 $(0.7 \sim 141.5) \times 10^{-6}$ 之间, Pr 含量介于 $(0.12 \sim 14.85) \times 10^{-6}$ 之间, Nd 含量介于 $(0.5 \sim 50) \times 10^{-6}$ 之间,其他元素的含量均较低,如 Ta、Nb、Pb、Hf、Sm、Eu、Dy、Y、Ho、Yb、Lu 等元素。

5 泥盆系地层成矿作用

5.1 控矿地层及其成矿

大厂矿田主要出露地层包括泥盆系、石炭系和二叠系,其中泥盆系是主要赋矿层位。围绕龙箱盖岩体自西向东依次产出 3 个矿带:西矿带(主要为长坡和龙头山)、中矿带(包括拉么、茶山)和东矿带(以大福楼、亢马为主),目前已知矿床与泥盆系地层均关系密切^[19-21]。

大厂矿田西矿带的锡石—硫化物型矿床的赋矿地层为中、上泥盆统页岩、泥灰岩、礁灰岩、扁豆状、条带状灰岩、硅质岩,主要矿化元素为 Sn、Pb、Zn、Sb、Ag,主要金属矿物为锡石、铁闪锌矿、毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿、脆硫锑铅矿,如 91 号矿体赋矿层位为五指山组地层,岩性为细条带状硅质岩,92 号矿体赋矿层位为榴江组地层,岩性为硅质岩、硅质页岩,100 号矿体赋矿层位为纳标组地层,岩性为生物礁灰

岩。中矿带砂卡岩型矿床的赋矿地层为中、上泥盆统泥灰岩及扁豆状、条带状灰岩,主要矿化元素为 Zn、Cu、Ag,主要金属矿物为铁闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂;中矿带石英脉型矿床的赋矿地层为中、上泥盆统泥灰岩、页岩、硅质岩、扁豆状和条带状灰岩,主要矿化元素为 Sb、W,主要金属矿物为辉锑矿、白钨矿、黑钨矿。东矿带锡石—硫化物型矿床的赋矿地层为中、下泥盆统页岩、泥灰岩,主要矿化元素为 Sn、Zn,主要金属矿物为锡石、铁闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿以及毒砂^[22]。

5.2 关键性控矿作用

大厂矿区锡多金属矿体赋矿地层涉及泥盆系中、上统的各个层位,根据泥盆系地层的岩性组合特征及其空间展布规律,其表现出关键性的控矿作用以及非常有利的成矿条件^[23]。

泥盆系地层具有十分丰富的岩石类型以及性质悬殊的岩性组合,毫无疑问,不同岩性的岩石类型具有不同的力学性质,当受到同一构造应力作用时,岩石会表现出不同程度的差异形变(见图 3),这种不一致形变的结果将会导致部分岩石破碎、滑脱,从而形成层

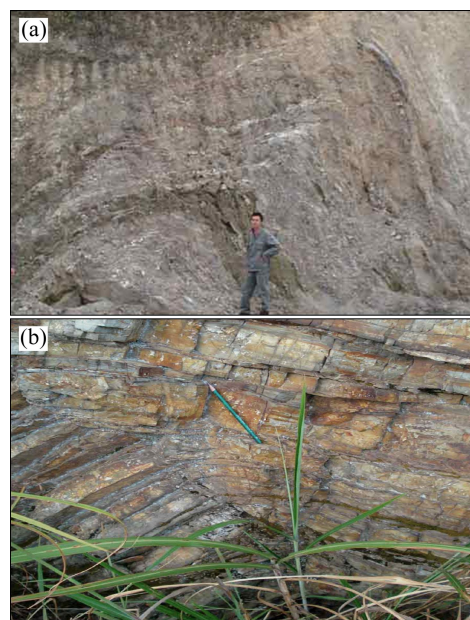


图3 泥盆系地层中发育的褶皱、揉皱等构造变形:(a) 同车江组地层发生揉皱现象,呈小背斜状;(b) 罗富组硅质岩地层局部褶皱,硅质岩受风化作用而性脆

Fig. 3 Fold and crumpled tectonic deformation of Devonian in Dachang ore field, Guangxi: (a) Crumple in Tongchejiang formation, appearing as small anticline; (b) Local fold of siliceous rock in Luofu formation, weathered and crumpled siliceous rock

间破碎带、剥离面等,为金属矿物元素的富集、结晶、成矿提供了十分有利的空间。

另外,经野外观察发现,矿区泥盆系地层岩性组合存在诸如灰岩与泥岩、页岩、泥页岩等互层现象(见图4),这就使得泥盆系本身就具备良好的储盖组合。通常,灰岩在构造作用下易于破碎,形成一些有利于矿液充填的空间,泥岩、页岩及泥页岩等低渗透性岩石则扮演了盖层的角色,这种岩性组合在三维空间上的配置构成了完美的成矿体系。



图4 广西大厂矿田泥盆系不同岩性地层互层现象:(a) 榴江组条带状灰岩与泥质条带及泥质岩互层;(b) 榴江组灰岩与泥质条带或泥质岩互层

Fig. 4 Strata interbedded phenomenon of different lithology of Devonian in Dchang ore field, Guangxi: (a) Banded limestone, muddy strip and mudstone interbed of Liujiang formation; (b) Limestone and muddy strip or mudstone interbed of Liujiang formation

6 结论

1) 泥盆系地层主量元素主要由 SiO_2 和 CaO 构成,次要成分包括 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 以及 K_2O 等。纳标组地层钙质含量较高,与生物礁灰岩的岩性密切相关。榴江组、罗富组、同车江组等地层由于属于硅质岩或夹有硅质岩、砂岩等, SiO_2 含量显著偏高,尤其是榴江组地层 SiO_2 含量表现为异常高值,显示出

明显的硅质岩特性。泥盆系地层经历了复杂多变的沉积环境,地层沉积、演化的历史过程中,岩石物源发生了不同程度的改变。

2) 泥盆系地层 ΣREE 含量差异较大,变化于 $(2.9\sim 318.77)\times 10^{-6}$ 之间,纳标组地层的 ΣREE 、 LREE 、 HREE 含量均较为稳定,且数值较小,显示出轻、重稀土元素均为亏损;罗富组地层的 ΣREE 、 LREE 、 HREE 均为最大者,表现为轻、重稀土元素均富集。泥盆系 LREE/HREE 的范围为 $3.53\sim 14.44$,均值为 6.48 ; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 $0.47\sim 3.18$ 之间,平均值为 1.16 ; δEu 介于 $0.27\sim 7.69$ 之间,均值为 1.43 ; δCe 介于 $0.52\sim 1.01$ 之间,平均值为 0.71 。泥盆系地层的微量元素组成主要包括Ba、Rb、Sr、Th、U、La、Ce、Pr、Nd等。

3) 泥盆系是大厂矿田的主要赋矿围岩,从很大程度上影响并控制着矿化的形态、矿体的产状、矿石的品位以及矿床的规模,是影响与控制矿床形成的关键因素。泥盆系多样化的岩石类型以及明显差异的岩性组合,有利于产生诸如层间破碎带、剥离面等储矿构造,有利于形成促进矿液富集的良好储盖组合,区域性的泥盆系地层为大厂矿田乃至整个丹池成矿带的大规模成矿作用提供了优越条件。

REFERENCES

- [1] 陈毓川. 大厂锡矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
CHEN Yu-chuan. Geology of Dachang tin deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [2] 梁婷, 陈毓川, 王登红, 蔡明海. 广西大厂锡多金属矿床地质与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
LIANG Ting, CHEN Yu-chuan, WANG Deng-hong, CAI Ming-hai. Geology and geochemistry of the Dachang tin-polymetallic deposit in Guangxi[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [3] 叶绪孙, 严云秀, 何海洲. 广西大厂超大型锡矿床成矿条件[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
YE Xu-sun, YAN Yun-xiu, HE Hai-zhou. The metallogenic condition of Dachang super large tin deposit in Guangxi[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.
- [4] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西泥盆纪沉积相古地理及矿产[M]. 南宁: 广西人民出版社, 1987.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China. The sedimentary facies palaeogeography and relatively mineral deposits of Devonian in Guangxi[M]. Nanning: Guangxi People's Publishing House, 1987.

- [5] 范森葵,黎修旦,成永生,陈承珍,黄伟洪. 广西大厂矿区脉岩的地球化学特征及其构造和成矿意义[J]. 地质与勘探, 2010, 46(5): 828-835.
FAN Sen-kui, LI Xiu-dan, CHENG Yong-sheng, CHEN Cheng-zhen, HUANG Wei-hong. Geochemical features of vein rocks and their significance to structure and mineralization in the Dachang ore district, Guangxi province[J]. Geology and Exploration, 2010, 46(5): 828-835.
- [6] 王登红,陈毓川,陈文,桑海清,李华芹,路远发,陈开礼,林枝茂. 广西南丹大厂超大型锡多金属矿床的成矿时代[J]. 矿床地质, 2004, 78(1): 132-138.
WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan, CHEN Wen, SANG Hai-qing, LI Hua-qin, LU Yuan-fa, CHEN Kai-li, LIN Zhi-mao. Dating the Dachang giant tin-polymetallic deposit in Nandan, Guangxi[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1): 132-138.
- [7] 蔡明海,梁婷,吴德成,黄惠民. 桂西北丹池成矿带花岗岩地球化学特征及其构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 306-313.
CAI Ming-hai, LIANG Ting, WU De-cheng, HUANG Hui-min. Geochemical characteristics of granites and its structural genetic environment in the Nandan-Hechi metallogenetic belt, northwest Guangxi[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(3): 306-313.
- [8] ZHAO K D, JIANG S Y, NI P, LING H F, JIANG Y H. Sulfur, lead and helium isotopic compositions of sulfide minerals from the Dachang Sn-polymetallic ore district in South China: implication for ore genesis[J]. Mineralogy and Petrology, 2007, 89: 251-273.
- [9] 廖宗廷,周祖翼,陈焕疆. 广西大厂泥盆系浊积岩和硅质岩的特征[J]. 石油实验地质, 1997, 19(1): 87-91.
LIAO Zong-ting, ZHOU Zu-yi, CHEN Huan-jiang. Characteristics of Devonian turbidites and silicalites in Dachang, Guangxi[J]. Experimental Petroleum Geology, 1997, 19(1): 87-91.
- [10] 黄伟洪,范森葵,陈春文,闭忠敏. 成矿规律研究在大厂矿田矽卡岩型锌铜矿床中的应用实例——以黑水沟—大树脚、羊角尖矽卡岩型锌铜矿床为例[J]. 矿床地质, 2012, 31(3): 535-544.
HUANG Wei-hong, FAN Sen-kui, CHEN Chun-wen, BI Zhong-min. Application of metallogenic regularity to study of skarn zinc-copper deposits in Dachang orefield: A case study of Heishuigou-Dashujiao and Yangjiaojian skarn zinc-copper deposits[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(3): 535-544.
- [11] 成永生,胡瑞忠,伍永田. 广西大厂矿田大福楼锡多金属矿床地质与地球化学特征[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 751-760.
CHENG Yong-sheng, HU Rui-zhong, WU Yong-tian. Geology and geochemistry of Dafulou tin-polymetallic ore deposit in Dachang ore field, Guangxi, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 751-760.
- [12] 张小路,王钟. 广西大厂隐伏岩体重力反演及其地质意义[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1990, 10(4): 417-425.
ZHANG Xiao-lu, WANG Zhong. The gravity inversion and its geological significance for the hidden granite body in Dachang, Guangxi[J]. Journal of Guilin College of Geology, 1990, 10(4): 417-425.
- [13] 敬荣中,黄永平,卢宗柳. 广西南丹县大厂矿田地球物理找矿方法示范[J]. 矿产与地质, 2007, 21(8): 461-467.
JING Rong-zhong, HUANG Yong-ping, LU Zong-liu. Demonstration of geophysical prospecting in the Dachang ore field of Nandan county, Guangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2007, 21(8): 461-467.
- [14] 王钟,张小路,罗润林,王志豪. 大厂锡多金属矿区深边部找矿中的 TEM 异常特征[J]. 桂林工学院学报, 2009, 29(3): 303-309.
WANG Zhong, ZHANG Xiao-lu, LUO Run-lin, WANG Zhi-hao. Abnormal characteristic of TEM response for prospecting depth and margin area of tin polymetallic deposit in Dachang[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2009, 29(3): 303-309.
- [15] 范森葵,王登红,梁婷,吴德成,韦可利,周鸿军,黄惠明,屈文俊. 广西大厂96号矿体的成矿元素地球化学特征与成因[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(4): 781-790.
FAN Sen-kui, WANG Deng-hong, LIANG Ting, WU De-cheng, WEI Ke-li, ZHOU Hong-jun, HUANG Hui-ming, QU Wen-jun. Geochemical characteristics of ore-forming elements and ore genesis of No.96 ore-body in the Dachang deposit, Guangxi[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(4): 781-790.
- [16] TAYLOR S R, MCLCNMAN S M. The continental crust: its compose and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Press, 1985.
- [17] 侯林,丁俊,汪雄武,彭惠娟. 川西丹巴铜炉房金矿区泥盆系危观群黑色岩系地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(S2): 205-215.
HOU Lin, DING Jun, WANG Xiong-wu, PENG Hui-juan. Geochemistry and metallogenic significance of the Devonian black rock series from the Tonglufang gold deposit in Danba area, western Sichuan province[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(S2): 205-215.
- [18] 吴鹏,韩润生,邹海俊,闵朝龙,李路乔,郭学兵,辛荣. 大姚六直铜矿床小河—石门坎矿段地层地球化学[J]. 地质与勘探, 2007, 43(3): 51-55.
WU Peng, HAN Run-sheng, ZOU Hai-jun, MIN Chao-long, LI

- Lu-qiao, GUO Xue-bing, XIN Rong. Stratigraphic geochemistry of Xiaohe-Shimenkan ore block in the Liuju copper deposit at Daoyao, Yunnan[J]. *Geology and Prospecting*, 2007, 43(3): 51–55.
- [19] CHENG Yong-sheng, HU Rui-zhong. Lead isotope composition and constraints on origin of Dafulou ore deposit, Guangxi, China[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(6): 1766–1773.
- [20] 戴塔根, 杜高峰, 张德贤, 王明艳. 广西大厂锡多金属矿床中铟的富集规律[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(3): 703–714.
- DAI Ta-gen, DU Gao-feng, ZHANG De-xian, WANG Ming-yan. Indium distribution in Dachang tin-polymetallic deposit of Guangxi province[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(3): 703–714.
- [21] CAI Ming-hai, MAO Jing-wen, LIANG Ting, PIRAJNO F, HUANG Hui-lan. The origin of the Tongkeng-Changpo tin deposit, Dachang metal district, Guangxi, China: clues from fluid inclusions and He isotope systematics[J]. *Miner Deposita*, 2007, 42: 613–626.
- [22] 成永生, 胡瑞忠. 广西大福楼锡多金属矿床铅同位素地球化学[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(11): 4381–4387.
- CHENG Yong-sheng, HU Rui-zhong. Lead isotope geochemistry of Dafulou tin-polymetallic deposit, Guangxi[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(11): 4381–4387.
- [23] FAN D, ZHANG T, YE J, PAŠAVA J, KRIBEK B, DOBES P, VARRIN I, ZAK K. Geochemistry and origin of tin–polymetallic sulfide deposits hosted by the Devonian black shale series near Dachang, Guangxi, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2004, 24: 103–120.

(编辑 何学锋)