

文章编号: 1000-4734(2022) 05-0605-13

黔西南晴隆锑矿床硅化对锑成矿的控制机制

支太云^{1,2,3}, 蒙信礼^{4*}, 杜丽娟^{1,3,5}, 陈军^{1,3}

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中国黄金集团 贵州有限公司, 贵州 贵阳 550002;
3. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 4. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局 物化探总队,
贵州 都匀 558000; 5. 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, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 贵州晴隆锑矿床是右江盆地低温热液矿集区代表性锑矿床, 硅化普遍发育。本文通过系统的岩相学研究, 认为晴隆锑矿床硅化可分为3期: 第1期硅化主要形成于大厂层沉积-成岩自蚀变过程, 表现为火山玻璃脱玻化重结晶作用; 第2期硅化与锑矿化关系密切; 而第3期硅化为热液成矿晚阶段产物, 与晚期脉状锑-金矿化相关。围岩、硅化围岩和矿石主微量元素分析显示, 富Si流体呈酸性使灰岩中大量的CaCO₃矿物溶解, 同时伴生强烈的热液钾化蚀变, Sb、As、Au、S、K等元素由热液带入, Ca和Na为带出。综合分析认为, 大厂层不仅为流体运移提供通道, 同时为成矿提供了充足空间和水/岩反应物质基础, 如为硫化物沉淀和脉石(方解石和萤石)沉淀提供Fe和Ca等。

关键词: 硅化; 大厂层; 晴隆锑矿床; 黔西南; 右江盆地

中图分类号: P611; P595

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.068

第一作者: 支太云, 男, 1987年生, 工程师, 硕士研究生, 从事地质学研究. E-mail: zhitaiyun@126.com

Controlling mechanism of antimony mineralization by silicification in the Qinglong Sb deposit in the SW Guizhou, China

ZHI Tai-yun^{1,2,3}, MENG Xin-li^{4*}, DU Li-juan^{1,3,5}, CHEN Jun^{1,3}

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. China Gold Group Guizhou Co. LTD, Guiyang 550002, China; 3. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. Nonferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Geophysical and geochemical Exploration Corps, Duyun 558000, China; 5. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;)

Abstract: The Qinglong Sb deposit is a representative antimony deposit in the low-temperature metallogenic area of the Youjiang Basin, and is characterized by abundant silicification. In this paper, three stages of the silicification has been identified based on detailed petrographic observation. The Stage I silicification is considered to have occurred mainly in the sedimentary-diagenetic self-alteration process in form of the devitrification and recrystallization of volcanic glass debris. The Stage II silicification is closely associated with the Sb mineralization. The Stage III silicification, occurred in the late hydrothermal ore-forming stage, is closely related to the veined Sb-Au mineralization. The analytical results of major and trace elements of wall rocks, altered wall rocks, and ores suggest that the acidic Si-rich fluid caused the dissolution of a large amount of CaCO₃ mineral in the limestone, and the strong hydrothermal potassic alteration of wallrocks. In the altered wallrocks contents of Sb, As, Au, S, and K elements were increased but contents of Ca, and Na were decreased comparing to the unaltered wallrocks, indicating that Sb, As, Au, S, and K were enriched but Ca and Na were depleted in the altered wallrocks. Based all the above, it is believed that the Dachang layer could provid not only the

收稿日期: 2021-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41902085); 矿床地球化学国家重点实验室开放研究基金(编号: 201905); 贵州大学培育项目(编号: 贵大培育[2020]7号)

* 通讯作者: 蒙信礼, 男, 1986年生, 工程师, 从事沉积矿床研究. E-mail: 396282905@qq.com

passage of the ore-forming fluid, but also the sufficient space for mineralization and the material basis for element exchange of the rock-water interaction, for example, it could provide Fe and Ca to have formed gangue minerals (fluorite and calcite) as well as sulfides.

Keywords: silicification; Dachang layer; Qinglong antimony deposit; southwestern Guizhou; Youjiang basin

右江盆地作为我国华南低温成矿域重要的多金属矿床组成部分,产出了金、锑、汞、砷、铅锌等一系列中低温热液矿床,尤其以金、锑矿床最具特色^[1-2]。这些矿床大多赋存在二叠系和三叠系沉积岩中^[3-5],围岩蚀变主要包括硫化(形成毒砂和黄铁矿)、硅化(石英)、去碳酸盐化(碳酸盐矿物溶解)、热液粘土化(伊利石化和高岭石化)以及少量的萤石化。以往的研究对于去碳酸盐化和硫化作用与金矿化的关系基本取得共识,认为成矿流体交代蚀变含 Fe 碳酸盐(Fe 白云石),释放 Fe²⁺形成含金锑黄铁矿是金矿化的主要机制^[6-7]。值得注意的是,硅化也是该类矿化中最为普遍的蚀变,表现为成矿流体与围岩交代形成碧玉状石英、无定型的非晶质硅和脉状石英^[8],在区域上往往形成较大范围的硅质蚀变晕,严格控制着金、锑矿体的产出^[9]。

贵州晴隆锑矿床是黔西南地区唯一的大型锑矿床,目前已累计探明锑金属量达 30 万吨,在晴隆锑矿区及外围查明接替总锑金属量约 7 万吨,显示出巨大的资源潜力^[10]。前人在锑成矿物质来源^[11-12]和成矿流体演化过程^[8,12-13]和成矿时代^[14-15]等开展了较系统研究,取得了诸多研究成果,提出流体演化于岩浆热液和成矿物资源于盆地变质基底。此外,晴隆锑矿床赋矿地层大厂层(SBT)为一套以硅化为主的火山碎屑岩沉积建造,90%以上的锑矿体和金矿化体均位于大厂层之中。但是,硅化与锑成矿之间关系,硅化过程中元素的迁入迁出及对锑成矿的控制机制需要进一步的研究工作。基于此,本文以晴隆锑矿床硅质蚀变-成矿为目标,在岩相学的基础上,对围岩、硅化围岩和矿石进行系统的元素地球化学分析,以揭示水-岩相互作用过程及矿化过程中元素的迁移规律,探讨硅化对锑成矿的控制机理。

1 地层、矿化与硅化蚀变特征

1.1 地层和锑、金矿化

晴隆锑矿区出露地层主要为中二叠统茅口组(P_{2m})、大厂层(P_{2d})和峨眉山玄武岩(P_{2-3em})以及龙潭组(P_{3l})。其中,茅口组地层为一套浅海台地碳酸盐岩,与上覆大厂层呈蚀变接触或不整合接触;龙潭组(P_{3l})为晚二叠世沉积的海陆交互的含煤地层。赋矿地层大厂层为中二叠世茅口灰岩与上覆峨眉山玄武岩间的一套硅质蚀变火山碎屑岩。已有的研究表明,大厂层原岩和峨眉山玄武岩均属于基性岩浆事件的产物,本区出露的玄武岩为亚碱性玄武岩(拉斑玄武岩)系列,与贵州西部出露的玄武岩一致^[16]。晴隆锑矿床的锑矿体 95%以上都产于大厂层,大厂层在矿区内呈带状分布,厚度变化较大(0.00~46.97 m),一般厚度 10.00 m 左右,其厚度变化与锑矿化呈正相关关系,即大厂层厚度较大的区域锑矿化较好,反之亦然(图 1)。

晴隆锑矿床中锑矿体规模、厚度、品位变化较大。单矿体长度可达 610 m,宽度为 140 m,最小者长、宽度仅为 50 m。矿体厚度最小 1.46 m,最大可达 3.00 m,一般 2.00 m 左右。矿体最大平均品位 6.89%,最小 1.22%,一般 4%~7%。锑矿体主要富集在大厂层(P_{2d})中,峨眉山玄武岩(P_{2-3em})中的变余玄武岩次之。根据大厂层各岩性段锑矿体的产出形态、围岩及矿物组合特征,锑矿体产出基本呈现以下规律(图 2): 1) 产在大厂层 2 段(P_{2d}²)灰黑色硅质蚀变岩和白色强硅化灰岩中的锑矿体,多呈囊状、透镜状、不规则状,辉锑矿与石英和萤石伴生,矿体规模较小,长、宽多小于 15 m,厚介于 0.3~3.0 m 之间,矿石多为块状构造,品位富,少数为浸染状矿石,品位较低; 2) 产于大厂层 2 段(P_{2d}²)顶部及 3 段(P_{2d}³)底部的粘土化玄武岩、凝灰岩中的矿体,呈层状、似层状或脉状产出,矿体规模较大,长 10~50 m,品位介于 2%~35%,辉锑矿与石英和黄铁矿组合产出。

晴隆铋矿床伴生金矿化体赋矿岩石为硅化黄铁矿化角砾状粘土岩、硅化角砾状粘土岩及强硅化灰岩。矿体呈似层状、透镜状产出, 单个矿体长 3~135 m, 宽 10~40 m; 单矿体的厚度一般在 0.5 m 至 3.8 m 之间。2016 年“贵州省晴隆铋矿整装勘查”项目成果显示, 大厂层中金矿体矿石品位较稳定, 一般在 0.5~4.18 g/t 之间, 发现矿化体数个, 但目前尚未发现工业矿体。

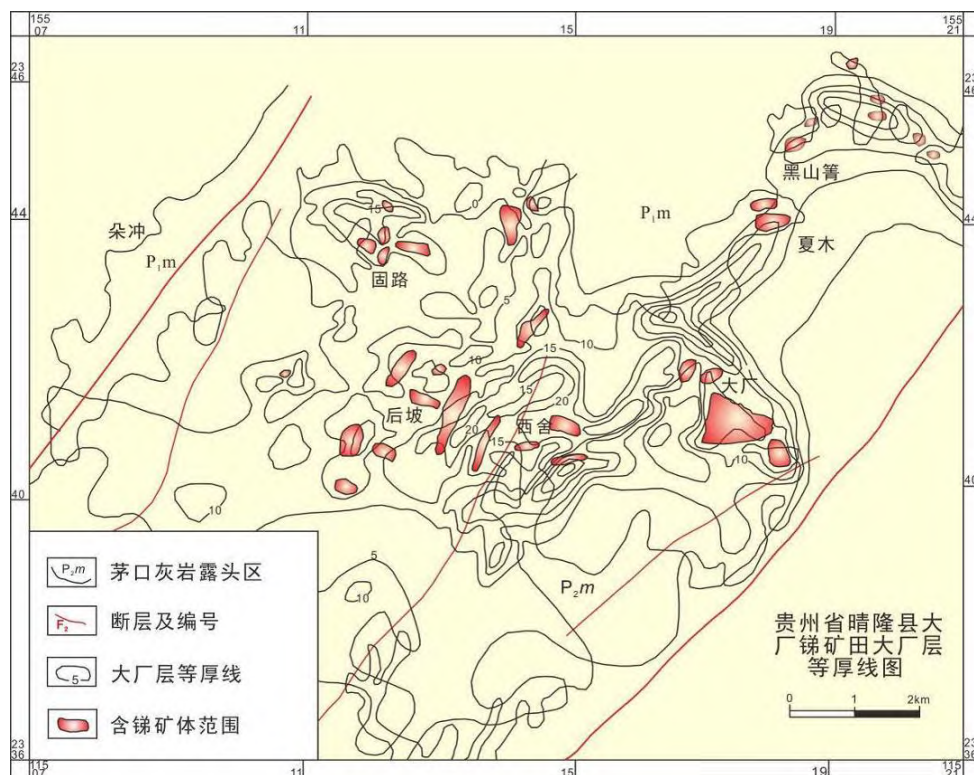


图 1 晴隆铋矿区大厂层等厚线及矿体产出关系图^[17]

Fig. 1. The map showing relationship between thicknesses of the Dachang Layer and ore bodies for the Qinglong deposit.

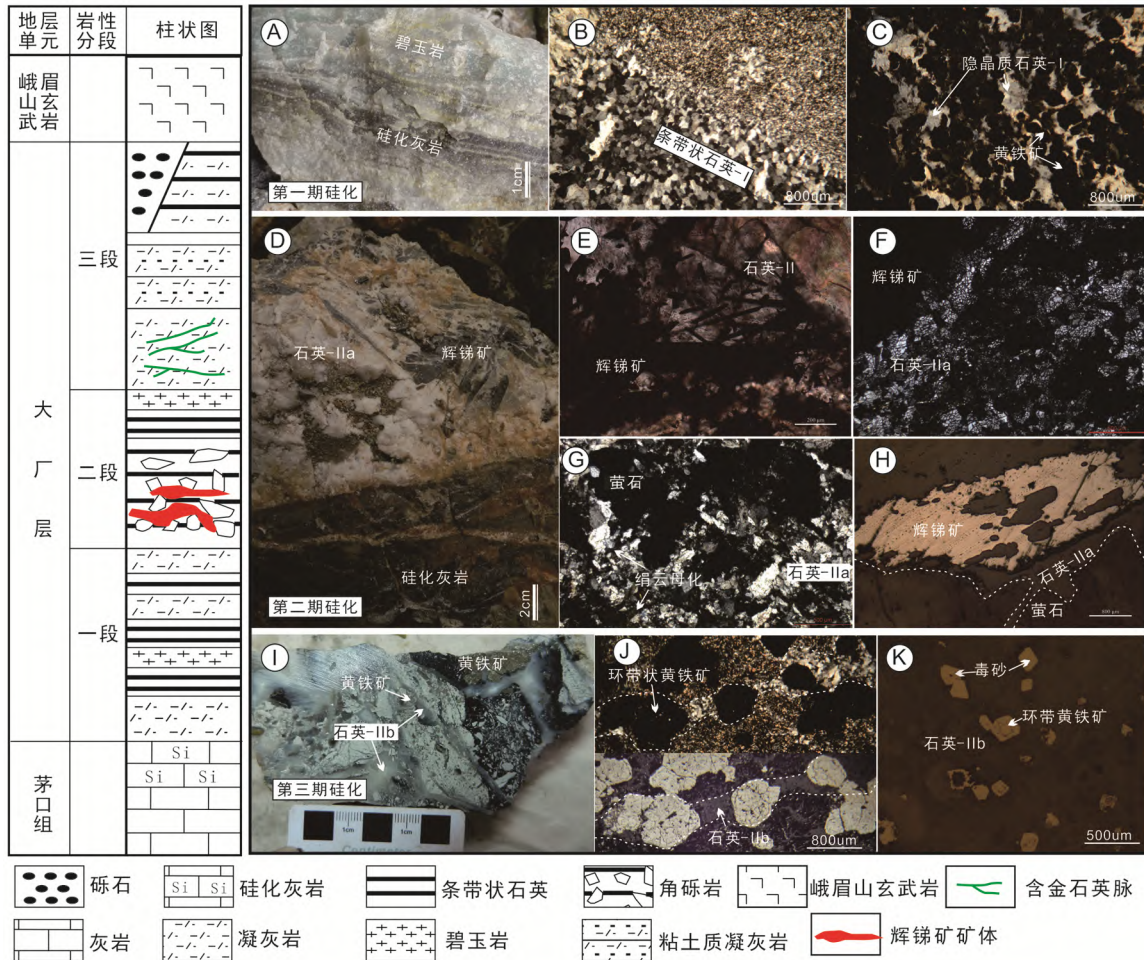
1.2 硅化与铋(金)成矿之间的关系

宏观上, 硅化与铋矿关系十分密切, 矿区硅化可分 3 期。

第 1 期硅化为大厂层硅质岩的沉积和火山玻璃脱玻化重结晶作用, 硅化(石英-I)通常使隐晶质玉髓转变为石英(图 2B)。本期硅化为成岩过程中的沉积作用和自蚀变作用形成, 硅化结晶较细, 形成岩石的隐晶-细粒结构和包含结构(图 2A~C)。矿物以石英为主, 玉髓次之。颗粒一般在 0.01~0.20 mm 之间, 常含碳质、磷灰石、锐钛矿和少量的萤石。

第 2 期硅化(石英-IIa)主要存在于透镜状铋矿体中, 石英颜色多呈乳白色、绿色、淡棕色、颗粒一般在 0.05~1 mm 之间。石英常呈脉状和团块状产出或充填于围岩裂隙或晶洞(图 2D)。第 2 期硅化与铋矿化关系密切, 与之共生的矿物有辉铋矿、高岭石、萤石等(图 2H)。该类石英结构为棒状结构、放射状结构和球粒结构, 构造有角砾状构造、交代溶蚀构造(图 2G)、脉状构造(图 2H)、胶状构造和碎裂结构(图 2F)等。该期硅化的石英具波状消光和光性异常特征(图 2E~G), 并以不含黄铁矿为特征。

第 3 期硅化(石英-IIb)主要表现为黄铁矿-辉铋矿-石英脉体(图 2I~K), 为热液成矿晚阶段产物。根据前人对晴隆铋矿床成矿关系的研究, 这些石英脉通常切穿与第 2 期硅化有关的透镜状铋矿石^[14]。含矿石英脉体围岩主要为伊利石化和黄铁矿化, 含金在 0.4~1.2 g/t 之间^[2], 该期硅化主要发育于大厂层 3 段(P₂d³)粘土化凝灰岩中, 次为大厂层 2 段(P₂d²)角砾岩。



A~C. 沉积-成岩阶段硅化特征; D~H. 热液主成矿期硅化蚀变特征; I~K. 热液晚期硅化蚀变特征

图 2 晴隆锑矿床三期硅化特征及含矿岩系柱状图

Fig. 2. Characteristics of the silicification of three stages in the Qinglong antimony deposit and the column of ore-bearing rock series.

2 样品采集及研究方法

分析样品分别来自晴隆锑矿大厂矿段 1 号剖面、大厂矿段 2 号剖面、三望坪矿段和雷钵洞矿段, 样品岩性主要为凝灰岩、硅化凝灰岩、玄武岩、炭质泥岩和硅化灰岩等。

常量元素测试工作在广州澳实检测中心完成。具体方法: 首先在制备好的已磨至 200 目的粉样中加入 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7\text{-LiBO}_2$ 助熔物, 充分混合后, 使之在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 的熔炉中熔化。熔融物冷却后加入稀 HNO_3 和稀 HCl 溶解, 然后用 X 射线荧光融片法进行定量测试, 仪器型号为 PANalytical AXIOS, 元素之间的光谱干扰经矫正后, 即得最终分析结果, 分析误差优于 2%。烧失量分析主要是将制备好的定量样品放入马弗炉中, 于 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 加热 1 h, 等冷却后称重, 样品加热前后的重量差即是烧失百分比。

金含量分析采用火焰原子吸收法, 等离子光谱定量, 具体方法: 将制备好的碎至 200 目的粉样 20 g 存入烧杯中, 分次加入 30~40 mL 浓硝酸并充分搅拌同时进行加热, 待反应平稳后低温微沸、充分溶解后分次加入固体氯酸钾 5~6 g, 然后加入盐酸 50~60 mL 并搅拌, 继续加热微沸溶解 25~30 min 后取下稍冷, 温水稀释至 250 mL, 然后搅拌静置, 待分层明显后进行抽滤。抽滤结束后取出含金活性炭置于坩埚中先进行低温炭化, 再将坩埚放入高温炉灰化, 接着加入王水溶解后用纯净水定容, 最后用等离子光谱进行定量。

微量元素测试工作分别在广州澳实检测中心和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完成。广州澳实检测中心微量元素分析方法采用电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-AES) 测定。具体方法: 将制备好的碎至 200 目的粉样用 HClO_4 、 HNO_3 、 HF 和 HCl 进行消解, 静置一周后烘干, 烘至近干后的样品用稀 HCl 溶解定量, 加入 Rh 内标溶液, 用等离子体发射光谱仪采用 ME-MS61 方法进行测试分析, 分析误差优于 3%。稀土元素分析方法: 采用电感耦合等离子体质谱仪测定, 具体方法为: 将制备好的定量样品加入到 LiBO_2 溶剂中, 混合均匀, 在 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的熔炉中熔化, 待溶液冷却后, 用硝酸定容, 加入 Rh 内标溶液, 再用等离子体质谱仪采用 ME-MS81 方法定量测试分析。

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微量元素分析采用加拿大 Perkin-Elmer 公司 ELAN DRC-e 型四级杆型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS), 对微量元素和稀土元素的检测下限为 $0.1n \times 10^{-9} \sim n \times 10^{-9}$, 分析精度优于 10%, 大多数优于 5%。实验流程: 1) 碎样, 至 200 目; 2) 称样, 称取约 50 mg 样品放入 Teflon 中; 3) 溶样, 加入 1 mL 浓 HF , 在电热板上蒸干; 再加入 1 mL HF 和 0.5 mL HNO_3 , 加盖拧紧后放入烘箱中, 在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 下分解 48 h; 4) 取出冷却后在电热板上低温蒸干, 加入 1 mL HNO_3 再蒸干, 重复一次, 最后加入 2 mL HNO_3 和 5 mL 蒸馏水, 重新加盖后在 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 溶解残渣 3 h; 5) 取出样品, 冷却后加入 1 mL $1\mu\text{g/mL}$ 的 Rh 溶液, 转移至 50 mL 离心管中上机测试; 6) 用标样 OU-6、AMH-1 及 GBPG-1 作质量监控, 用 Rh 作内标检测仪器漂移, 采用标准曲线法校正。详细的分析方法参照文献[18]。

3 结果及讨论

3.1 围岩、矿石元素地球化学

3.1.1 主量元素

对 11 件围岩样品和 4 矿石进行常量元素分析, 结果列于表 1。主量元素进行综合分析表明, 晴隆铋矿床岩/矿石 $w(\text{SiO}_2)$ 变化较大 ($2.94\% \sim 94.8\%$), 但大部分矿石中 SiO_2 含量较高 ($w(\text{SiO}_2) > 50\%$), 这与矿床发育大规模的硅化相一致。此外, 分析结果 (图 3A) 表明, Fe_2O_3 在铋矿石中含量相对较低, 而在含金矿石中相对较高, 与成矿早期阶段无黄铁矿而成矿晚期阶段发育大量黄铁矿的现象是相符的。 $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 关系图 (图 3B) 显示, 矿石和围岩具有不同程度的钾化, 说明在热液蚀变过程中有粘土矿物生成。硅化灰岩是晴隆铋矿床最主要的赋矿围岩类型, SiO_2-CaO 关系图显示, 随着样品中 SiO_2 增加, CaO 含量反之降低 (图 3D), 而在矿石样品中基本不含 CaO (图 3C), 揭示这些富 Si 流体呈酸性并能使得灰岩中大量的 CaCO_3 矿物溶解, 表现为强烈的去碳酸盐化, 由去碳酸盐化导致的体积丢失可以产生不活动元素的相对富集^[19-20], 这与美国内华达卡林型金矿床类似^[21-22]。

3.1.2 微量元素

对 26 件岩/矿石进行微量元素分析, 同时一并提供了部分主量元素 (Al、Ca、Fe、K、Mg、Na、Ma、S 和 Ti) 的参考数据, 具体测试结果见表 2。晴隆铋矿床普遍发育硅化、粘土化和黄铁矿化等围岩蚀变, 而蚀变过程通常伴随着元素的带入带出。元素的活动性和不活动性可以用所有样品的 2 个元素作散点图的方法来确定^[23]。因此, 通常利用矿石与围岩之间主量和微量元素对数等值线图的方法可以确定元素在矿化以及蚀变过程的迁移规律^[5,24-25]。

图 4 显示了在热液蚀变过程中或矿化过程中元素的带入和带出情况。本次研究选择未蚀变围岩样品、具有明显蚀变 (硅化和黄铁矿化) 的围岩样品以及矿石样品进行微量元素组成对比分析。在围岩发生蚀变和矿化的过程中, Au、Sb、As、Pb、Tl 和 K_2O 显示迁入, 尤其是成矿元素 Au、As、Sb 带入

量在矿石样品中最大; Cu 在蚀变围岩总体呈弱的亏损, 但在矿石样品中则呈明显的带入, 表明 Cu 只是在含矿流体中较为富集, 这与环带状黄铁矿中发现共生含铜硫化物的现象是一致的^[2]; K₂O 的带入与普遍发育的热液粘土化有关, 如大量含钾热液蚀变矿物伊利石的形成^[26]。此外, Co 和 Ni 在成矿过程中也呈弱的迁入。在围岩蚀变和矿化过程迁出的元素主要有 Na₂O、CaO 和 Zn, 其中 Na₂O 和 CaO 的迁出分别是由玄武质凝灰岩热液粘土化和灰岩去碳酸岩化所致; Zn 作为金属元素呈迁出状态, 表明在对大厂层在沉积-成岩阶段就相对富集 Zn, 这与在野外调研过程中于茅口组灰岩之中发现少量菱锌矿的现象是吻合的, 在围岩去碳酸岩化过程中使得菱锌矿溶蚀, Zn 被迁出。TiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 基本无变化, 其中前两者属于不活动元素, 一般不随着热液活动的迁入和迁出。Fe₂O₃ 无变化说明含 Au 硫化物中的 Fe 是由大厂层自身提供, 而热液流体没有为矿化提供 Fe。苏文超等人^[7]2012 年对水银洞和丫他金矿床流体包裹体进行 LA-ICP-MS 研究发现, 成矿流体中同样不含 Fe, Fe 主要由围岩提供。

表 1 晴隆锑矿床岩/矿石常量元素测试结果 (w_B%)

Table 1. Test results of major elements in the rocks/ores from the Qinglong antimony deposit

样品	Al ₂ O ₃	As ₂ O ₃	BaO	CaO	Cr ₂ O ₃	CuO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	NiO
围岩												
SWP-1	12.20	<0.01	<0.01	7.71	<0.01	0.03	13.4	0.18	3.73	0.19	3.5	0.01
DC-13	14.40	<0.01	0.07	3.71	0.01	<0.01	13.76	1.76	2.26	0.09	4.41	0.01
DC-14	13.55	<0.01	0.04	2.31	<0.01	<0.01	23.16	0.97	0.5	0.04	5.55	<0.01
DC-2-S	18.05	0.03	0.07	0.1	0.06	<0.01	1.39	4.81	0.2	0.01	0.07	0.01
DC-8	5.36	0.52	0.01	0.04	0.03	0.01	15.98	1.43	0.13	0.01	0.04	0.01
DC-10	4.88	0.75	0.02	0.04	0.01	<0.01	23.43	1.2	0.05	<0.01	0.05	0.01
DC-12	18.15	0.07	0.02	0.93	0.02	<0.01	1.92	1.91	0.14	<0.01	0.06	0.01
DT-5	16.00	0.21	0.04	0.07	0.02	0.01	10.96	4.19	0.19	<0.01	0.06	0.01
DC-0	0.18	<0.01	<0.01	45.1	0.01	<0.01	0.62	0.02	0.16	0.03	<0.01	0.01
DC-1	0.55	0.06	0.06	0.13	0.02	<0.01	12.22	0.05	<0.01	0.01	<0.01	0.01
DT-9	0.86	0.02	0.09	45.9	<0.01	<0.01	1.22	0.08	5.65	0.07	<0.01	0.01
矿石												
ST-1	0.99	0.04	<0.01	0.55	<0.01	0.05	1.67	0.1	<0.01	<0.01	0.04	<0.01
ST-2	7.61	0.09	<0.01	9.51	0.03	0.04	4.67	1.87	0.42	<0.01	0.01	0.02
ST-3	0.06	0.01	<0.01	>60	0.01	<0.01	0.12	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
ST-4	1.9	0.02	<0.01	0.26	0.02	<0.01	0.77	0.3	0.03	0.01	0.01	0.01
样品	P ₂ O ₅	PbO	SiO ₂	SnO ₂	SO ₃	SrO	TiO ₂	V ₂ O ₅	ZnO	ZrO ₂	LOI	
围岩												
SWP-1	0.28	<0.01	42.9	<0.01	0.16	0.01	2.79	0.07	0.01	0.02	12.03	
DC-13	1.78	0.01	50.2	<0.01	0.02	0.02	4.25	0.04	0.03	0.03	3.51	
DC-14	1.82	<0.01	43.9	<0.01	0.05	0.02	4.05	0.05	0.01	0.02	2.57	
DC-2-S	0.05	<0.01	68.2	0.01	0.16	<0.01	3.13	0.07	<0.01	0.05	3.09	
DC-8	0.03	0.01	65.6	<0.01	24	0.01	1.08	0.02	<0.01	0.02	9.16	
DC-10	0.01	0.01	55.9	<0.01	15.35	<0.01	0.86	0.02	<0.01	0.03	13.43	
DC-12	1.84	<0.01	63.7	<0.01	0.41	0.05	5.04	0.06	0.01	0.02	5.51	
DT-5	0.03	0.01	56.7	0.01	19.65	0.01	2.92	0.05	<0.01	0.06	8.29	
DC-0	<0.01	<0.01	18.0	<0.01	0.82	0.02	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	34.30	
DC-1	0.01	<0.01	86.1	<0.01	0.22	<0.01	0.04	0.02	<0.01	<0.01	0.63	
DT-9	0.03	<0.01	3.9	<0.01	0.84	0.03	0.18	<0.01	<0.01	<0.01	41.43	
矿石												
ST-1	0.04	<0.01	81.4	0.04	0.5	<0.01	2.09	0.01	<0.01	<0.01	1.28	
ST-2	0.3	<0.01	66.6	0.01	8.01	0.04	1.06	0.04	<0.01	0.02	4.82	
ST-3	<0.01	<0.01	2.94	0.01	0.06	0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	1.19	
ST-4	<0.01	<0.01	93.8	<0.01	0.23	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.69	

3.2 大厂层控矿机制

在矿床学研究中, 矿石及围岩的常量元素和微量元素组成是地质地球化学过程的示踪剂, 通常用于反映矿床的物质组成和岩、矿石组分变化^[8]。常量元素地球化学特征是衡量矿床形成过程中组分变化的重要手段, 而微量元素在大多数情况下是以类质同象的方式进入矿物, 通过元素含量或者元素组合的对比分析研究, 可以有效指示元素的富集迁移规律和揭示某种地质作用的发生。晴隆锑矿床存在不

表2 晴隆锑矿床岩/矿石微量元素测试结果

Table 2. Test results of trace elements in the rocks/ores from the Qinglong antimony deposit

样品	w _B /%								w _B /10 ⁻⁶		
	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	Ti	S	Mn	P	Ag
J1-1	0.33	0.29	24.10	0.10	0.01	<0.01	0.018	10.00	75	20	2.09
J1-14	3.21	0.93	7.99	0.03	0.01	0.01	1.725	8.73	75	3030	0.75
J1-17	9.48	1.07	7.41	0.71	0.08	<0.01	2.730	10.00	38	750	0.57
DC2'-1	2.70	0.06	9.96	0.65	0.07	0.03	2.89	0.42	39	3970	0.07
DC2'-2	6.97	0.02	23.00	2.82	0.27	0.01	1.185	0.44	<5	2830	0.23
DC2'-3	3.58	0.19	3.90	0.06	0.01	0.01	1.09	0.97	45	2920	0.94
DC2'-5	2.73	0.07	9.37	0.49	0.03	0.01	1.295	9.39	63	6050	1.28
DC2'-6	11.6	0.04	1.94	5.48	0.56	0.01	2.97	1.04	10	1450	0.27
JP1-1	5.78	0.03	1.77	2.35	0.20	0.01	1.145	0.65	52	340	0.89
JP1-2-2	2.95	0.04	2.59	1.12	0.08	0.01	0.524	2.18	59	190	2.36
JP1-5	7.79	0.19	6.91	3.40	0.35	0.02	1.63	0.86	58	1580	1.27
JP2-4	9.12	0.04	3.03	4.06	0.11	0.05	2.18	2.33	37	230	1.49
LBDC-1	6.99	5.78	9.04	0.44	1.04	0.01	1.805	0.03	766	1460	0.01
LBDC-2	7.40	6.86	8.88	0.31	2.11	0.01	1.93	0.03	1200	1630	<0.01
LBDC-3	7.72	5.46	9.69	0.26	2.16	0.01	2.04	0.12	1140	1690	0.01
SP-1	6.54	5.71	9.27	0.15	2.18	2.68	1.710	0.06	1520	1340	0.09
DC-13	7.35	2.60	9.00	1.38	1.24	3.19	2.17	0.01	686	7370	0.04
DC-14	6.77	1.59	14.90	0.76	0.25	4.00	2.13	0.01	341	7640	0.07
DC-2-S	9.39	0.08	0.97	4.11	0.10	0.05	1.885	0.06	49	240	0.06
DC-8	3.06	0.03	11.55	1.23	0.07	0.01	0.699	10.00	57	120	8.58
DC-10	2.73	0.04	16.15	1.02	0.03	0.01	0.545	10.00	38	30	1.61
DC-12	8.48	0.61	1.27	1.55	0.07	0.03	1.765	0.04	19	1640	0.03
DT-5	8.57	0.05	7.65	3.50	0.09	0.03	1.790	8.36	27	150	2.05
DC-0	0.10	31.4	0.45	0.02	0.13	0.01	0.015	0.38	214	30	0.02
DC-1	0.30	0.10	8.47	0.04	<0.01	<0.01	0.029	0.09	62	50	0.13
DT-9	0.48	32.3	0.86	0.06	3.47	<0.01	0.109	0.35	551	150	0.12
ST-2	4.11	7.22	3.33	1.58	0.24	0.01	0.654	3.50	35	1410	1.71
JP1-2-1	3.27	0.13	1.24	0.22	0.02	0.01	0.083	2.8	58	40	5.82
DSY-6	5.92	0.17	3.14	2.4	0.46	0.01	1.24	2.48	63	1610	1.67
DSY-7	3.79	0.14	1.41	1.57	0.29	0.01	0.673	3.63	59	850	0.78
DSY-8	4.11	0.12	1.84	1.6	0.31	0.01	0.802	2.93	46	1020	0.95
DSY-9	3.06	0.2	10.4	1.13	0.23	<0.01	0.764	0.62	57	1620	1.61
ST-4	0.97	0.20	0.49	0.25	0.02	0.01	<0.005	0.11	56	<10	1.14
ST-1	0.54	0.45	0.56	0.08	0.01	0.03	0.748	0.21	46	100	4.94
ST-3	0.03	45.7	0.07	<0.01	<0.01	0.01	<0.005	0.03	7	20	0.06
J1-16	6.33	0.19	21.8	2.16	0.28	<0.01	2.11	10	<5	6740	2.31
JP1-3	1.24	0.05	4.5	0.43	0.04	<0.01	0.295	3.7	144	80	3.07
JP1-4	1.96	0.23	13.7	0.77	0.07	0.01	0.347	10	76	80	6.73
JP2-1	6.12	0.19	11.95	2.07	0.14	0.02	0.87	0.37	75	200	1.87
JP2-2	5.69	0.13	6.65	2.17	0.16	0.02	0.883	0.39	260	220	0.91
JP2-3	5.48	0.07	13.55	2.88	0.14	0.03	0.904	2.06	39	190	2.54

续表 2

样品	$w_B/10^{-6}$												
	As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf
J1-1	398	10	0.11	0.04	0.39	8.49	8.4	56	1.09	53.4	1.89	0.13	0.1
J1-14	409	160	0.19	0.03	0.13	64.7	25.1	31	2.05	18.8	7.3	0.12	2.9
J1-17	232	20	0.28	0.12	0.08	86.2	14	100	1.75	25.4	35	0.15	3.9
DC2'-1	322	160	0.58	0.03	0.1	129	3.7	16	2.1	10.2	27.1	0.19	2.2
DC2'-2	1415	90	0.34	0.47	<0.02	146.5	1.9	94	6.26	5.9	58.8	0.22	6.6
DC2'-3	388	50	0.15	0.02	0.22	71.6	3.9	38	3.41	20.5	11.1	0.13	1.7
DC2'-5	813	60	0.21	0.05	0.08	73.6	8	47	2.06	20.6	8.59	0.13	2.3
DC2'-6	178.5	150	0.59	0.32	<0.02	241	5.2	288	9.86	12.5	110	0.3	6.1
JP1-1	491	80	0.66	1.02	0.1	152	3.7	354	3.72	12	31.5	0.18	6.1
JP1-2-2	1820	70	0.55	0.6	0.33	66.2	14.1	209	4.51	24.3	13.15	0.11	3.2
JP1-5	3480	170	2.12	0.64	0.25	168	9.4	239	6.69	22.4	39.8	0.2	9.8
JP2-4	2220	560	1.49	0.89	0.08	211	3.8	278	5.71	20.5	42	0.18	6.1
LBDC-1	61.5	50	1.19	0.02	0.04	64.5	47	47	7.1	124.5	23.5	0.11	5.2
LBDC-2	19.8	30	1.16	0.01	0.06	66	57.8	49	5.76	136.5	28.9	0.11	5.8
LBDC-3	12	30	1.32	0.01	0.08	61.5	67.2	54	4.92	83.5	28.8	0.12	5.6
SP-1	5.7	40	1.46	0.04	0.06	65.1	39.9	46	4.71	282	25.5	0.26	4.5
DC-13	3.9	570	1.40	0.03	0.05	127.5	37.4	7	1.97	3.9	25.1	0.41	1.8
DC-14	5.2	370	1.18	0.04	0.04	131.0	17.2	6	1.55	4.0	17.40	0.42	1.9
DC-2-S	209	660	1.15	3.66	<0.02	180.5	1.2	411	2.12	2.3	34.4	0.29	6.8
DC-8	3560	60	0.35	0.61	1.25	66.0	3.2	135	1.98	46.1	13.15	0.29	4.2
DC-10	4920	120	0.35	0.28	0.44	15.20	6.7	33	1.24	32.4	10.90	0.25	3.5
DC-12	143.5	200	1.16	0.02	0.45	157.5	4.1	54	1.71	37.8	24.3	0.44	3.3
DT-5	1305	320	0.84	0.58	0.17	190.0	4.7	123	4.10	45.8	39.7	0.30	7.6
DC-0	22.9	10	0.11	<0.01	0.13	16.45	1.3	16	0.12	3.8	0.63	<0.05	0.1
DC-1	424	510	0.26	0.06	0.03	3.77	0.5	113	1.55	8.5	2.53	0.12	0.2
DT-9	105.0	950	0.12	0.01	0.22	12.35	4.0	6	0.18	16.7	1.51	0.05	0.3
ST-2	655	30	0.57	0.40	1.02	72.4	19.2	184	5.94	348	18.25	0.21	3.7
JP1-2-1	813	10	0.34	0.04	1.72	12.6	2	66	4.12	83.7	9.91	0.21	0.5
DSY-6	185.5	70	1.81	0.14	0.98	106.5	66.4	83	10.05	118	26.7	0.18	4.9
DSY-7	55.1	30	1.2	0.17	2.21	68.9	21.8	115	7.17	140.5	17.6	0.17	3.1
DSY-8	88.9	50	1.38	0.09	0.89	61.5	35.4	94	7.41	102.5	17.45	0.15	3.4
DSY-9	1415	160	1.16	0.1	0.22	55.6	9.4	72	4.79	72.9	14.5	0.13	2.6
ST-4	51.3	10	0.14	0.02	0.08	0.65	0.4	11	5.37	4.8	1.60	0.08	<0.1
ST-1	97.3	10	0.18	0.05	1.69	17.15	3.4	33	4.80	368	1.43	0.10	3.3
ST-3	48.1	<10	0.07	<0.01	0.03	5.70	1.1	2	0.24	4.6	0.16	0.06	0.1
J1-16	2040	40	0.31	0.19	0.03	178	29.7	113	4.8	61.7	27.5	0.24	5
JP1-3	1000	30	0.4	0.27	0.39	35.5	3.6	103	2.86	33.4	5.7	0.1	1.7
JP1-4	1190	40	0.34	0.39	0.7	21.5	7.8	183	2.98	63.2	8.01	0.11	2.1
JP2-1	8280	180	1.81	0.3	0.68	107.5	4.1	74	5.25	36.8	24.6	0.22	3.9
JP2-2	3910	210	1.49	0.22	0.29	105	4.9	94	6.2	14.7	24.7	0.2	4.7
JP2-3	>10000	200	0.71	0.31	0.05	119	2.4	78	4.91	30.2	35.9	0.2	2.7
样品	La	Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	Re	Sb	Sc	In	Se	
J1-1	3	4.1	2.25	0.6	9.4	8.2	2	0.002	37.4	0.8	0.038	4	
J1-14	26	17.8	2.23	22.8	6.4	5.6	1.6	0.002	81.8	9.8	0.059	3	
J1-17	34.3	13.7	1.18	51.8	18.2	6.7	32.2	<0.002	109.5	19.9	0.061	2	
DC2'-1	52.4	5.4	1.72	38.5	1.5	3.9	37.2	<0.002	116	15.9	0.086	1	
DC2'-2	56.9	3.3	1.43	66.4	4.4	2.5	129.5	<0.002	203	10.8	0.17	2	
DC2'-3	28.5	15	2.29	15.5	1.7	3.1	2.3	<0.002	199.5	5.5	0.064	8	
DC2'-5	33.3	8.7	2.58	25.7	17.8	10.3	15.8	0.017	193.5	6.2	0.09	6	

续表 2

样品	La	Li	Mo	Nb	Ni	Pb	Rb	Re	Sb	Sc	In	Se	
DC2'-6	111	2.6	1.68	147.5	8	3.9	267	0.074	1300	29.9	1.78	2	
JP1-1	68.5	9.3	11.65	31.5	11.3	29.6	45.8	<0.002	283	9.6	0.216	3	
JP1-2-2	39.3	10.1	3.16	15.2	22.1	14.4	21	<0.002	474	4.9	0.134	2	
JP1-5	76.3	5.5	6.67	69	16.4	18.4	56.7	<0.002	1915	19.3	0.32	3	
JP2-4	61.4	6.9	2.02	91.1	16.2	2.4	77.1	<0.002	856	11.3	0.349	2	
LBDC-1	26.5	27	1.16	24.2	77.1	3.9	15.7	<0.002	79.7	31.4	0.107	1	
LBDC-2	27.6	27.1	1.1	26.4	82.8	2.2	11.7	<0.002	35.7	34.3	0.114	2	
LBDC-3	25.6	24.8	0.98	26.8	92.7	2.1	9.3	<0.002	27.1	33.6	0.123	2	
SP-1	28.8	33.8	1.59	20.9	50.9	2.8	4.3	<0.002	0.84	30.9	0.091	3	
DC-13	57.3	38.2	0.56	21.6	6.2	2.4	13.6	<0.002	2.74	21.4	0.094	3	
DC-14	56.7	20.4	0.74	21.9	4.6	5.0	17.9	<0.002	7.00	19.7	0.113	3	
DC-2-S	50.6	6.1	2.96	65.9	4.1	10.5	72.8	<0.002	89.6	19.7	0.669	3	
DC-8	31.8	6.3	3.25	22.9	9.2	11.5	12.0	<0.002	202	6.4	0.250	21	
DC-10	4.9	5.1	2.56	27.3	17.9	25.2	16.4	<0.002	285	4.6	0.182	13	
DC-12	60.3	28.4	3.51	8.1	23.5	2.2	21.6	<0.002	159.0	17.5	0.109	4	
DT-5	52.9	8.3	5.94	68.6	24.1	3.7	60.8	<0.002	366	14.3	0.285	12	
DC-0	6.0	1.2	0.32	0.6	0.7	0.8	0.8	<0.002	20.2	1.0	0.017	2	
DC-1	1.6	8.3	1.18	1.2	7.0	8.8	2.5	<0.002	65.1	0.4	0.030	<1	
DT-9	6.5	1.4	0.29	2.0	3.1	1.5	1.8	<0.002	45.4	5.2	0.016	2	
ST-2	36.1	8.7	2.43	15.3	35.5	14.4	50.6	0.002	955	9.0	0.094	8	
JP1-2-1	7.8	1.3	1.05	2.5	4.7	4.7	5.4	<0.002	10000	1.5	0.051	60	
DSY-6	63	11.4	3.66	38.2	70.1	45.8	74.2	0.002	1745	17.7	0.085	2	
DSY-7	44.2	2.3	1.12	19.3	30.9	13.9	49.7	0.002	10000	10.3	0.081	15	
DSY-8	35.9	5.9	1.7	21.8	42.2	28.8	49.5	0.002	10000	10.5	0.073	21	
DSY-9	31.2	7	3.27	20.9	23.3	8.4	32.6	<0.002	10000	10.9	0.049	8	
ST-4	<0.5	9.2	0.35	0.1	1.4	2.4	10.7	<0.002	1005	0.2	<0.005	<1	
ST-1	9.7	7.6	0.37	0.1	7.2	3.9	3.6	<0.002	10000.00	9.1	0.020	6	
ST-3	2.9	0.6	0.14	0.1	<0.2	<0.5	0.2	<0.002	2400	2.6	<0.005	3	
J1-16	103.5	2.9	1.44	58.9	57.2	14.1	123.5	<0.002	134.5	28.5	0.065	7	
JP1-3	15.7	9.2	2.35	7.7	11.4	12.3	8.3	<0.002	453	1.7	0.065	3	
JP1-4	9.9	7.7	7.45	9.4	26	25.9	14.5	<0.002	179	3.3	0.13	6	
JP2-1	75.4	7.1	4.25	46.4	18.6	3	47.3	<0.002	1685	10.8	0.163	9	
JP2-2	71.4	9.8	4.62	46.8	15.3	3.4	48.9	<0.002	1195	9.6	0.155	3	
JP2-3	55.9	5.3	3.93	49.6	10.1	2.9	53.9	<0.002	4110	8.2	0.284	9	
样品	Sn	Sr	Ta	Te	Th	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr	Au
J1-1	0.4	13.6	<0.05	0.06	0.3	1.74	1.5	12	0.5	7	10	8.5	0.421
J1-14	1.2	48.2	1.49	<0.05	2.2	1.17	0.8	153	205	25	31	112	0.157
J1-17	3.4	395	3.34	<0.05	3.4	1.35	0.8	456	14.4	13.9	10	130	0.031
DC2'-1	2.2	650	2.62	<0.05	3.4	1.91	1.1	294	108.5	13.8	9	69	*
DC2'-2	6.4	148	4.76	0.24	12.5	3.04	1.9	364	52.6	22.7	6	266	0.016
DC2'-3	0.9	173.5	1.01	<0.05	1.9	0.4	1.6	107	37.3	13.1	41	52.9	0.12
DC2'-5	1.3	118.5	1.64	0.05	3.8	3.35	13	98	22.7	18.6	<2	83.8	0.15
DC2'-6	15.1	142.5	9.91	0.25	19	6.24	2	419	124	31.2	4	208	0.011
JP1-1	4.5	189	2.03	0.46	10.2	0.56	8.8	317	45	26.7	10	237	0.47
JP1-2-2	2.1	143	0.96	0.5	5	1.54	8.9	167	22.9	34.4	4	123	0.224
JP1-5	6.1	334	4.47	0.25	14.8	1.12	5.7	328	61.5	38.8	35	461	0.36
JP2-4	8.2	109	5.81	0.44	15.5	3.25	3.1	316	118.5	15.7	4	259	0.059
LBDC-1	2.1	74.8	1.61	<0.05	4	0.29	1.3	377	7.4	32.3	132	191	0.01
LBDC-2	2.3	73.2	1.76	<0.05	4.3	0.28	1.4	351	5.1	29.2	189	207	0.011
LBDC-3	2.3	63.8	1.77	<0.05	4.2	0.28	1.4	377	5.1	28.4	206	201	0.014

续表 2

样品	Sn	Sr	Ta	Te	Th	Tl	U	V	W	Y	Zn	Zr	Au
SP-1	1.8	144.0	1.39	<0.05	3.2	0.06	1.0	360	0.5	32.9	131	158.0	*
DC-13	0.9	153.0	1.33	<0.05	3.0	0.07	0.6	219	0.2	39.9	213	72.2	*
DC-14	1.7	177.0	1.56	<0.05	2.8	0.09	0.7	250	0.3	32.4	102	60.8	*
DC-2-S	11.8	107.5	4.29	1.46	14.7	0.55	3.9	387	23.5	18.5	5	289	*
DC-8	1.6	57.5	1.46	0.46	5.8	7.71	7.4	129	12.6	17.2	2	182.5	*
DC-10	2.4	21.2	1.73	0.39	4.0	12.00	2.2	105	9.9	4.1	2	170.5	*
DC-12	0.3	497	0.43	0.06	3.5	0.36	1.2	294	12.5	25.3	58	149.0	*
DT-5	5.7	59.8	4.16	0.27	10.8	1.60	2.2	271	63.2	17.6	4	411	*
DC-0	<0.2	259	<0.05	<0.05	<0.2	0.03	0.6	4	0.9	5.9	2	3.9	*
DC-1	0.4	21.8	0.06	0.05	0.5	0.07	3.8	143	0.8	1.0	2	8.8	*
DT-9	0.2	322	0.12	<0.05	0.3	0.04	0.3	29	4.2	11.0	5	13.7	*
ST-2	2.0	443	1.02	0.39	5.1	1.75	7.0	254	21.7	59.5	12	153.5	*
JP1-2-1	0.6	65.4	0.09	<0.05	1.1	5.2	1.1	69	0.3	3	2	22.7	0.183
DSY-6	2.5	1560	2.3	0.06	6.1	1.18	6.9	246	16	25.2	15	203	0.025
DSY-7	1.8	575	0.67	<0.05	4.3	0.94	4	138	1.7	31.4	10	135	0.008
DSY-8	1.7	959	0.88	<0.05	3.8	0.69	4.4	156	2.4	16.6	10	137.5	0.008
DSY-9	1.2	1095	1.09	0.09	3.4	0.42	3	187	2.9	11.8	10	110	0.436
ST-4	<0.2	14.3	<0.05	<0.05	<0.2	0.69	0.4	3	<0.1	0.2	<2	1.4	*
ST-1	0.4	25.7	<0.05	0.07	2.4	1.58	3.2	44	0.2	14.5	18	140.0	*
ST-3	<0.2	89.4	<0.05	0.05	0.3	0.04	0.3	1	0.1	73.9	<2	0.9	*
J1-16	3.9	572	3.75	0.17	5.9	5.83	0.9	248	13.6	19.7	3	183.5	0.621
JP1-3	1.1	58.7	0.49	0.21	3	0.74	2.9	70	10.6	14.7	3	69.2	1.335
JP1-4	2.2	63.4	0.63	0.34	3.2	1.52	4.5	108	10.8	9.4	<2	83.6	1.205
JP2-1	4.1	182	3.03	0.23	9.2	3.45	4.1	146	50	30.8	58	162	0.974
JP2-2	4.2	245	3.04	0.18	9.9	3.91	5	173	47.4	25.2	26	206	0.525
JP2-3	4.2	1460	3.22	0.26	9.1	4.61	1	179	41.8	6.9	5	120.5	0.614

注：“*”为未检测项目， $w(\text{Sb})$ 检测上限为 10000 $\mu\text{g/g}$ 。

同类型的岩、矿石，且相互之间均存在一定的地质联系，如似碧玉状石英与辉锑矿关系密切，硅化凝灰岩和硅化灰岩是主要的赋矿围岩。为此，本研究对晴隆锑矿床的硅质岩（似碧玉岩）、凝灰岩、硅化灰岩和矿石进行常量元素和微量元素测定，能够揭示成矿过程中元素组分变化以及示踪成矿物质来源。

与热液活动有关的大型或超大型矿床的形成必须满足 2 个基本条件：1）必须有充足的矿质供给，并且有大规模的流体（成矿介质）活动，将矿质源源不断地迁移、搬运至有利的位置集中沉淀堆积；2）必须有足够的规模的堆积空间和适当的堆积环境，保证巨量的矿质集中沉淀。大厂层在黔西南地区不仅分布广泛，并且严格控制了区内锑矿体和大部分金矿体的产出，这无疑说明大厂层对大量矿质的沉淀提供了极佳条件。前人对岩相学研究表明，大厂层具有复杂的沉积岩相组合，包括有火山溢流相、淬碎角砾岩相、沉凝灰岩相、空落集块岩相、熔结凝灰岩相和热水喷流沉积岩相^[27]。结合大厂层的沉积特征以及成矿流体性质^[13]，大厂层的控矿作用主要体现在以下几个方面：

1）较高的渗透率 相对于大厂层底部的茅口组灰岩和顶部的块状峨眉山玄武岩，大厂层主要以渗透性较好的角砾岩、凝灰岩、砾石等组成（图 5A），这种高渗透性岩层为燕山期大规模成矿流体的运移提供了良好通道。另一方面，茅口组灰岩和峨眉山玄武岩孔隙度低、透水性差，在大厂层上下形成一隔水层（图 5A），将矿液局限在一定的空间内，矿质不易扩展流失。这种岩性组合具备了“容、盖”两大有利成矿因素，均为有利的成矿岩性组合。

2）提供充足的容矿空间 大厂层 1 段（ P_2d^1 ）和 2 段（ P_2d^2 ）普遍发育硅化灰岩角砾，这些角砾在无矿化部位多呈棱角状、次棱角状，角砾成分简单，无明显的位移，角砾具有一定的可拼接性（图

5B), 角砾与热液胶结物(石英和方解石)界限截然, 表明这些角砾具有液压致裂角砾岩特征^[28-29]。当成矿早阶段的酸性还原性流体进入这些角砾岩孔隙时, 流体与灰岩角砾产生化学溶蚀作用, 同时发生强烈的去碳酸岩化, 致使大量的 Ca 从灰岩中帶出, 而 Si 进入灰岩形成强硅化灰岩, 灰岩角砾被溶蚀

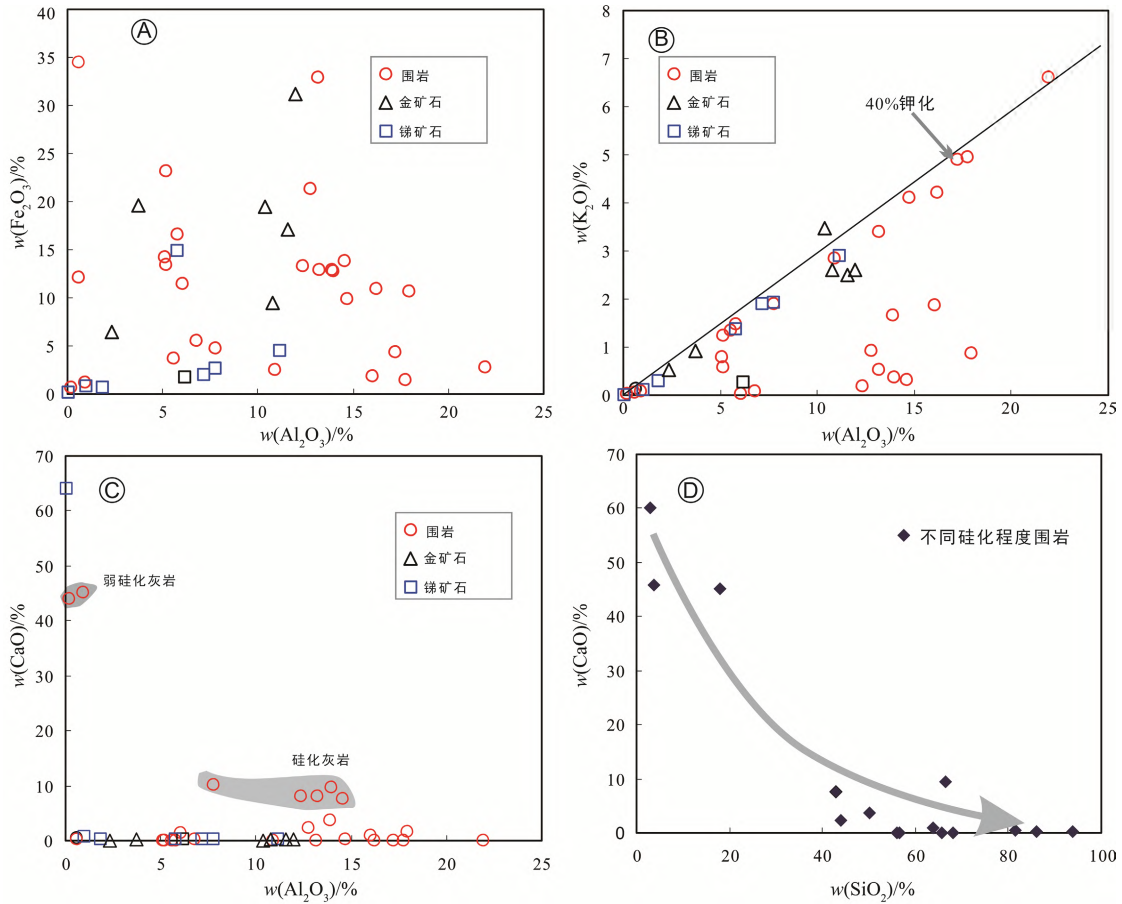


图 3 晴隆锑矿床岩/矿石常量元素相关图解

Fig. 3. The correlation diagrams of contents for major elements in the rocks/ores of the Qinglong antimony deposit.

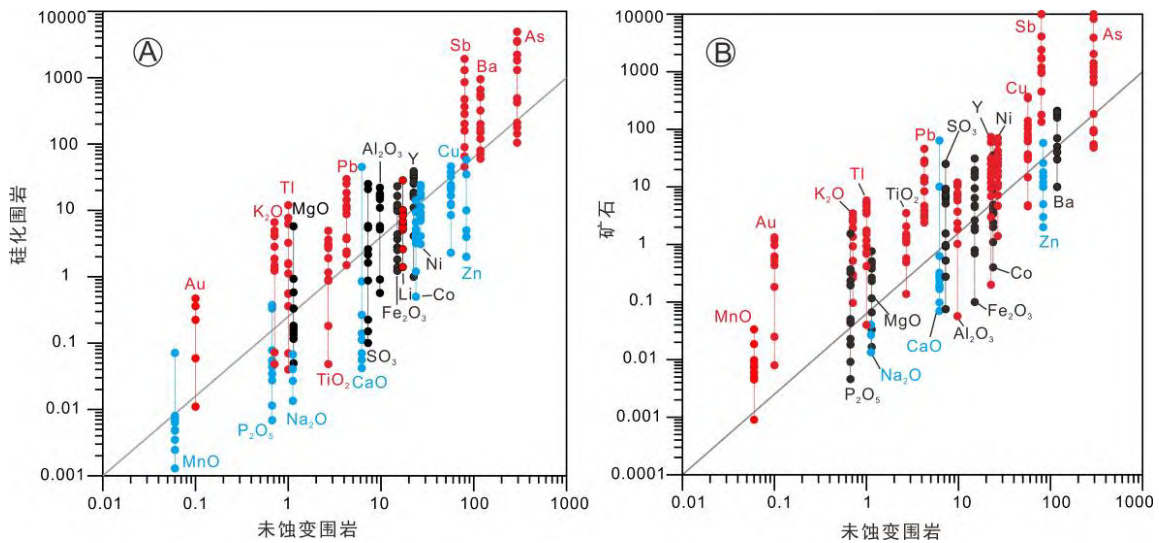


图 4 未蚀变围岩与硅化围岩以及矿石样品的对数等值线散点图

Fig. 4. The logarithmic contour scatter plots of unaltered wallrocks versus silicified wallrocks and unaltered wallrocks versus ore samples.

呈浑圆状(图 5C), 这一过程进一步使得成矿环境更加开放, 流体减压降温导致辉锑矿、萤石和似碧玉状石英沉淀(图 5C)。另一方面, 大厂层的硅化使得岩石脆性指数增加, 在后期的构造挤压剪切过程中, 这些硅化蚀变体易形成脉状构造裂隙, 为成矿晚阶段的脉状石英-辉锑矿±黄铁矿型矿体提供容矿空间(图 5D)。

3) 有利的物质交换基础 岩、矿石主量元素 SiO_2 -CaO 相关性研究表明, 随着样品中 SiO_2 的逐渐增加, CaO 含量反之

降低, 说明富 Si 成矿流体与灰岩发生强烈的元素交换, Ca^{2+} 被带出致使围岩发生去碳酸岩化。前人对萤石样品 Sm/Nd 比值介于 0.29~0.50, 其高值与茅口组灰岩 (Sm/Nd=0.48) 较为接近, 低值与硅化灰岩 (Sm/Nd=0.29) 一致, 这暗示萤石中的 Ca^{2+} 主要来自茅口组灰岩^[14-15]。由此可见, 茅口组灰岩中的 Ca^{2+} 被带出与成矿流体的 F⁻ 结合形成萤石。另一方面, 在大厂层沉积-成岩过程中形成了大量的长石矿物和自生黄铁矿 (Py-I), 这些长石矿物在热液蚀变过程中表现为去 Na^{+1} 迁出 K^{+1} 迁出, 从而形成伊利石等粘土矿物。而自生黄铁矿受后期热液交代, 形成具“核-边”结构的载金黄铁矿, 前人研究同样显示, 热液成矿流体中并不含 Fe, 形成大量载金黄铁矿所需要的 Fe 均是围岩提供或者是含铁白云石的溶解释放^[6]。

4 结 论

1) 晴隆锑矿床硅化可分为 3 期: 第 1 期硅化为大厂层硅质岩的沉积和火山玻屑脱玻化重结晶作用; 第 2 期硅化与锑矿化关系密切, 形成角砾状锑矿体; 第 3 期硅化为热液成矿晚阶段产物, 与脉状锑-金矿化相关。

2) 岩/矿石主微量元素分析显示, 富 Si 流体呈酸性使灰岩中大量的 CaCO_3 矿物溶解, 同时伴生强烈的热液钾化蚀变。Sb、As、Au、S、K 等元素由热液带入, 赋矿围岩中 Ca 和 Na 则被带出。

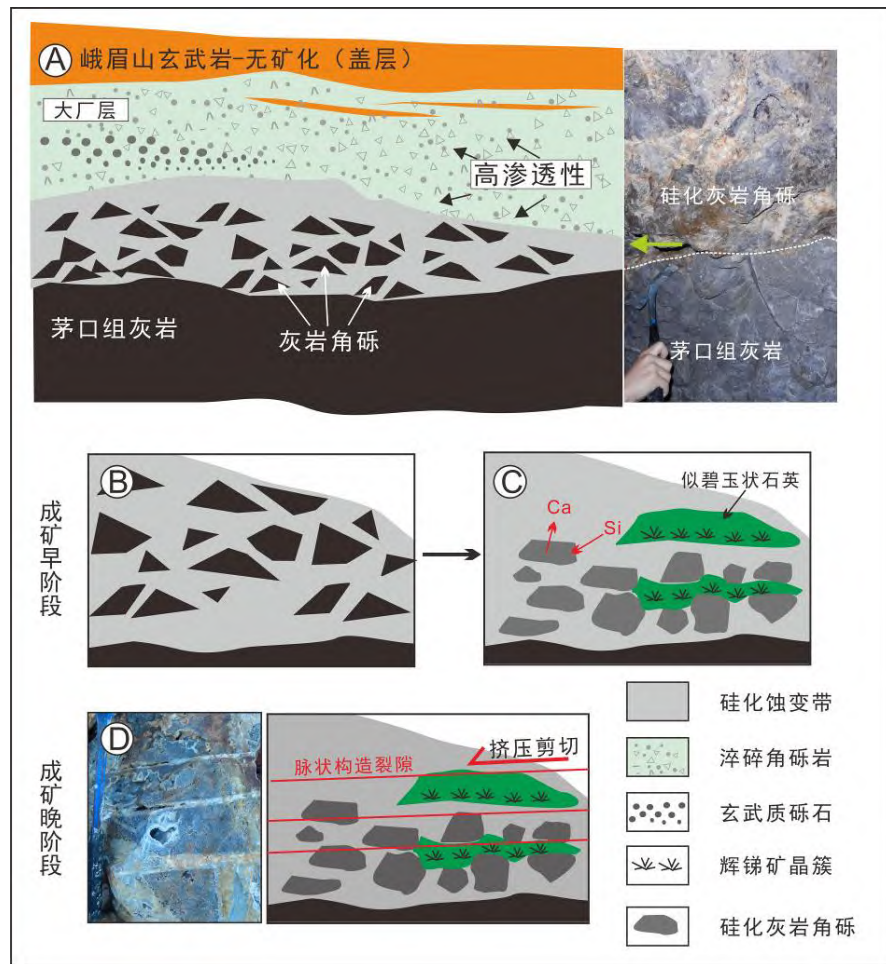


图 5 晴隆锑矿床大厂层控矿机理 (详见文中解释)

Fig. 5. The ore-controlling mechanism of the Dachang layer in the Qinglong antimony deposit.

3) 大厂层具有较高的渗透率, 为流体运移提供通道和充足的容矿空间; 同时为热液硫化物和萤石的形成提供 Fe 和 Ca。

参 考 文 献:

- [1] Hu R, Fu S, Huang Y, et al. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 137: 9-34.
- [2] Chen J, Huang Z L, Yang R D, et al. Gold and antimony metallogenic relations and ore-forming process of Qinglong Sb (Au) deposit in Youjiang basin, SW China: Sulfide trace elements and sulfur isotopes[J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(2): 605-623.
- [3] Hu R Z, Su W C, Bi X W, et al. Geology and geochemistry of carlin-type gold deposits in China [J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(3), 378-392.
- [4] 胡瑞忠,付山岭,肖加飞.华南大规模低温成矿的主要科学问题[J].*岩石学报*,2016,32(11):3239-3251.
- [5] Tan Q P, Xia Y, Xie Z J, et al. Migration paths and precipitation mechanisms of ore-forming fluids at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 69: 140-156.
- [6] Su W, Heinrich C A, Pettke T, et al. Sediment-hosted gold deposits in Guizhou, China: products of wall-rock sulfidation by deep crustal fluids[J]. *Economic Geology*, 2009, 104(1): 73-93.
- [7] Su W C, Zhang H T, Hu R Z, et al. Mineralogy and geochemistry of gold-bearing arsenian pyrite from the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China: implications for gold depositional processes[J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47(6): 653-662.
- [8] Chen J, Yang R D, Du L J, et al. Multistage fluid sources and evolution of Qinglong Sb-(Au) deposit in northern margin of Youjiang basin, SW China: REE geochemistry and Sr-HO isotopes of ore-related jasperoid, quartz and fluorite[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 127: 103851.
- [9] 刘建中, 夏勇, 陶琰, 等. 贵州西南部 SBT 与金锑矿成矿找矿[J]. *贵州地质*, 2014, 31(4): 267-272.
- [10] 贵州省晴隆锑矿整装勘查报告[R]. 六盘水: 贵州省地质矿产勘查开发局 113 地质大队, 2016.
- [11] 陈娴, 苏文超, 黄勇. 贵州晴隆锑矿床成矿流体 He-Ar 同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3312-3320.
- [12] 苏文超, 朱路艳, 格西, 等. 贵州晴隆大厂锑矿床辉锑矿中流体包裹体的红外显微测温学研究[J]. *岩石学报*, 2015, 31(4): 918-924.
- [13] Chen J, Yang R D, Du L J, et al. Mineralogy, geochemistry and fluid inclusions of the Qinglong Sb-(Au) deposit, Youjiang basin (Guizhou, SW China)[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 92: 1-18.
- [14] 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪. 萤石 Sm-Nd 同位素体系对晴隆锑矿床成矿时代和物源的制约[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 785-791.
- [15] 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪. 贵州晴隆锑矿床中萤石的 Sr 同位素地球化学[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(2):244-251.
- [16] 廖宝丽. 贵州二叠纪碱性玄武岩的岩石学和地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- [17] 贵州省锑成矿条件、富集规律及找矿方向研究[R]. 贵阳: 贵州省地质矿产局地质科学研究所. 1989.
- [18] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507-513
- [19] Kuehn C A, Rose A W. Geology and geochemistry of wall-rock alteration at the Carlin gold deposit, Nevada[J]. *Economic Geology*, 1992, 87(7): 1697-1721.
- [20] Cail T L, Cline J S. Alteration associated with gold deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, north-central Nevada[J]. *Economic Geology*, 2001, 96(6): 1343-1359.
- [21] Cline J S, Hofstra A H, Muntean J L, et al. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models[J]. *Economic Geology*, 2005, 100th anniversary volume: 451-484.
- [22] 谢卓君. 中国贵州卡林型金矿与美国内华达卡林型金矿对比研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [23] Finlow-Bates T, Stumpf E F. The behaviour of so-called immobile elements in hydrothermally altered rocks associated with volcanogenic submarine-exhalative ore deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 1981, 16(2): 319-328.
- [24] Gresens R L. Composition-volume relationships of metasomatism[J]. *Chemical geology*, 1967, 2: 47-65.
- [25] Grant J A. The isocon diagram; a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. *Economic geology*, 1986, 81(8): 1976-1982.
- [26] Su W C, Dong W D, Zhang X C, et al. Carlin-type gold deposits in the Dian-Qian-Gui "Golden Triangle" of southwest China[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2018, 20: 157-185.
- [27] 杜丽娟, 杨瑞东, 陈军, 等. 黔西南晴隆锑矿床伴生金的赋存状态及其地质意义[J]. *地球化学*, 2020, 49(4):368-384.
- [28] Phillips W J. Hydraulic fracturing and mineralization[J]. *Journal of the Geological Society*, 1972, 128(4): 337-359.
- [29] Jébrak M. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution[J]. *Ore geology reviews*, 1997, 12(3): 111-134.