

黔西南中晚二叠世大厂层火山热水沉积成矿作用

杜丽娟^{1, 2)}, 陈军^{1, 3)}, 杨瑞东¹⁾, 黄智龙³⁾, 郑禄林⁴⁾, 高军波¹⁾, 魏怀瑞¹⁾

1) 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳, 550025;

2) 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳, 550025;

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) 贵州大学矿业学院, 贵阳, 550025

内容提要: 贵州晴隆大厂锑矿区赋矿地层大厂层为一套以硅化为主的火山碎屑岩沉积建造, 因其别具特色的岩石组合、特殊的构造位置, 以及含有金、锑、萤石、硫铁矿等矿产资源而备受地学界关注。晴隆大厂锑矿床 90% 以上的锑矿体和金矿化体均位于大厂层之中, 因此, 研究大厂层的形成和演化过程及其对锑、金成矿的控制作用或影响机理显得尤为重要。沉积岩相学研究表明, 大厂层主要包括火山岩相(火山溢流相、淬碎角砾岩相、沉凝灰岩相、空落集块岩相和熔结凝灰岩相)和热液沉积岩相(热水沉积相、热水喷流相和热水交代相)。中—晚二叠世(约 260 Ma)的溢流玄武岩、基性火山喷发和海底热水喷流活动是大厂层的主要物源供给者。元素地球化学研究表明, 大厂层在沉积过程的热水喷流沉积作用提供了 Sb、As、Au、Ag、Pb 等成矿元素, 并形成成矿元素的初始“富集体”。综合研究认为, 中—晚二叠世的热水喷流沉积活动在时空上与右江盆地印支期低温热液成矿事件(200~250 Ma)在时空上基本一致, 为印支期成矿事件在右江盆地北缘的响应。

关键词: 大厂层; 沉积演化; 热水喷流; 元素地球化学; 晴隆; 黔西南

黔西南地区是我国重要的 Au—Sb—(Hg—As—Tl) 低温热液成矿区, 分布有众多的大型—超大型金矿床(水银洞、泥堡和戈塘等)以及锑矿床(晴隆)。从目前业已发现的金—锑矿床而言, 二叠系和三叠系地层是主要的赋矿层位。值得一提的是, 中二叠统“大厂层”^①是一个特殊的层位, 广泛分布在晴隆、普安、盘县、贞丰、安龙、兴义和雄武等地。“大厂层”最初定名是贵州省地质矿产局 112 队在对晴隆大厂锑矿进行普查时(贵州省地质矿产局 112 队^②), 将位于中二叠统茅口组灰岩之上、峨眉山玄武质之下的一套硅质蚀变岩称之为“大厂层”。晴隆大厂锑矿床 90% 以上的锑矿体和金矿化体均位于大厂层之中(Chen Jun et al., 2018), 因此, 研究大厂层的形成和演化过程及其对锑、金成矿的控制作用或影响机理显得尤为重要。前人对大厂层也开展了较多研究(廖朝中, 1983; Zhuang Hanping et al., 1997; 张国林等, 1998; 张启厚, 1999; 王砚

耕, 1994; 蒋杰和李卫锋, 2009; 胡煜昭, 2011; 陈军等, 2014; 刘路, 2016)。廖朝中(1983)认为大厂层的形成与火山活动密切相关, 大厂层底部的硅质岩属于火山气液成因; 张国林等(1998)认为在大厂层成岩期存在海底喷流沉积作用; 部分学者则认为大厂层结构疏松, 可能是层滑作用的产物(张启厚, 1999; 王砚耕, 1994)。最近, 关于峨眉地幔柱动力学相关的研究揭示, 中—晚二叠世时, 黔西南地区峨眉山玄武岩前锋带已进入海水, 海陆频繁变迁(陈文一等, 2003; 朱江等, 2011; 李宏博和朱江, 2013; 陈军等, 2014), 大厂层原岩是位于东吴运动不整合面之上的一套爆发相火山岩(胡煜昭, 2011; 刘路, 2016), 而在成岩阶段经历了火山喷流(热水)沉积作用(朱俊宾, 2010)。因此, 在中二叠世晚期是否存在热水(热液)沉积成矿作用, 大厂层是否提供了成矿物质, 大厂层的演化与成矿之间关系等方面仍存不同认识。这些不同认识的存在, 在很

注: 本文为贵州省科技计划项目(编号: 黔科合基础[2019]1315号)、国家自然科学基金资助项目(编号: 41802107; U1812402), 贵州省人才基地项目(编号: RCJD2018-21)和贵州省沉积矿床科技创新人才团队项目(编号: 黔科合平台人才 20185613)的成果。

收稿日期: 2019-07-04; 改回日期: 2020-02-17; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.02.013

作者简介: 杜丽娟, 女, 1989年生, 博士, 讲师, 主要从事岩浆—热液成矿作用研究; Email: dulijuan891107@163.com。通讯作者: 杨瑞东, 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学及地球化学研究; Email: rdyang@gzu.edu.cn。

大程度上限制了对区域金—锑成矿规律的全面认识。本文在对大厂层系统岩相学研究的基础上,识别出火山岩相和海底热水沉积相两套岩相组合。元素地球化学证据显示大厂层在沉积过程中初步富集 Au、Sb、As 等低温成矿元素,在时间上与右江盆地印支期低温热液成矿事件 (Chen Maohong et al., 2015; Pi Qiaohui et al., 2017; Tan Qiping et al., 2019) 在时空上基本一致,这对厘清区域金—锑成矿规律具有重要意义。

1 地质背景

地幔柱是地球各圈层进行能量和物质交换的重

要形式,深部物质和能量向地表迁移,影响着浅部地表系统、岩浆和热液成矿系统。在我国西南地区,峨眉山大火成岩省是我国最早被国际学术界认可的大火成岩省 (Xu Yigang et al., 2004, 2008; Sun Yadong et al., 2010)。大规模的玄武岩喷发控制着其影响范围内的沉积特征及其岩相古地理环境 (He Bin et al., 2003; Xu Yigang et al., 2004; Song Xieyan et al., 2008)。黔西南地区位于峨眉山玄武岩的外带,区内分布的金—锑矿床与峨眉山玄武岩 (包括凝灰岩) 空间关系密切 (陈军等, 2014; Hu Xinlu et al., 2018)。这种由地幔柱活动引发的峨眉山玄武岩喷发事件,不仅对中—晚二叠世时期的

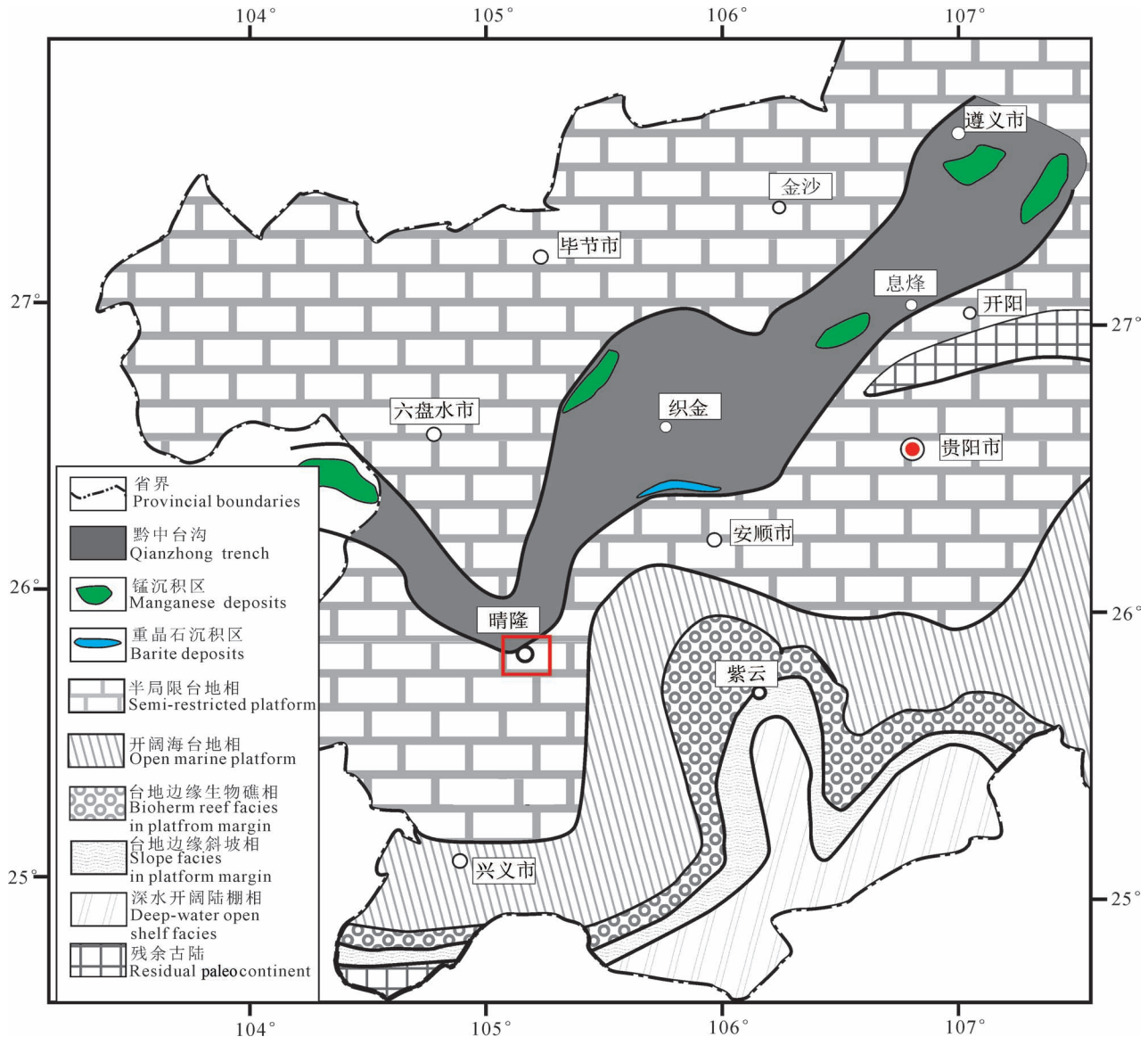


图 1 黔西南地区中二叠世茅口期峨眉山玄武岩喷发时期岩相古地理 (陈文一等, 2003)

Fig. 1 Lithofacies paleogeography of the Emeishan basalt in the Maokou period (Guadalupian series), Middle Permian, southwestern Guizhou (modified from Chen Wenyi et al., 2003&)

古沉积环境产生影响,同时也控制着与该事件相伴生的岩浆作用、热水沉积及成矿作用。基于此,研究峨眉山玄武岩喷发不同阶段的岩相古地理,深入剖析峨眉山玄武岩喷发时期的沉积环境演化,对认识中—晚二叠世地质环境演化及成岩成矿都具有重要意义。

在峨眉山玄武岩喷发前期,随着峨眉地幔柱的活动加强和右江盆地裂谷的继续扩张,黔西南地区古地理格局基本继承了茅口期(中二叠世, Guadalupian series)早期稳定的碳酸盐台地格局(图 1),但是在遵义—晴隆—云南格学一带形成呈勾状展布的台沟—“黔中台沟”,并沉积了一套台沟相的硅质岩、硅质泥岩、泥晶灰岩和锰质岩,前人称之为“白泥塘层”(刘志臣等, 2013),沉积学及地球化学证据显示白泥塘层硅质岩具有热水沉积特征(刘平等, 2008; 杨瑞东等, 2009; 徐海等, 2017)。另外,

近些年关于对中二叠世瓜德鲁普期末(end-Guadalupian)生命演化相关的研究表明,峨眉山大火成岩省玄武岩浆的去气作用产生的超规模的 SO₂ 气体,致使海洋沉积物中硅质含量明显增加,海洋水体酸化(Zhang Yan et al., 2013; Zhang Guijie et al., 2015)。这些特征表明,在峨眉山玄武岩喷发时期,右江盆地拉张裂陷作用更加剧烈,同沉积断裂发育,火山—热水活动强烈。

2 矿床地质及大厂层沉积岩相学

贵州晴隆大厂锑矿床位于贵州省黔西南州晴隆县大厂镇,与黔西南地区卡林型金矿床共同构成了西南大面积低温成矿域的主要金—锑矿集区。贵州晴隆大厂锑矿床主要由大厂、水井湾、滴水岩、固路、后坡、西舍、三望坪、黑山菁等八个矿段组成,已累计探明锑金属量达 30 万吨。研究区出露地层主要为

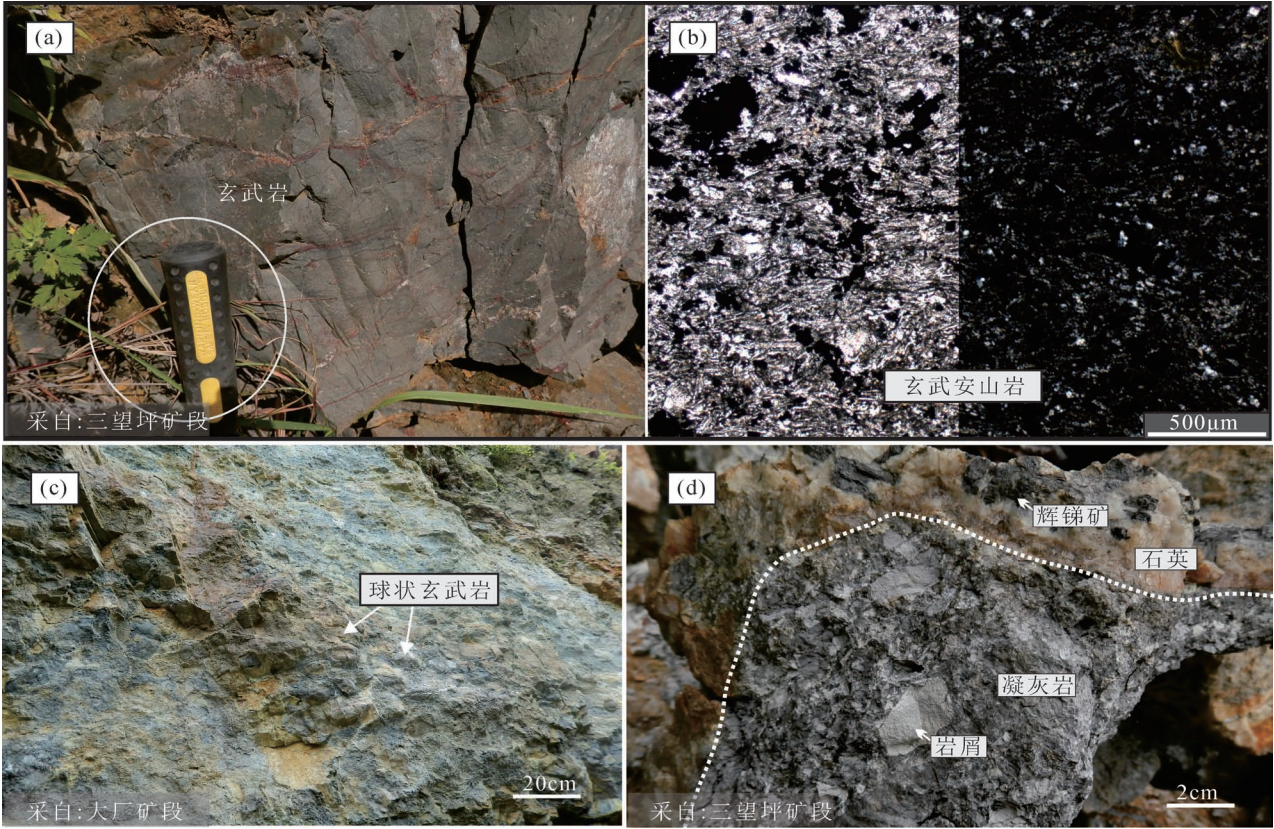


图 2 贵州晴隆地区峨眉山玄武岩照片(a)—(c)以及淬碎角砾岩相特征(d)
Fig. 2 The photographs of Emeishan basalt (a)—(c) and quenching brecciated facies in the Qinglong district, SW Guizhou Province
(a) 玄武岩呈块状致密结构;(b) 短柱状斜长石与火山玻璃构成填隙结构(左:单偏光;右:正交偏光);
(c) 球状玄武岩;(d) 淬碎玄武质角砾岩被热液期含矿石英切穿
(a) massive basalt; (b) short columnar plagioclase and volcanic glass formed intersertal texture (left: plane-polarized light, right: cross-polarized light); (c) globular basalt; (d) quenching brecciated basalt was crosscut by ore-bearing quartz in hydrothermal stage

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)。茅口组地层为一套浅海台地碳酸盐岩 (陈文一等, 2003), 与上覆大厂层呈蚀变接触或不整合接触, 蚀变类型主要为硅化和黏土化; 龙潭组 (P_3l) 为晚二叠世沉积的海陆交互的含煤地层。晴隆大厂锑矿床的锑矿体 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 (0~46.97 m), 其厚度变化与锑矿化呈正相关关系, 既大厂层厚度较大的区域锑矿化较好, 反之亦然 (陈军等, 2014; Chen Jun et al., 2018)。

随着黔西南地区金、锑矿床研究的升温, 大厂层作为一个单独的地质体被广大地质工作者进行了详细的研究。但是, 有关大厂层沉积特征及沉积相划分的研究不多。朱俊宾 (2010) 首次通过晴隆锑矿含矿岩系大厂层剖面及坑道填图的相关研究, 初步将大厂层在岩相学上划分为火山喷溢相、降落 (空落) 堆积相 (凝灰岩亚相、角砾凝灰岩亚相)、火山碎屑流相 (火山角砾岩亚相、角砾凝灰岩亚相)、火山喷流 (热水) 沉积相 (热水同生沉积亚相、热水同生交代亚相、热水液压致裂作用亚相、热水充填作用亚相)、热液充填交代 (改造) 相 (萤石微相、石英—硫化物微相、硫铁矿微相、石膏—重晶石微相) 以及碳酸盐台地相 (开阔台地亚相、台地边缘浅滩亚相)。

刘路 (2016) 主要通过沉积物类型将大厂层沉积相划分为爆发相、河流相、河口湾相和滨岸相。本节研究将结合前人的研究成果, 通过详细的坑道和剖面野外地质调查, 对大厂层不同岩相进行系统梳理, 为揭示大厂层沉积演化过程提供依据。

本文主要参照 Doyle 等 (2000) 和 White (2000) 等文献对火山岩成因及分类的研究, 共识别出大厂层火山—沉积过程中的 3 个相组合类型, 9 个不同岩相。

2.1 火山岩相组合

2.1.1 火山溢流相

研究区火山溢流相主要为玄武岩或玄武安山岩, 岩石呈深灰色、红褐色致密块状 (图 2a), 风化面呈球状 (图 2c)。三望坪矿段玄武岩柱状节理发育, 玄武岩无斑充填结构, 大量长条状斜长石杂乱分布, 其间充填绿泥石化辉石、角闪石和呈隐晶或微晶结构的火山玻璃 (图 2b), 厚度约 30 m, 为陆相喷溢玄武岩。在大厂矿段, 玄武岩厚度介于 10~15 m, 呈厚层状产出, 在玄武岩底部见星点状黄铁矿化。

2.1.2 淬碎角砾岩相

岩石呈无定向角砾状结构 (图 2d), 玄武质岩屑呈等轴棱角状, 新鲜断面玄武质岩屑黏土化呈白色; 胶结方式为硅质胶结, 胶结物为细粒石英, 发育自

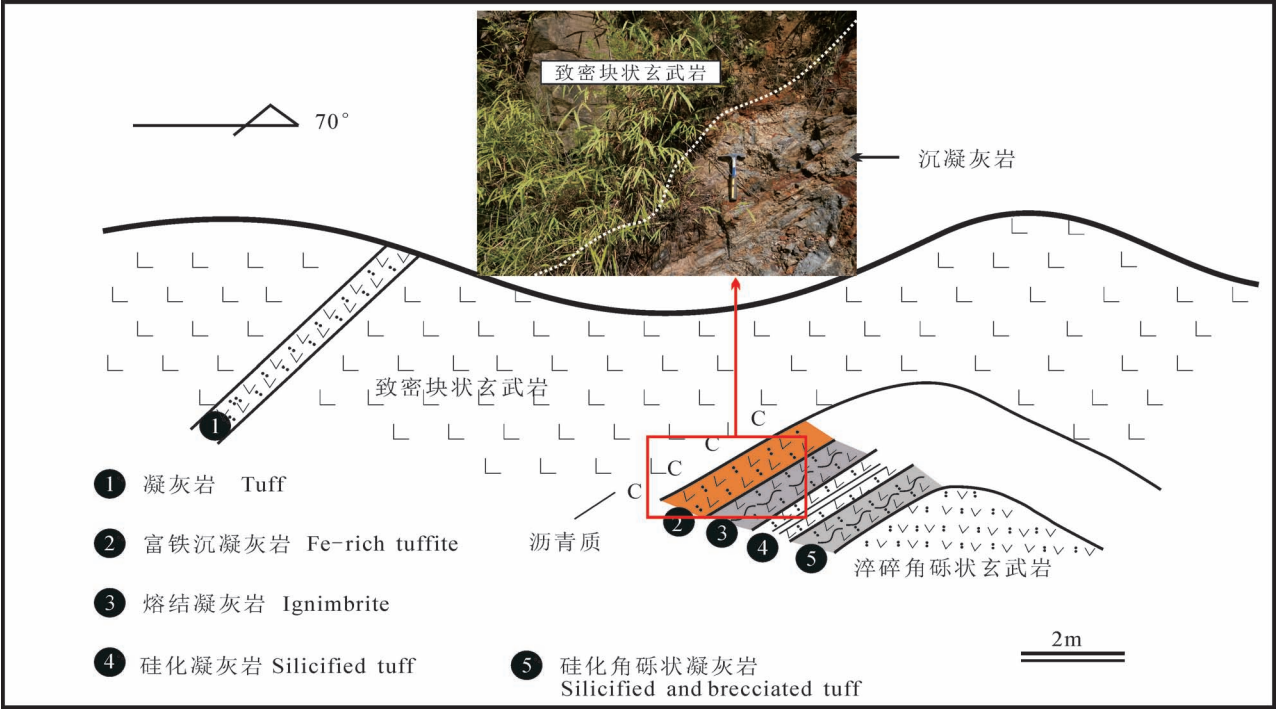


图 3 贵州晴隆大厂锑矿区三望坪矿段大厂层沉积特征

Fig. 3 The sedimentary characteristics of the Dachang Layer in the Sanwangping block in Qinglong deposit, Guizhou

形一半自形黄铁矿。该岩相指示炽热熔岩进入水体发生淬碎作用,形成结构疏松的淬碎角砾状玄武岩,在后期成岩过程中,基质发生重结晶作用形成细粒状石英。

2.1.3 沉凝灰岩相

沉凝灰岩是指由火山碎屑岩向正常沉积岩过渡,大多数沉凝灰岩发育层理。贵州晴隆地区沉凝灰岩主要发育在块状峨眉山玄武岩底部,呈薄层状产出(图 3)。在大厂矿段,沉凝灰岩呈灰白色中厚

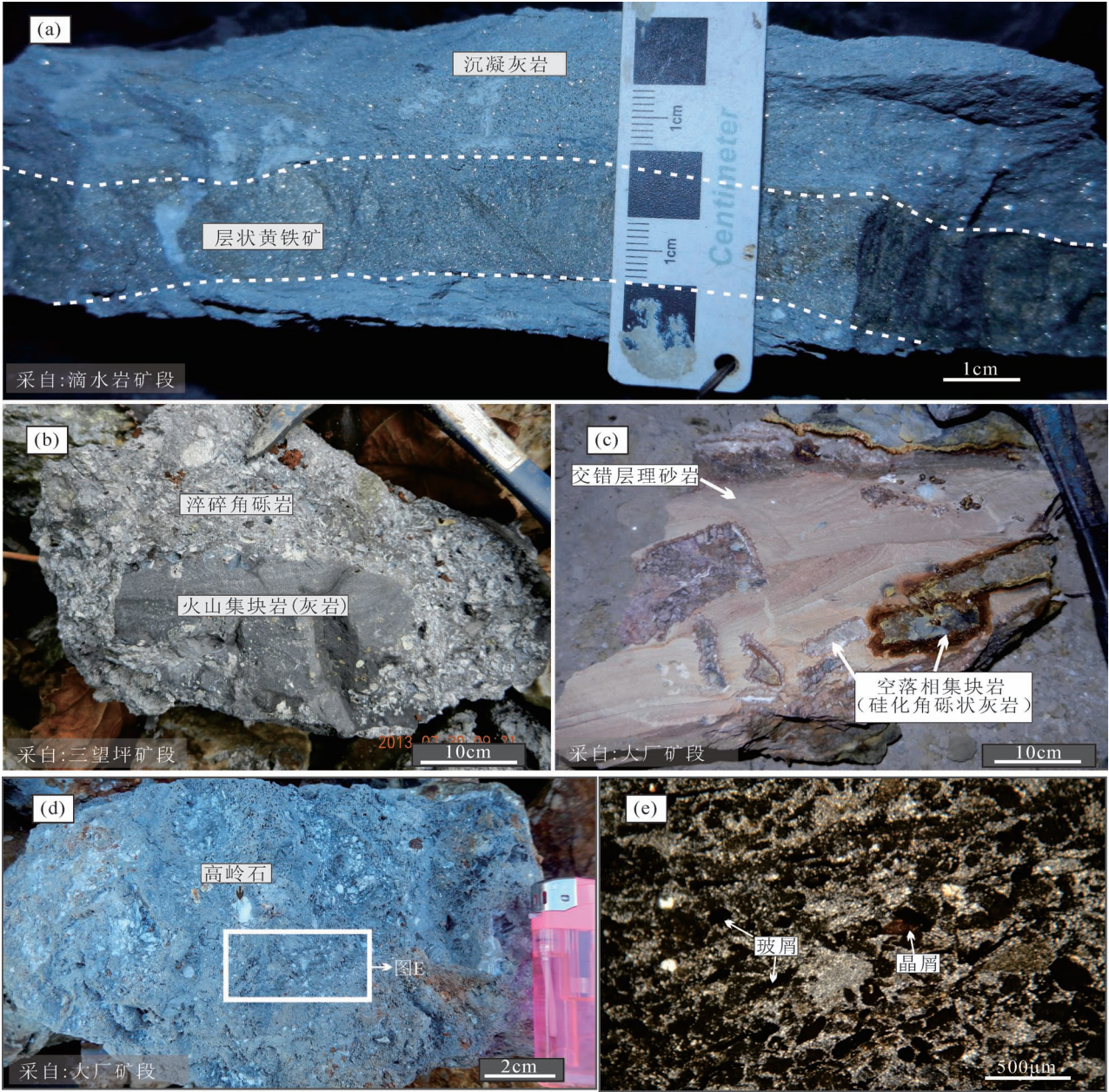


图 4 贵州晴隆大厂层沉凝灰岩相(a)、集块岩相(b)、(c)和熔结凝灰岩相(d)、(e)沉积特征照片
Fig. 4 The photographs of tuffites (a), volcanic agglomerates (b), (c) and ignimbrites (d), (e) facies from the Dachang Layer in Qinglong district, SW Guizhou

(a) 沉凝灰岩中的层状黄铁矿;(b) 淬碎角砾岩中的灰岩集块;(c) 发育交错层理砂岩中的硅化灰岩、玄武岩集块;(d) 熔结凝灰岩表面黏土化;(e) 玻屑和晶屑呈半定向排列

(a) bedded pyrites in tuffites; (b) limestone agglomerates in quenching brecciated rocks; (c) silicified limestone and basalt agglomerates in cross-bedding sandstone; (d) clayization in surface of ignimbrites; (e) vitric pyroclast and crystal pyroclast were semi-directionally arranged

层状,并混杂有泥质成分(图 3),反映凝灰质火山碎屑在水下的快速堆积。在晴隆锑矿区滴水岩矿段,沉凝灰岩底部发育层状黄铁矿(图 4a)。可以看出,在大厂层沉积时期,大规模的火山喷发活动是客观存在的,火山喷溢活动中释放的大量 H_2S 、 CO_2 、 HF 等酸性气体可能使得周围水体处于相对还原的环境,有利于大量黄铁矿的形成(Zhang Guijie et al., 2015)。

2.1.4 空落集块岩相

集块岩是正常火山碎屑岩类的一种,通常是火山喷发物中携带的围岩或已固结的熔岩块被抛至高空,而后沉积在火山喷发中心区域范围内。在晴隆锑矿区三望坪矿段可见茅口灰岩集块(粒径 15~20 cm)空落至淬碎角砾岩中(图 4b);而在大厂矿段坑道内,硅化灰岩—玄武岩集块空落至发育交错层理的砂岩中,集块岩与砂岩接触部位发育方解石和萤石等热液矿物(图 4c)。从该空落集块岩相中可以提取到两个信息:① 在晴隆大厂地区及周缘,中晚

二叠世时期,存在以中心式喷发的火山活动;② 交错层理砂岩指示水体高能且水流来回运动,推断大厂地区为高能的滨岸浅水环境。

2.1.5 熔结凝灰岩相

熔结凝灰岩是指炽热的火山灰在堆积后由于重力作用或者热力作用的影响下形成火山灰流,玻屑受挤压成塑变形态,经熔结作用形成的火山碎屑岩。晴隆大厂地区熔结凝灰岩主要产于大厂层二段,后期表生作用影响,凝灰质被风化交代形成高岭石、蒙脱石、地开石以及玉髓等次生矿物(图 4d);在光薄片晶屑和玻屑呈眼球状,个别被拉长呈带状,整体为半平行排列(图 4e),反映出较弱的熔结作用,为弱熔结凝灰岩。

2.2 热水沉积岩相

通过对大厂层详细的沉积结构研究,并结合朱俊宾(2010)对大厂层沉积相划分的结果。本次将大厂层热水沉积(喷流)岩相划分为热水喷发岩相、热水沉积岩相和热水交代岩相。

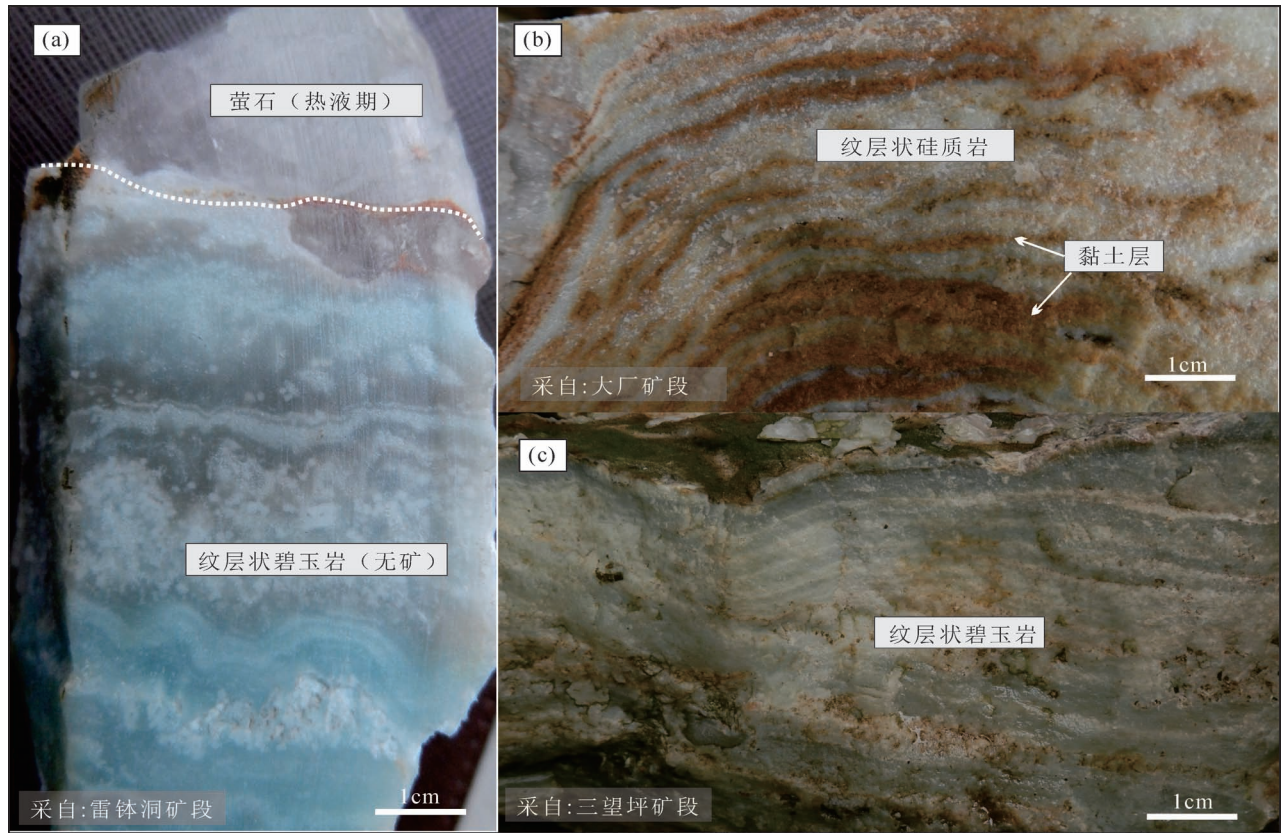


图 5 贵州晴隆锑矿区大厂层纹层状硅质岩(碧玉岩)沉积特征

Fig. 5 The sedimentary characteristics of laminar siliceous rock and/or jasperoid quartz in the Dachang Layer, Qinglong district, SW Guizhou
(a)、(c) 纹层状碧玉岩;(b) 纹层状硅质岩与黏土层互层

(a), (c) laminar jasperoid quartz; (b) bedded caly was interbedded with laminar siliceous rock

2.2.1 热水沉积相

在贵州晴隆大厂地区,热水沉积相为层状、纹层状硅质岩,主要发育在大厂层一段(图 5a—c)。由于硅质岩化学性质稳定,基本没有受到后期热液作用的影响,可以较好地推演当时的沉积环境。在中、晚二叠世之交,大规模的火山活动引发的热水沉积是纹层状硅质岩形成的主要动力及物源。纹层状构造说明热水为间歇式供给,是海底喷流活动大规模喷发或者喷发后期形成的产物。此外,纹层状硅质岩与泥质黏土岩互层(图 5b),说明热水沉积间歇期有陆源物质短暂沉积。大厂层热水沉积相特征与广西蓬莱滩剖面热水硅质岩(邱振等, 2011)和南秦岭造山带安康石梯—旬阳神河一带早古生代为裂陷沉积盆地的热水硅质岩、碧玉岩(唐永忠等, 2007)非常类似。

2.2.2 热水喷流岩相

热水喷流岩系是指海底热水在喷流活动中,在

热水喷口及附近沉积具热水喷发特征的岩、矿石,具有独特的结构构造特征,常见的为热水喷流的直接产物——黑烟囱(或者白烟囱)。贵州晴隆锦矿大厂矿段 2#剖面(N: 25°40'22.1"; E: 105°10'28.2")沉积序列为:硅质岩(1.6 m)——>铁锰质层(3 cm)——>纹层状铁质黏土岩(2.4 m)——>铁锰质层——>含炭质泥岩(凝灰岩)(1~3 m)——>沉凝灰岩——>枕状玄武岩,显示出火山—热水沉积序列特征(图 6)。在含炭质泥岩段的中下部(图 6),发育完整的呈管柱状黄铁矿结核,表面为疏松多孔状,直径约 6~8 cm。横断面呈环形构造,核部仍然保留有喷流通道(图 6b—d);纵断面核部为块状、胶状黄铁矿,边缘为放射状、针状白铁矿和重晶石,与典型的黑烟囱结构及矿物组成类似。随着现代海洋地质研究的不断进步(Stoffers et al., 2006; Melekestseva et al., 2014; Eickmann et al., 2014; Revan et al., 2014),现代海底喷流沉积取得了大量的成果,并取得了与

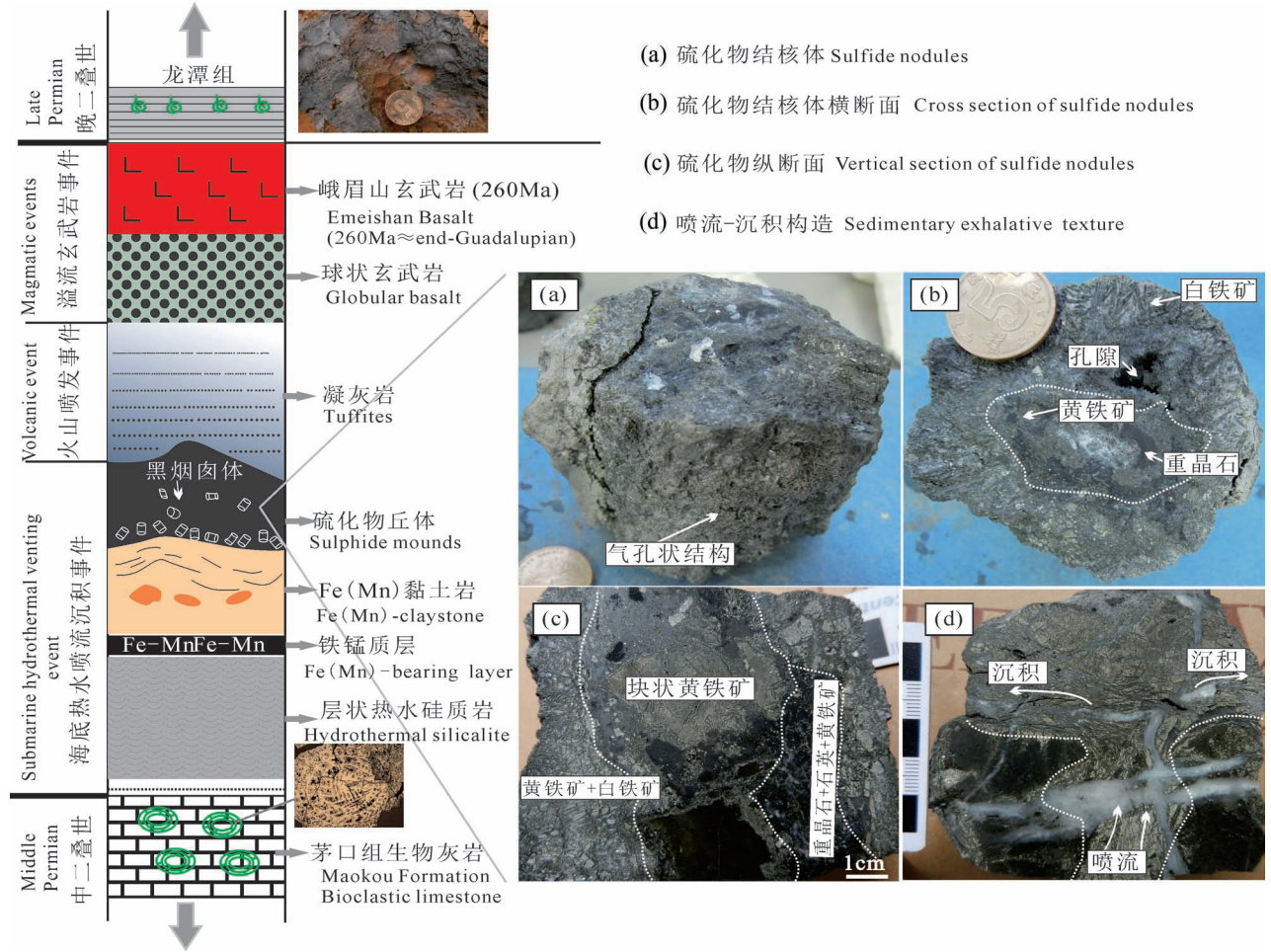


图 6 贵州晴隆大厂锦矿床大厂矿段 2#剖面沉积特征及热水喷流构造特征(据陈军等, 2020 修改)

Fig. 6 The sedimentary sequences and hydrothermal—exhalation textures in 2# section in Dachang block, Qinglong deposit SW Guizhou (modified from Chen Jun et al., 2020&)

海底喷流沉积相关的黑烟囱和白烟囱样品, Kormas 等 (2006) 对 Pacific 东部地区 (9°N) 白烟囱样品分析认为, 烟囱核部中心温度热水温度可达 240~350℃, 边缘部分在 60~240℃ 之间, 根据黄铁矿与白铁矿相互转换的 pH 和温度条件, 白铁矿形成时的温度比黄铁矿小 (约 <220℃) (Schieber, 2007)。因此, 本次发现的这种硫化物管状体不论是在形态还是硫化物组合都与海底喷流形成的黑烟囱相似。

2.2.3 热水交代岩相

该岩相在矿区内普遍发育, 主要发育在大厂层一段。岩石主要为灰白色硅质蚀变岩, 常见顺层状热水同生交代结构, 如茅口组灰岩被热水交代沉积形成条带状硅化灰岩 (图 7)。说明在茅口组灰岩沉积末期, 大规模的含 SiO₂ 热水沉积在茅口组灰岩之上并发生硅质蚀变。

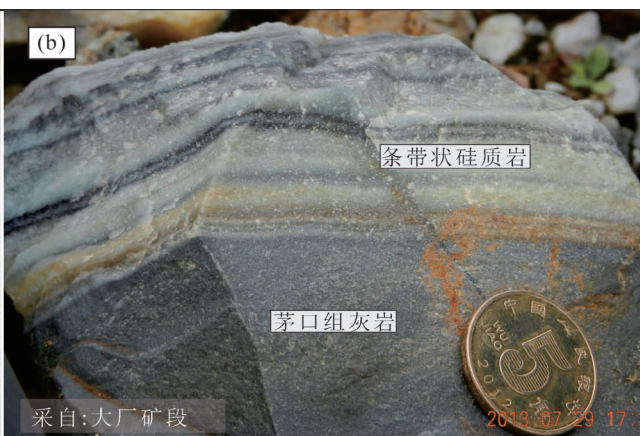
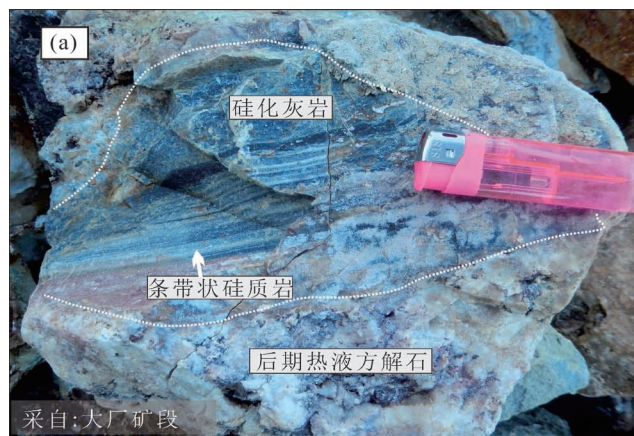


图 7 贵州晴隆锑矿大厂层热水交代相特征

Fig. 7 The sedimentary characteristics of the hydrothermal—metasomatism facies of the Dachang Layer, Qinglong district, SW Guizhou

3 采样及测试方法

本次采集样品总计 386 件, 其中 87 件样品来自晴隆大厂锑矿床大厂矿段、三望坪矿段和西舍矿段的中二叠统大厂层剖面, 其余样品全部采自坑道和地下采场。

3.1 常量元素分析

常量元素测试工作在广州澳实检测中心完成。具体方法为: 首先在制备好的已磨至 200 目的粉样中加入 Li₂B₄O₇—LiBO₂ 助熔物, 充分混合后, 使之在 1000℃ 的熔炉中熔化。熔融物冷却后加入稀 HNO₃ 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, 分析相对误差优于 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℃ 加热 1h, 等冷却后称重, 样品加热前后的重量差即是烧失百分比。

3.2 微量元素分析

微量元素测试工作分别在广州澳实检测中心完成。其微量元素分析方法为: 仪器采用电感耦合等离子体发射光谱 (ICP-AES) 测定。具体方法为: 将制备好的碎至 200 目的粉样用 HClO₄、HNO₃、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, 分析相对误差优于 3%。稀土元素分析方法为: 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 LiBO₂ 溶剂中, 混合均匀, 在

1000℃ 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。全岩 Au 含量分析采用火试金法, 在广州澳实检测中心完成。

4 岩矿石元素地球化学

在矿床学研究中, 矿石和围岩的常量元素以及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。其中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。晴隆大厂锑矿床存在不同类型的岩、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。为揭示大厂层的沉积演化特征以及与后期成矿之间的关系,本次研究对不同沉积相岩石进行元素地球化学分析。

4.1 热水沉积相硅质岩

硅质岩研究一直都是地质学家潜心研究的热点,特别是近些年海底热泉的发现 (Rona et al. , 1980),为硅质岩的研究提供了新的思路 and 方向。高温富硅流体从深部溢出遭遇冷的海水,两者混合后形成的混合热流体因硅含量较正常海水显著偏高、或流体物理化学性质发生改变而沉淀,所以在现代和古代热液活动区常有硅质岩产出 (Rona et al. , 1980; 陈弘等, 2006)。除热液成因硅质岩外,生物成因也是硅质岩形成的方式之一 (邱振等, 2011)。无论何种成因的硅质岩,其化学组成主要以 SiO₂ 为主,岩石结构致密,具有较强的抗风化能力。不同成因或沉积建造类型的硅质岩详细记录着与之相伴随的沉积环境改变、盆地演化及热液活动等方面的信息。

为判别纹层状硅质岩的成因,对 3 件样品进行主量元素测试 (见表 1)。结果表明,SiO₂ 含量介于 83.5% ~ 94.6%, Al₂O₃ 含量为 1.23% ~ 5.92%, Fe₂O₃ 1.87% ~ 8.14%, K₂O 0.20% ~ 1.42%, Na₂O 0.02% ~ 0.04%, TiO₂ 0.23% ~ 0.88%。与现代海洋热水沉积硅质岩相比,Al₂O₃、K₂O、Na₂O 和 TiO₂ 含量较高,反映出有陆源碎屑 (火山碎屑和沉积碎屑) 介入,与火山成因热液硅质岩的特点类似 (Pollock, 1987),这也与大厂层的火山—热水沉积背景一致。此外,硅质岩中的 Fe、Mn 的富集主要与热液参与有关,而 Al、Ti 的富集则主要与陆源物质的输入有关,因此硅质岩 Al/(Al+Fe+Mn) 值是目前使用较为广泛的判别热水沉积岩的标志 (Boström and Peterson, 1969; Yamamoto et al. , 1986a,b),Al/(Al+Fe+Mn) 值越低,表示热水作用对沉积物的影响愈强烈。本次测试 3 件纹层状硅质岩 Al/(Al+Fe+Mn) 值分别为 0.22 (DC2-D)、0.28 (DC-3) 和 0.71 (DC-11),反映出硅质岩主要以热水成因,但样品 DC-11 与典型的热热水成因硅质岩有区别,可能与后期热液的改造有关。

微量元素结果显示 (表 1),在成矿前期纹层状硅质岩中,3 件样品 Sb 含量分别是大陆地壳的 3080

表 1 晴隆大厂锑矿床硅质岩主量元素 (%) 和微量元素 (×10⁻⁶) 测试结果

Table 1 The contents of major elements (%) and trace elements (×10⁻⁶) in siliceous rock from Qinglong deposit

样品	DC-2-D	DC-3	DC-11	大陆地壳	样品	DC-2-D	DC-3	DC-11	大陆地壳	样品	DC-2-D	DC-3	DC-11	大陆地壳
SiO ₂	83.5	94.6	88.7		SrO	0.01	<0.01	<0.01		Sr	84	32.3	48.8	350
TiO ₂	0.58	0.23	0.88		V ₂ O ₅	0.05	0.01	0.02		Zr	102	42	199	190
Al ₂ O ₃	3.08	1.23	5.92		ZnO	<0.01	<0.01	<0.01		Nb	11.9	0.6	29.4	25
Fe ₂ O ₃	8.14	2.3	1.87		ZrO ₂	0.01	<0.01	0.02		Mo	3.38	1.51	3.93	1.5
MgO	0.08	0.03	0.07		烧失	3.27	0.83	1.34		Ag	0.18	0.5	0.08	0.05
MnO	0.01	0.01	<0.01		总量	101.5	99.89	100.46		Cd	0.21	0.08	0.04	0.098
CaO	0.04	0.05	0.05		Li	7.9	9.5	9.8	20	In	0.481	0.075	0.126	0.05
K ₂ O	0.91	0.2	1.42		Be	0.36	0.25	0.59	3	Sn	1.4	0.5	2	5.5
Na ₂ O	0.04	0.02	0.02		Sc	6.4	1.6	6.8	11	Sb	616	514	307	0.2
CoO	<0.01	<0.01	<0.01		V	276	53	133	60	Cs	1.39	0.97	1.79	3.7
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	0.02		Cr	333	63	50	355	Ba	110	30	100	550
CuO	<0.01	<0.01	<0.01		Co	2.3	0.6	0.3	10	Hf	2.2	0.8	4.4	5.8
As ₂ O ₃	0.21	0.04	0.06		Ni	9.7	1.5	1.7	20	Ta	0.68	<0.05	1.84	2.2
BaO	0.01	0.01	0.02		Cu	12.9	6.8	4	25	W	5.6	0.2	6.6	2
NiO	0.01	0.01	0.01		Zn	17	3	<2	71	Tl	0.44	0.22	0.25	0.75
P ₂ O ₅	0.05	0.01	0.02		Ga	12.35	2.41	12.5	17	Pb	9.5	11.5	3.8	0.02
PbO	<0.01	<0.01	0.01		Ge	0.13	0.06	0.1	1.6	Bi	0.32	0.25	0.39	0.127
SnO ₂	<0.01	<0.01	<0.01		As	1675	319	439	1.5	Th	4.1	1.3	5.1	10.7
SO ₃	1.45	0.29	0.01		Rb	7.4	2.3	19.5	112	U	4.8	1.6	3	2.8

注：大陆地壳数据引自 Taylor et al. ,1985。

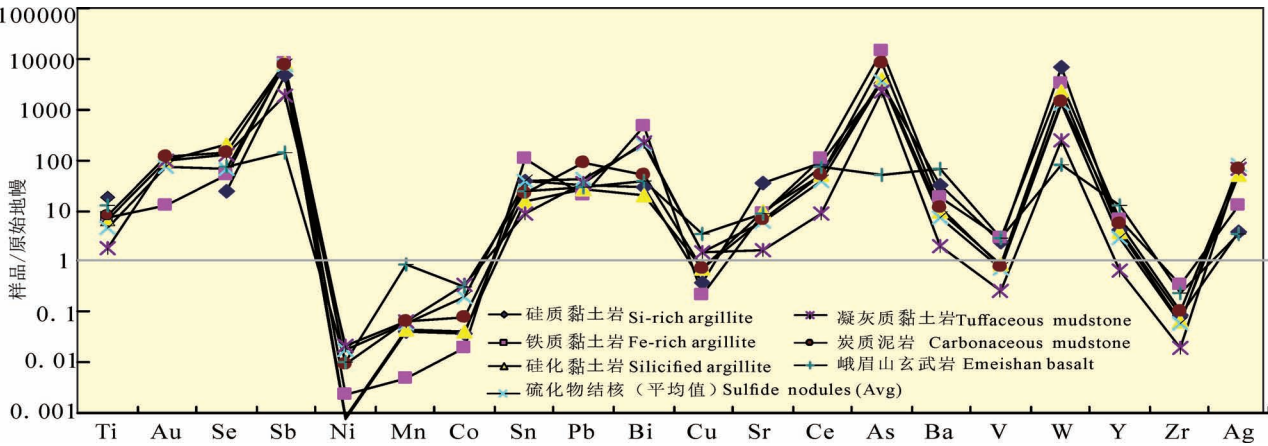


图 8 晴隆大厂锑矿床大厂层中硫化物结核原始地幔标准化微量元素蛛网图(原始地幔数据引自 Taylor et al. ,1985)

Fig. 8 Plots of primitive mantlenormalized trace element spider diagrams for sulfide concretions in Dachang Layer from Qinglong deposit(data of primitive mantle from Taylor et al. ,1985)

倍(DC2-D)、2570 倍(DC-3)和 1535 倍(DC-11)。此外,W 亦呈明显富集,是大陆地壳平均含量的 64 倍。

4.2 热水喷流岩相硫化物元素地球化学

本次研究共选取 16 件不同类型的硫化物结核以及未蚀变的泥岩、凝灰岩及玄武岩进行主量元素和微量元素分析,样品类型及测试结果见表 2 和表 5,具体采样位置见图 6。

晴隆大厂锑矿床大厂层硫化物结核 SiO₂ 含量为 34.6% ~ 51.9%,全铁含量(TFe₂O₃)为 20.4% ~ 32.2%,全硫氧化物(SO₃)含量为 35.5% ~ 52.5%,相对应单质硫(S)含量为 14.2% ~ 21.0%,金属元素主要为 Fe,指示该硫化物类型为富 Fe 型热液硫化物。Al₂O₃ 含量为 1.38% ~ 3.48%,相对于东太平洋 13°N 附近热液硫化物的 Al 含量(0.04% ~ 0.54%)(曾志刚等,2009)明显较高,指示在硫化物结核形成深度较浅,有陆源物质参与。P₂O₅ 含量为 0.04% ~ 0.28%,K₂O 含量为 0.27% ~ 0.74%,TiO₂ 含量为 0.43% ~ 0.89%,其他元素氧化物含量低于 0.1%。硫化物结核烧失量为 23.36% ~ 31.31%,与手标本中观察到大量有机质的现象一致。

微量元素原始地幔标准化蛛网图显示(图 8),硫化物结核体与炭质泥

岩以及峨眉山玄武岩配分曲线一致。As(254×10⁻⁶ ~ 643×10⁻⁶)、Au(0.03×10⁻⁶ ~ 0.13×10⁻⁶)、Sb(41.8×10⁻⁶ ~ 66.6×10⁻⁶)、Se(1×10⁻⁶ ~ 5×10⁻⁶)、Bi(0.02×10⁻⁶ ~ 0.64×10⁻⁶)、Pb(2.9×10⁻⁶ ~ 10.3×10⁻⁶)、W(3.9×10⁻⁶ ~ 22.7×10⁻⁶)和 Ag(0.9×10⁻⁶ ~ 2.86×10⁻⁶)相对于原始地幔呈明显富集,Ni(34.3×10⁻⁶ ~ 56.8×10⁻⁶)、Cu(23.7×10⁻⁶ ~ 81.1×10⁻⁶)、Co(8.9×10⁻⁶ ~ 32.2×10⁻⁶)、V(33×10⁻⁶ ~ 60×10⁻⁶)和 Zr(8.1×10⁻⁶ ~ 83.8

表 2 晴隆锑矿大厂层中硫化物结核主量元素分析结果(%)

Table 2 The data of major elements of sulfide concretions in Dachang Layer from Qinglong deposit (%)

	DC2-4-1	DC2-4-2	DC2-4-3	DC2-4-4	DC2-4-5	DC2-4-6	DC2-4-7	DC2-4-8
SiO ₂	34.6	51.9	46.9	46.6	43.4	45.1	38.5	41.1
TiO ₂	0.71	0.89	0.43	0.74	0.53	0.68	0.73	0.44
Al ₂ O ₃	2.25	3.48	2.1	2.41	1.76	2.09	2.11	1.38
TFe ₂ O ₃	30.2	20.4	25.1	26.7	26	25.5	28.6	28.1
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
MgO	0.06	0.11	0.09	0.07	0.04	0.06	0.05	0.03
CaO	0.05	0.05	0.02	0.05	0.02	0.02	0.04	0.02
K ₂ O	0.46	0.74	0.41	0.52	0.4	0.45	0.44	0.27
As ₂ O ₃	0.03	0.07	0.04	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05
Nb ₂ O ₅	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
P ₂ O ₅	0.28	0.21	0.07	0.15	0.09	0.05	0.12	0.04
PbO	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
SO ₃	52.5	35.5	43.5	46.8	44.5	43.8	49.5	48.9
烧失	31.31	21.86	25.51	23.36	28.28	26.58	30.02	29.07
总量	99.99	99.74	100.7	100.7	100.61	100.62	100.72	100.54

注:计算总量(Total)时不计 SO₃ 含量。

$\times 10^{-6}$)等亏损(图 8)。其元素富集特征与西南印度洋 49.6°E 热液区富 Fe 型硫化物中的元素富集特征(叶俊, 2010)类似,但 Cu 含量相对较低。而在黏土质凝灰岩和炭质泥岩中,微量元素 Sb 异常富集,介于 $116 \times 10^{-6} \sim 1300 \times 10^{-6}$ 之间, Ti 含量(1.3%~3.0%)与本区玄武岩中 Ti 含量(2.7%~4.0%)接近。现代海底火山成矿作用研究表明, As、Sb、Au、Ag 等元素主要富集于热液硫化物中(Monecke et al., 2014; Nozaki et al., 2016; Fallon et al., 2017),如冲绳海槽 Iheya 北部地区的现代黑烟囱及海底沉积物中发育 Pb—As—Ag—Sb—Cu ($\pm$ Mn $\pm$ Zn)矿层,其中 Sb 含量平均为 1000×10^{-6} , As 含量介于 $500 \times 10^{-6} \sim 1200 \times 10^{-6}$ 之间,并有辉锑矿与黄铁矿共生(Nozaki et al., 2016),而在 Sunrise 和 Palinuro 热液区的硫化物中, Sb 含量分别为 3564×10^{-6} 和 5100×10^{-6} (Monecke et al., 2014),表明在现代海底热液成矿过程中, Sb 能够随着海底热水喷流活动大量富集。此外, 8 件硫化物结核体样品 Li(7×10^{-6})、Bi(0.1×10^{-6})、V(47×10^{-6})、Zr(26×10^{-6})和 Hf(0.6×10^{-6})的平均值低于洋壳的含量(Li = 10×10^{-6} , Be = 0.5×10^{-6} , V = 250×10^{-6} , Zr = 80×10^{-6} , Hf = 2.5×10^{-6})(Windley, 1986),说明大厂层中晚二叠世时期的热水喷流环境与基底为洋壳的洋中脊热液环境有差异。

结合区域地质背景和大厂层岩相学研究,峨眉地幔柱引发地壳张裂,同沉积断裂发育,不仅形成了超大规模的峨眉山大火成岩省,同时伴随火山喷发

和海底热水喷流活动。Zhang Yan 等(2013)通过对峨眉山大火成岩省玄武岩熔融包裹体的研究认为在玄武岩浆去气作用产生的超规模的 SO₂ 气体和硫酸气溶胶可能导致了海水酸化,这种酸化海水极易形成大量黄铁矿的沉淀。Monecke 等(2014)对现代火山热液区海底硫化物 As、Sb 元素富集与海水深度的关系研究证明,随着海水深度的变浅, As 和 Sb 呈明显富集的趋势, Sb 在热液硫化物中可达 1000×10^{-6} 以上。在海水深度 1.5 km 之内,上升过程中的热液流体承受上覆压力小,易于发生剧烈的沸腾作用(如 Tonga 岛弧),导致富含 CO₂ 和 H₂S 挥发分发生相分离,并使得 As、Sb、Hg 等以硫化物的形式沉淀(Monecke et al., 2014; 石学法等, 2016)。因此,在大厂层沉积时期,与基性岩浆活动有关的火山喷发和海底热水喷流活动产生大量的富含挥发分(H₂S)的含矿热水,在局限浅海环境下,热水中的 S 与火山凝灰岩中的 Fe 结合形成了大量白铁矿—黄铁矿,同时也可能导致了成矿元素(Au、Sb、As 等)的初步富集。

5 大厂层对成矿物质的贡献程度

在现代不同构造环境下的海底热液区,高温富硅流体从深部溢出遭遇冷的海水,由于流体物理化学性质而改变形成大量的非晶质硅(Rona et al., 1980),如在位于弧后环境的马努斯海盆区热液硫化物中发育大量的二氧化硅脉体(陈弘等, 2006)。在火山—热液区,这种非晶质硅主要来自火山热液,

表 3 晴隆大厂锑矿床硫化物结核主要成矿元素相关系数矩阵

	Ni	Fe	As	Al	V	Pb	Sb	Au	Ag	Co	Cu	Se	Sn	Ti	Mn
Ni	1.00														
Fe	0.78	1.00													
As	-0.78	-0.94	1.00												
Al	-0.13	-0.60	0.51	1.00											
V	-0.08	-0.58	0.50	0.90	1.00										
Pb	-0.46	-0.71	0.68	0.48	0.39	1.00									
Sb	-0.60	-0.37	0.59	-0.23	-0.05	0.23	1.00								
Au	-0.67	-0.56	0.62	-0.23	-0.16	0.63	0.66	1.00							
Ag	-0.37	-0.22	0.15	-0.07	0.01	-0.34	0.32	-0.02	1.00						
Co	0.19	0.30	-0.35	-0.25	-0.33	0.23	-0.39	0.14	-0.79	1.00					
Cu	-0.55	-0.37	0.56	-0.30	-0.11	-0.02	0.86	0.61	0.44	-0.51	1.00				
Se	-0.21	0.01	0.03	-0.61	-0.66	0.27	0.17	0.71	-0.32	0.55	0.24	1.00			
Sn	-0.41	-0.23	0.33	-0.29	-0.10	-0.22	0.74	0.32	0.82	-0.77	0.83	-0.06	1.00		
Ti	0.16	-0.26	0.27	0.80	0.83	0.28	-0.21	-0.33	-0.45	0.01	-0.31	-0.59	-0.47	1.00	
Mn	0.04	-0.12	0.34	-0.07	-0.06	-0.03	0.38	0.23	0.07	-0.48	0.62	0.19	0.44	-0.08	1.00

那么 SiO₂ 含量的变化就能够反映海底热水喷流量的多少,当 SiO₂ 大量沉淀时,说明热水喷流量大,相对应由热水携带的成矿元素越富集;而 SiO₂ 含量较少时,说明热水喷流活动趋于停止,相对应来自于深部热水的元素表现为亏损,相反来自陆源沉积物中的元素则表现为富集。从 SiO₂ 与 Ni、Pb、Sb、Fe、As、Au、Al 和 Ag 等元素的相关性图解可以看出(图 9),SiO₂ 与 Pb、Sb、As、Au 和 Ag 呈正相关性,说明 Pb、Sb、As、Au、Ag 等成矿元素主要来自深部喷流热水,而 SiO₂ 与 Fe、Ni 呈明显的负相关,和 Al 相关性

不明显,揭示 Fe、Al、Ni 来自非热水沉积物。此外,从主要成矿元素相关系数矩阵可以看出(表 3),主要呈三种元素组合:①Ni、Fe 呈正相关(相关系数为 0.78);②As、Sb、Au、Cu 呈正相关(相关系数大于 0.5),③Al、V、Ti 呈正相关(相关系数大于 0.8)。而 Ni、Fe 与 Al、V、Ti 相互之间相关性不明显,但与 As、Sb、Au、Cu 呈明显的负相关,说明 Ni、Fe、Al、V、Ti 来源与 As、Sb、Au、Cu 明显不同。现代有关火山热液区大量的研究证实(De Ronde et al., 2005; Petersen et al., 2014; Monecke et al.,

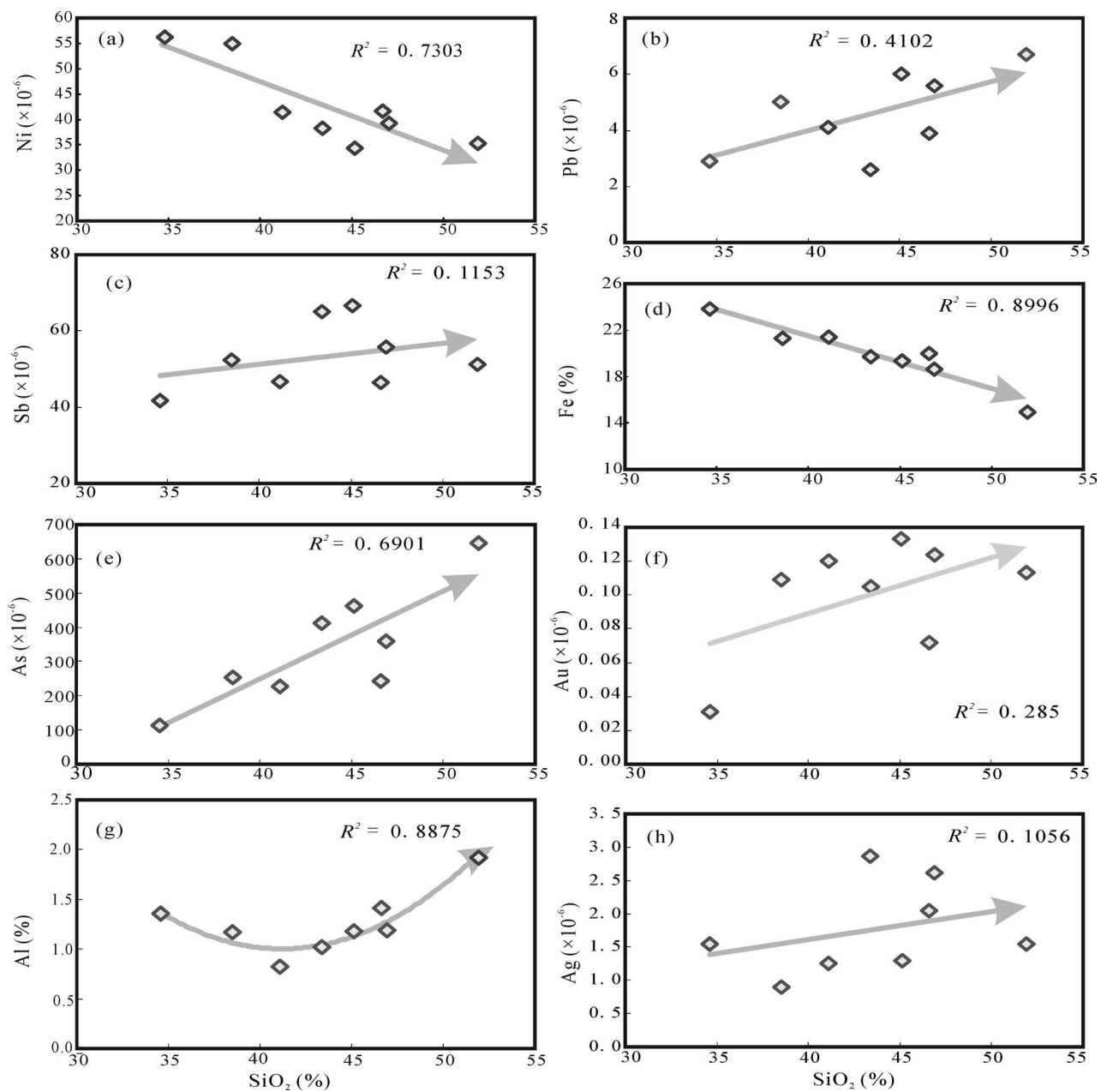


图 9 晴隆大厂锑矿大厂层中硫化物结核中 SiO₂ 与 Ni、Pb、Sb、Fe、As、Au、Al、Ag 等元素的相关性图解

Fig. 9 The scatter diagram of SiO₂ vs Ni, Pb, Sb, Fe, As, Au, Al and Ag from sulfide concretions from Qinglong Sb deposit

2013, 2014; 石学法等, 2016), As、Sb、Au、Cu、Pb、Zn 等元素主要源于深部高温热水, 与岩浆作用有关。由此可见, 晴隆大厂锑矿床大厂层中硫化物结核体 As、Sb、Au、Cu 等成矿元素与中一晚二叠世时期的火山—岩浆作用关系密切, 而 Ni、Fe、Al、V、Ti 可能与隆起区风化剥蚀有关。岩相学研究显示, 在中一晚二叠世峨眉山玄武岩喷发时期, 晴隆地区在接受大陆溢流玄武岩沉积的同时, 同时存在火山喷发。从元素分析可以看出, 峨眉山玄武岩中 As($3.9 \times 10^{-6} \sim 5.7 \times 10^{-6}$)、Sb($0.84 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$) 含量很低(表 4), 显然不足以提供大量的成矿元素, 而在硫化物结核体和火山沉积物中, As($111 \times 10^{-6} \sim 1415 \times 10^{-6}$)、Sb($50 \times 10^{-6} \sim 1300 \times 10^{-6}$) 含量高出两个数量级。因此, 在大厂层沉积过程中, 火山作用和海底热水喷流作用可能提供了部分成矿物质。

6 大厂层沉积模式

在中一晚二叠世时期(~260 Ma), 右江盆地范围内受峨眉地幔柱的影响地质活动剧烈, 发生大规模的玄武岩溢流以及火山喷发。在黔西南晴隆县大厂地区, 峨眉山溢流玄武岩自西向东进入海水遇冷形成淬碎角砾岩。与此同时, 沿着张性断裂(青山镇断裂) 大量火山喷发, 在晴隆、普安、盘县和贞丰一带沉积了大量的火山碎屑岩, 为大厂层的形成提供了物质基础(图 10)。另一方面, 在大厂层沉积过程中存在热水喷流沉积作用, 元素地球化学表明在热水沉积过程部分成矿元素(As、Sb、Au) 得到初步富集(图 10)。所以, 印支期的沉积过程对矿床最大的贡献在于为燕山晚期的热液流体提供了有利的成矿场所和部分物质基础。需要强调的是, 虽然目前

表 4 晴隆大厂锑矿床大厂层中正常沉积岩、硫化物结核体和峨眉山玄武岩微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)
Table 4 The data of trace elements of sedimentary rocks, sulfide concretions and Emeishan basalt in Dachang Layer from Qinglong deposit ($\times 10^{-6}$)

元素	底部沉积岩			硫化物结核体								顶部沉积岩		本区玄武岩			原始地幔
	DC2-1	DC2-2	DC2-3	DC2-4-1	DC2-4-2	DC2-4-3	DC2-4-4	DC2-4-5	DC2-4-6	DC2-4-7	DC2-4-8	DC2-5	DC2-6	SWP-1	DC1-13	DC1-11	
Al(%)	2.7	6.97	3.58	1.36	1.92	1.19	1.41	1.02	1.18	1.17	0.82	2.73	11.6	6.54	7.35	6.77	3.64
Fe(%)	9.96	23	3.9	23.8	14.9	18.7	20	19.7	19.35	21.4	21.4	9.37	1.94	9.27	9	14.9	8
Ti(%)	2.89	1.185	1.09	0.464	0.563	0.28	0.476	0.354	0.438	0.481	0.293	1.295	2.97	1.71	2.17	2.13	0.16
Au ($\times 10^{-9}$)	—	16	120	31	113	124	72	105	133	109	120	150	11	—	—	—	1.3
Se	1	2	8	1	2	3	1	2	3	3	5	6	2	3	3	3	0.041
Sb	116	203	199.5	41.8	51.3	55.7	46.5	65	66.6	52.3	46.8	193.5	1300	0.84	2.74	7	0.025
Ni	1.5	4.4	1.7	56.8	34.9	39.4	41.6	38.2	34.3	54.8	41.4	17.8	8	50.9	6.2	4.6	2000
Mn	39	5	45	68	78	62	19	93	59	75	62	63	10	1520	686	341	1000
Co	3.7	1.9	3.9	19.8	18.6	17.2	24.7	8.9	25.8	27.1	33.2	8	5.2	39.9	37.4	17.2	100
Sn	2.2	6.4	0.9	0.5	0.6	1.1	0.6	1.5	0.8	0.6	0.5	1.3	15.1	1.8	0.9	1.7	0.06
Pb	3.9	2.5	3.1	2.9	6.7	5.6	3.9	2.6	6	5	4.1	10.3	3.9	2.8	2.4	5	0.12
Bi	0.03	0.47	0.02	0.02	0.04	0.33	0.02	0.64	0.35	0.03	0.22	0.05	0.32	0.04	0.03	0.04	0.001
Cu	10.2	5.9	20.5	23.7	47.4	46.8	29.7	81.1	55.7	44.3	43.8	20.6	12.5	282	3.9	4	28
Sr	650	148	173.5	197	174	97.4	196.5	41.5	34.9	83.2	29.4	118.5	142.5	144	153	177	17.8
Ce	129	146.5	71.6	28.7	34.2	30.7	34.3	53.8	10.95	15.55	12.85	73.6	241	58.4	120	133.5	1.436
As	322	1415	388	111.5	643	360	242	411	463	254	227	813	178.5	5.7	3.9	5.2	0.1
Ba	160	90	50	20	20	20	20	20	20	30	10	60	150	40	570	370	5.1
V	294	364	107	45	60	44	53	45	44	50	33	98	419	447	279	326	128
W	108.5	52.6	37.3	8.7	8.9	8.7	8.8	10.7	6.4	5.1	3.9	22.7	124	2	1	1	0.016
Y	13.8	22.7	13.1	3.8	4.6	14.7	9.4	9.2	1.9	3.4	2.2	18.6	31.2	34.4	49.7	49.2	3.4
Zr	69	266	52.9	9.7	29.8	51.2	8.1	57.4	16.2	18.9	16.1	83.8	208	195	189	186	813
Ag	0.07	0.23	0.94	1.55	1.54	2.62	2.05	2.86	1.29	0.9	1.26	1.28	0.27	0.09	0.04	0.07	0.019

注:SWP 为三望坪矿段;DC1 为大厂 1#剖面;DC2 为大厂 2#剖面;“—”表示未测试;原始地幔数据引自 Taylor et al. ,1985。

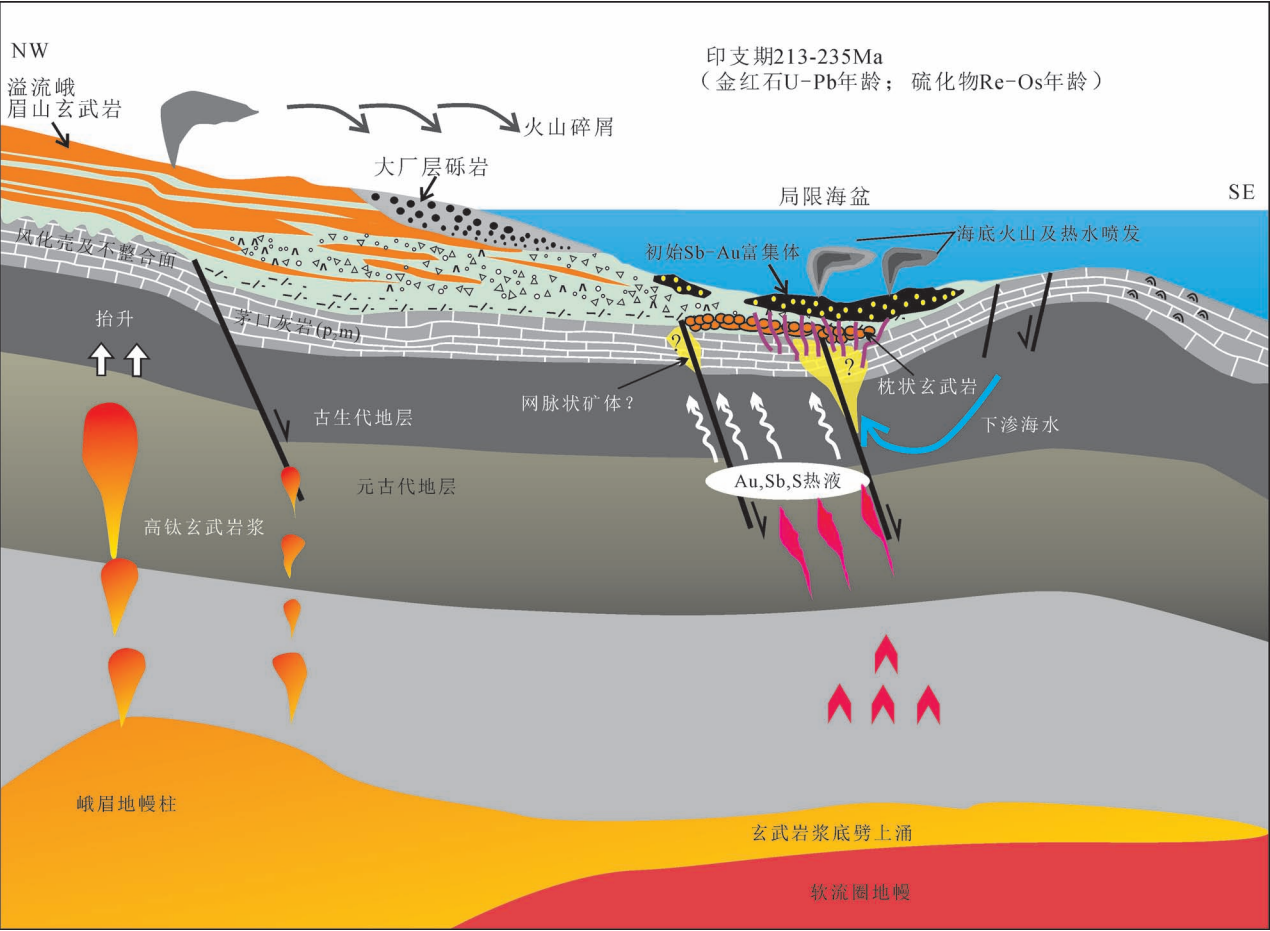


图 10 印支期大厂层沉积模式图

Fig. 10 The sedimentary model of the Dachang Layer in Indosinian

的证据显示大厂层在沉积过程中的元素富集并未形成工业矿体,但在时间上与右江盆地印支期低温热液成矿事件(200~250 Ma; Chen Maohong et al., 2015; Pi Qiaohui et al., 2017; Tan Qiping et al., 2019)在时空上基本一致,说明印支期成矿事件在右江盆地北缘也有响应,只是在盆地北缘未形大规模的矿化,而在盆地南缘形成了以辉绿岩容矿的卡林型金矿床(董文斗, 2017; Su Wenchao et al., 2018)。

7 结论

(1) 大厂层岩相学研究显示,大厂层主要包括火山岩相(火山溢流相、淬碎角砾岩相、沉凝灰岩相、空落集块岩相和熔结凝灰岩相)和热液沉积岩相(热水沉积相、热水喷流相和热水交代相)。结合沉积背景及岩相古地理分析认为,在中、晚二叠世之交,贵州晴隆大厂地区处于一个局限的浅海环境,火

山活动、海底热水喷流活动以及峨眉山玄武岩溢流共同主导了大厂层的形成。

(2) 元素地球化学研究显示,大厂层在沉积过程的热液喷流沉积作用提供了 Sb、As、Au、Ag、Pb 等成矿元素,并形成成矿元素的初始“富集体”。这一热水喷流成矿事件在时间上与右江盆地印支期低温热液成矿事件在时空上基本一致。

致谢:感谢两位审稿专家和章雨旭研究员对本文提出宝贵的修改意见。

注 释 / Notes

- ① “大厂层”为贵州省晴隆锡矿的赋矿岩层,20 世纪 60 年代贵州省地质局 112 队在晴隆锡矿做普查勘探时,将这套火山沉积岩定名为“大厂层”。
- ② 贵州地质局 112 队. 1972. 贵州省晴隆县大厂锡矿田西舍矿床初勘地质报告。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese

with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈弘, 朱本铎, 崔兆国. 2006. 海底热液矿床地质和地球化学特点研究. 热带海洋学报, 25(2): 79~84.

陈军, 杨瑞东, 郑禄林, 高军波, 魏怀瑞. 2014. 贵州晴隆中二叠统大厂层砾岩成因研究. 地质论评, 60(6): 1309~1322.

陈军, 黄智龙, 杨瑞东, 杜丽娟, 苏文超, 郑禄林, 叶霖. 2020. 右江盆地 SEDEX 金矿化类型的发现及意义. 科学通报, doi: 10.1360/TB-2019-0837

陈文一, 刘家仁, 王中刚, 郑启钤. 2003. 贵州峨眉山玄武岩喷发期的岩相古地理研究. 古地理学报, 5(1): 17~28.

董文斗. 2017. 右江盆地南缘辉绿岩容矿金矿床地球化学研究. 导师: 苏文超. 北京: 中国科学院大学博士学位论文: 1~186.

冯增昭, 金振奎, 杨玉卿, 鲍志东, 辛文杰. 1994. 滇黔桂地区二叠纪岩相古地理. 北京: 地质出版社.

贵州省地质矿产局. 1987. 贵州省区域地质志. 北京: 地质出版社.

胡煜昭. 2011. 黔西南坳陷沉积盆地分析与锑、金成矿研究. 导师: 方维萱. 昆明: 昆明理工大学博士学位论文: 1~169.

蒋杰, 李卫锋. 2009. 贵州省晴隆大厂锑矿田矿床地质特征及其外围成矿预测. 地质与资源, 18(4): 289~291.

李宏博, 朱江. 2013. 峨眉山玄武岩与茅口组灰岩的接触关系: 对峨眉山地幔柱动力学模型的指示意义. 大地构造与成矿学, 37(4): 571~579.

廖朝中. 1983. 贵州大厂锑矿床成因探讨. 贵州地质科技情报, 1: 16~28.

刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集. 北京: 科学出版社: 1~188.

刘路. 2016. 黔西南大厂层沉积相研究. 导师: 胡煜昭. 昆明: 昆明理工大学硕士学位论文: 1~75.

刘平, 廖友常, 殷科华, 叶德书, 朱华, 韩忠华, 杨光龙. 2008. 与火山活动有关的热液沉积锰矿——以贵州二叠纪锰矿为例. 中国地质, 35(5): 992~1006.

刘志臣, 张远国, 陈登, 刘金海, 崔忠强, 胡乐宇等. 2013. 贵州遵义锰矿区“白泥塘层”硅质岩地球化学特征及其地质意义. 矿物学报, 33(4): 231~236.

邱振, 王清晨, 严德天. 2011. 广西来宾蓬莱滩剖面中上二叠统硅质岩的地球化学特征及沉积背景. 岩石学报, 27(10): 3141~3155.

石学法, 李兵, 鄢全树, 叶俊. 2016. 西太平洋岛弧—弧后盆地热液活动及成矿作用. 吉林大学学报: 地球科学版, 46(4): 1124~1138.

唐永忠, 齐文, 刘淑文, 侯满堂. 2007. 南秦岭古生代热水沉积盆地与热水沉积成矿. 中国地质, 34(6): 1091~1100.

徐海, 高军波, 杨瑞东, 郑禄林, 张旭. 2017. 贵州遵义二叠系锰矿区硅质岩成因及成矿意义. 地质科学, 52(4): 1297~1311.

王砚耕. 1994. 试论黔西南卡林型金矿区域成矿模式. 贵州地质, 11(1): 1~7.

杨瑞东, 程玛莉, 魏怀瑞. 2009. 贵州水城二叠系茅口组含锰岩系地质地球化学特征与锰矿成因分析. 大地构造与成矿学, 33(4): 613~619.

叶俊. 2010. 西南印度洋超慢速扩张脊 49.60E 热液区多金属硫化物成矿作用研究. 导师: 李乃胜和石学法. 青岛: 中国科学院海洋研究所博士学位论文: 1~129.

曾志刚, 陈代庚, 殷学博, 王晓媛, 张国良, 汪小妹. 2009. 东太平洋海隆 13°N 附近热液硫化物中的元素、同位素组成及其变化. 中国科学: 地球科学, 39(12): 1780~1794.

张国林, 姚金炎, 谷相平. 1998. 中国锑矿床类型及时空分布规律. 矿产与地质, 12(5): 306~312.

张启厚. 1999. 晴隆大厂锑矿床容矿层硅质来源的研究. 贵州地质, 16(2): 111~116.

朱江, 张招崇, 侯通, 康健丽. 2011. 贵州盘县峨眉山玄武岩系顶部凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄: 对峨眉山大火成岩省与生物大规模灭绝关系的约束. 岩石学报, 27(9): 2743~2751.

朱俊宾. 2010. 贵州省晴隆锑矿岩相学与地质地球化学研究. 导师: 刘家军. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1~75.

Boström K, Peterson M N A. 1969. The origin of aluminum-poor ferromanganous sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise. Marine Geology, 7(5): 427~447.

Bureau of Geology and Mineral Exploration of Guizhou Province. 1987#. Regional Geology of Guizhou Province. Beijing: Geological Publishing House: 1~666.

Chen Hong, Zhu Benduo, Cui Zhaoguo. 2006#. A study on geological and geochemical characteristics of seafloor hydrothermal polymetallic deposits. Journal of Tropical Oceanography, 25(2): 79~84.

Chen Jun, Yang Ruidong, Du Lijuan, Zheng Lulin, Gao Junbo, Lai Chunkit, Wei Huairui, Yuan Minggang. 2018. Mineralogy, geochemistry and fluid inclusions of the Qinglong Sb—(Au) deposit, Youjiang basin (Guizhou, SW China). Ore Geology Reviews, 92: 1~18.

Chen Jun, Yang Ruidong, Zheng Lulin, Gao Junbo and Wei Huairui. 2014#. A research on the genesis of the conglomerate of Dachang Layer of Middle Permian in Qinglong, Guizhou. Geological Review, 60(6): 1309~1322.

Chen Jun, Huang Zhilong, Yang Ruidong, Du Lijuan, Su Wenchao, Zheng Lulin, Ye Lin. 2020#. Discovery of SEDEX gold in volcanic-sedimentary rocks in the Middle-Late Permian in the Youjiang basin, SW China: Implications for a new type Au mineralization. Chinese Science Bulletin, in press, doi: 10.1360/TB-2019-0837

Chen Maohong, Mao Jingwen, Li Chao, Zhang Zhiqiang, Dang Yuan. 2015. Re - Os isochron ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan—Guizhou—Guangxi “golden triangle”, southwestern China. Ore Geology Reviews, 64: 316~327.

Chen Wenyi, Liu Jiaren, Wang Zhonggang, Zheng Qiling. 2003#. Study on lithofacies palaeogeography during the Permian Emeishan basalt explosion in Guizhou Province. Journal of Palaeogeography, 5(1): 17~28.

De Ronde C E J, Hannington M D, Stoffers P, Wright I C, Ditchburn R G, Reyes A G, Baker E T, Massoth G J, Lupton J E, Walker S L, Greene R R, Soong C W R, Ishibashi J, Lebon G T, Bray C J, Resing J A. 2005. Evolution of a submarine magmatic—hydrothermal system: Brothers volcano, southern Kermadec arc, New Zealand. Economic Geology, 100(6): 1097~1133.

Dong Wendou. 2017#. Geochemical of diabase-hosted gold deposits in south margin of Youjiang basin. Adviser: Su Wen Chao. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, doctoral dissertation: 1~186.

Doyle M G, Mcphie J. 2000. Facies architecture of a silicic intrusion-dominated volcanic center at Highway—Reward, Queensland, Australia. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 99: 79~96.

Eickmann B, Thorseth I H, Peters M, Strauss H, Bröcker M, Pedersen R B. 2014. Barite in hydrothermal environments as a recorder of subseafloor processes: a multiple-isotope study from the Loki’s Castle vent field. Geobiology, 12(4): 308~321.

Fallon E K, Petersen S, Brooker R A, Scott T B. 2017. Oxidative dissolution of hydrothermal mixed-sulphide ore: An assessment of

- current knowledge in relation to seafloor massive sulphide mining. *Ore Geology Reviews*, 86: 309~337.
- Feng Zengzhao, Jin Zhenkui, Yang Yuqin, Bao Zhidong, Xin Wenjie. 1994&. *Lithofacies Paleogeography in the Permian in Dian—Qian—Gui Aera*. Beijing: Geological Publishing House.
- He Bin, Xu Yigang, Chung Sunling, Xiao Long and Wang Yamei. 2003. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3): 391~405.
- Hu Yuzhao. 2011&. *Sedimentary Basin Analysis and Ore Forming of Antimony and Type Gold Deposits of SWG Depression*. Adviser: Fang Weixuan. Kunming: Kunming University of Science and Technology, doctoral dissertation; 1~166.
- Hu Xinlu, Gong Yongjun, Zeng Guoping, Zhang Zhenjie, Wang Jian, Yao Shuzhen. 2018. Multistage pyrite in the Getang sediment-hosted disseminated gold deposit, southwestern Guizhou Province, China: Insights from textures and in situ chemical and sulfur isotopic analyses. *Ore Geology Reviews*, 99: 1~16.
- Jiang Jie, Li Weifeng. 2009&. Geological characteristics and prognosis in the periphery of Dachang antimony orefield in Guizhou Province. *Geology and Resources*, 18(4): 289~291.
- Kormas K A, Tivey M K, Von Damm K, Teske A. 2006. Bacterial and archaeal phylotypes associated with distinct mineralogical layers of a white smoker spire from a deep-sea hydrothermal vent site (9°N, East Pacific Rise). *Environmental Microbiology*, 8(5): 909~920.
- Li Hongbo and Zhu Jiang. 2013&. Contact between the Emeishan basalt and Maokou Formation: Implication for the geodynamic model of the Emeishan mantle plume. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(4): 571~579.
- Liao Chaozhong. 1983&. Discussion on the genesis of Dachang antimony deposit in Guizhou. *Guizhou Geological Science and Technology Information*, 1: 16~28.
- Liu Baojun, Xu Xiaosong. 1994#. *Lithofacies Paleogeographic Atlas of Southern China*. Beijing: Geological Publishing House; 1~188.
- Liu Lu. 2016&. *The Study on sedimentary facies of Dachang layer in southwestern Guizhou*. Adviser: Hu Yuzhao. Kunming: Kunming University of Science and Technology, master dissertation; 1~75.
- Liu Ping, Liao Youchang, Yin Kehua, Ye Deshu, Zhu Hua, Han Zhonghua, Yang Guanglong. 2008&. Hydrothermal sedimentary manganese deposits associated to volcanic activities—Permian manganese deposit in Guizhou. *Geology in China*, 35(5): 992~100.
- Liu Zhichen, Zhang Yuanguo, Chen Deng, Liu Jinhai, Cui Zhongqiang, Hu Leyu, Zhong Yueli. 2013&. Geochemical characteristics and geological significance of “Bainitangceng” siliceous rocks in Zunyi manganese ore fields, Guizhou Province, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(4): 231~236.
- Melekestseva I Y, Tret'yakov G A, Nimis P, Yuminov A M, Maslennikov V V, Maslennikova S P, Kotlyarov V A, Beltenev V E, Danyushevsky L V, Large R. 2014. Barite-rich massive sulfides from the Semenov-1 hydrothermal field (Mid-Atlantic Ridge, 13° 30.87' N): Evidence for phase separation and magmatic input. *Marine Geology*, 349: 37~54.
- Monecke T, Petersen S, Hannington M D. 2014. Constraints on water depth of massive sulfide formation: Evidence from modern seafloor hydrothermal systems in arc-related settings. *Economic Geology*, 109(8): 2079~2101.
- Monecke T, Petersen S, Lackschewitz K, Hügler M, Hannington M D, Gemmell J B. 2013. Shallow Submarine Hydrothermal Systems in the Aeolian Volcanic Arc, Italy. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 90(90): 110~111.
- Nozaki T, Ishibashi J, Shimada K, Nagase T, Takaya Y, Kato Y, Kawagucci S, Watsuji T, Shibuya T, Yamada R, Saruhashi T, Kyo M, Takai K. 2016. Rapid growth of mineral deposits at artificial seafloor hydrothermal vents. *Scientific Reports*, 6: 1~10.
- Petersen S, Monecke T, Westhues A, Hannington M D, Gemmell J B, Sharpe R, Peters M, Strauss H, Lackschewitz K, Augustin N. 2014. Drilling Shallow-Water Massive Sulfides at the Palinuro Volcanic Complex, Aeolian Island Arc, Italy. *Economic Geology*, 109(8): 2129~2158.
- Pi Qiaohui, Hu Ruizhong, Xiong Bin, Li Qiuli, Zhong Richen. 2017. In situ SIMS U-Pb dating of hydrothermal rutile: reliable age for the Zhesang Carlin-type gold deposit in the golden triangle region, SW China. *Mineralium Deposita*, DOI 10.1007/s00126-017-0715.
- Pollock S G. 1987. Chert Formation in an Ordovician Volcanic Arc. *Journal of Sedimentary Petrology*, 57(1): 75~87.
- Qiu Zhen, Wang Qingchen, Yan Detian. 2011&. Geochemistry and sedimentary background of the Middle—Upper Permian cherts in the Penglaitan section, Laibin, Guangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3141~3155.
- Revan M K, Genc Y, Maslennikov V V, Maslennikova S P, Large R R, Danyushevsky L V. 2014. Mineralogy and trace-element geochemistry of sulfide minerals in hydrothermal chimneys from the Upper-Cretaceous VMS deposits of the eastern Pontide orogenic belt (NE Turkey). *Ore Geology Reviews*, 63(3): 129~149.
- Rona P A, Bostrom K, Epstein S. 1980. Hydrothermal quartz vug from the Mid-Atlantic Ridge. *Geology*, 8(12): 569~572.
- Schieber J. 2007. Oxidation of detrital pyrite as a cause for Marcasite Formation in marine lag deposits from the Devonian of the eastern US. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(11~13): 1312~1326.
- Shi Xuefa, Li Bing, Yan Quanshu, Ye Jun. 2016&. Hydrothermal activities and mineralization in the arc and back-arc basin systems, western Pacific. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(4): 1124~1138.
- Song Xieyan, Qi Huawen, Robinson P T, Zhou Meifu, Cao Zhimin, Chen Lemeng. 2008. Melting of the subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume: Evidence from the basal alkaline basalts in Dongchuan, Yunnan, Southwestern China. *Lithos*, 100(1~4): 93~111.
- Stoffers P, Worthington T J, Schwarz-Schampera U, Hannington M D, Massoth G J, Hekinian R, Schmidt M, Lundsten L J, Evans L J, Vaiomo'unga R, Kerby T. 2006. Submarine volcanoes and high-temperature hydrothermal venting on the Tonga arc, southwest Pacific. *Geology*, 34(6): 453.
- Su Wenchao, Dong Wendou, Zhang Xinchun, Shen Nengping, Hu Ruizhong, Hofstra A H, Cheng Lianzheng, Xia Yong, Yang Keyou. 2018. Carlin-Type Gold Deposits in the Dian—Qian—Gui “Golden Triangle” of Southwest China. *Reviews in Economic Geology*, 20: 157~185.
- Sun Yadong, Lai Xulong, Wignall P B, Widdowson M, Ali J R, Jiang Haishui, Wang Wei, Yan Chunbo, Bond D P G, Védérine S. 2010. Dating the onset and nature of the Middle Permian Emeishan large igneous province eruptions in SW China using conodont biostratigraphy and its bearing on mantle plume uplift models. *Lithos*, 119(1~2): 20~33.

Tan Qinqing, Xia Yong, Xie Zhuojun, Wang Zepeng, Wei Dongtian, Zhao Yiming, Yan Jun, Li Songtao. 2019. Two hydrothermal events at the Shuiyindong Carlin-type gold deposit in southwestern China: Insight from Sm-Nd dating of fluorite and calcite. *Minerals*, 230 (9): 2~12.

Tang Yongzhong, Qi Wen, Liu Shuwen, Hou Mantang. 2007&. Paleozoic hydrothermal sedimentary basin and hydrothermal sedimentary mineralization in the southern Qinling. *Geology in China*, 34(6):1091~1100.

Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 1~312.

Wang Yangeng. 1994. On regional metallogenic model for Carlin-type gold deposit in southwest Guizhou. *Guizhou Geology*, 11(1): 1~7.

White J D L. 2000. Subaqueous eruption-fed density currents and their deposits. *Precambrian Research*, 101: 87~109 .

Windley B F. 1986. The continental crust: Its composition and evolution. *The Journal of Geology*, 42(3):196~197.

Xu hai, Gao Junbo, Yang Ruidong, Zheng Lulin, Zhang Xu. 2017&. The origin of siliceous rocks in Zunyi Permian manganese ore fields in Guizhou Province and their metallogenic significance. *Chinese Journal of Geology*, 52(4): 1297~1311.

Xu Yigang, He Bin, Chung Sunling, Menzies M A and Frey F A. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. *Geology*, 32 (10): 917~920.

Xu Yigang, Luo Zhenyu, Huang Xiaolong, He Bin, Xiao Long, Xie Liewen, Shi Yuruo. 2008. Zircon U - Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3084~3104.

Yamamoto K, Sugisaki R, Arai F. 1986a. Chemical aspects of alteration of acidic tuffs and their application to siliceous deposits. *Chemical Geology*, 55(1 - 2):61~76.

Yamamoto K. 1986b. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. *Sedimentary Geology*, 52(1):65~108.

Yang Ruidong, Chen Mali, Wei Huairui. 2009&. Geochemical characteristics and origin of a manganese deposit in the Middle Permian Maokou Formation in Shuicheng, Guizhou, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(4):613~619.

Ye Jun. 2010&. Mineralization of Polymetallic Sulfides on Ultra-slow Spreading Southwest Indian Ridge at 49.6°E. Adviser: Li Naisheng and Shi Xuefa. Qingdao: Institute of Oceanology of the Chinese Academy of Sciences, doctoral dissertation: 1~129.

Zeng Zhigang, Chen Daigeng, Yin Xuebo, Wang Xiaoyuan, Zhang Guoliang, Wang Xiaomei. 2009&. Elemental and isotopic compositions of the hydrothermal sulfide on the East Pacific Rise near 13°N. *Science China: Earth Sciences*, 39(12): 1780~1794.

Zhang Guijie, Zhang Xiaolin, Li Dandan, Farquhar J, Shen Shuzhong, Chen Xiaoyan, Shen Yanan. 2015. Widespread shoaling of sulfidic waters linked to the end-Guadalupian (Permian) mass extinction. *Geology*, 43(12):1091~1094.

Zhang Guolin, Yao Jinyan, Gu Xiangping. 1998&. Types and spatio-temporal distribution of antimony deposits in China. *Mineral Resources and Geology*, 12(5):306~312.

Zhang Qihou. 1999&. On the silicon source of host rock of Dachang antimony deposit in southwestern Guizhou Province. *Guizhou Geology*, 16(2): 111~116.

Zhang Yan, Ren Zhongyan, Xu Yigang. 2013. Sulfur in olivine-hosted melt inclusions from the Emeishan picrites: Implications for S degassing and its impact on environment. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(8): 4063~4070.

Zhu Jiang, Zhang Zhaochong, Hou Tong and Kang Jianli. 2011&. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the tuffs on the uppermost of the Emeishan basalt succession in Panxian County, Guizhou Province: Constraints on genetic link between Emeishan large igneous province and the mass extinction. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9):2743~2751.

Zhu Junbin. 2010&. Studies on Lithofacies and Geology—Geochemistry in Qinglong antimony deposit, Guizhou Province. Adviser: Liu Jiajun. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), master dissertation: 1~75.

Zhuang Hanping, Lu Jialan, Fu Jiamo, Liu Jianzhong, Shi Jixi. 1997. Preliminary study on light hydrocarbons in ore-forming fluids of gold and antimony deposits in southwestern Guizhou, China. *Science Bulletin*, 42(20): 1708~1711.

Hydrothermal—volcanic sedimentary and mineralization of the Dachang Layer in the Middle—Late Permian, Qinglong, southwestern Guizhou

DU Lijuan^{1, 2)}, CHEN Jun^{1, 3)}, YANG Ruidong¹⁾, HUANG Zhilong³⁾, ZHENG Lulin⁴⁾, GAO Junbo¹⁾, WEI Huairui¹⁾

- 1) College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025;
- 2) Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang, 550025;
- 3) State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002;
- 4) Mining College of Guizhou University, Guiyang, 550025

Objectives:The Qinglong antimony deposit is hosted by the Dachang Layer which is dominated by silicified volcaniclastic rocks in Dachang district, southwestern Guizhou, SW China. In particular, the Dachang Layer is famous because of characteristic lithological composition and tectonic position, and contains gold, antimony, fluorite and pyrite, etc. Although many geologists have presented a majority of studies on genesis of the Dachang

Layer, it is still hotly debated as regarding to formation and evolution of the Dachang Layer. Therefore, in this paper, we systematically describe petrography characteristics and elements geochemistry to reveal the ore-controlling mechanism of the Dachang Layer and identify the evolution.

Methods: Petrography and elements geochemistry of the Dachang Layer were carried out in this paper.

Results: Petrography indicates that the Dachang Layer is formed in a restricted shallow-marine environment. Emei flood basalt events, mafic volcanic eruptions and submarine hydrothermal venting activities in Middle—Late Permian (~ 260 Ma), are probably responsible for its forming material. Trace element geochemistry analysis indicates that submarine sedimentary exhalative can provides Sb, As, Au, Ag and Pb during syn-diagenetic stage, and formed the source-bed of Qinglong deposit.

Conclusions: Ore elements (Sb, As, Au, Ag and Pb) were enriched in the Dachang Layer during syn-diagenetic stage.

Keywords: Dachang Layer; sedimentary exhalative; sedimentary evolution; elements geochemistry; Qinglong; southwestern Guizhou

Acknowledgements: We sincerely appreciate the editors’ and two reviewers’ comments. This paper was supported by the Guizhou Scientific and Technology Fund (No. QKHJC[2019]1315), National Natural Science Foundation of China (Nos. 41802107, U1812402), the Project of Talent Base in Guizhou Province (No. RCJD2018-21) and the Project of the Scientific and Technological Innovation Team of Sedimentary Deposit in Guizhou Province (No. 2018-5613)

First author: DU Lijuan, female, born in 1989, Ph. D, Lecturer. Email: dulijuan891107@163.com

Corresponding author: YANG Ruidong, male, born in 1963, Ph. D, Professor. Email: rdyang@gzu.edu.cn

Manuscript received on: 2019-07-04; Accepted on: 2020-02-17; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.02.013