

# 滇东北毛坪和会泽超大型铅锌矿床粗—巨晶碳酸盐岩成因及其找矿指示意义



WWW.  
geojournals.cn/georev

谭茂<sup>1,2)</sup>, 吴鹏<sup>1,2)</sup>, 韩润生<sup>1,2)</sup>, 张艳<sup>1,2)</sup>, 黄智龙<sup>3)</sup>, 姜龙燕<sup>1,2)</sup>, 杨航<sup>1,2)</sup>

1) 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明, 650093;

2) 有色金属矿产地质调查中心西南地质调查所, 昆明, 650093;

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, 550081

**内容提要:** 云南毛坪和会泽铅锌矿床是川滇黔碳酸盐岩型铅锌成矿域的重要组成部分, 是滇东北铅锌矿集区内两个最具代表性的超大型矿床。靠近铅锌矿体常见透镜状、囊状产出的蚀变围岩, 因呈麻点状而被俗称为“麻石”, 空间上与断裂、矿化结伴出现, 是重要找矿标志。本文以这种麻点状的蚀变围岩为主要研究对象, 通过大比例尺坑道剖面精细测量、岩相分析、电子探针分析、X射线微区衍射分析、主量—微量元素分析, 研究其物质组成、组构特征及形成过程。根据组构特征将蚀变围岩分为两类, I类呈砂糖状, 矿物颗粒主要为粗晶结构(0.5~1 mm)的白云石和方解石, 被褐色伊利石等黏土矿物胶结; II类呈斑点状, 矿物颗粒主要为巨晶结构(1~3 mm)的方解石和白云石, 重结晶现象明显, 被黑色泥质和有机质胶结。通过手标本观察、镜下鉴定和综合分析, 将I类蚀变围岩定名为弱大理岩化粗晶泥质白云岩, II类蚀变围岩定名为去白云石化巨晶灰岩。两类蚀变围岩的主量元素特征相比, I类中SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O含量较高。微量元素特征显示两类蚀变围岩中主要矿化元素(Zn、Pb)明显富集。稀土元素特征显示, I类中稀土元素含量均高于II类, 其中II类与矿化白云岩稀土元素特征相似。两类蚀变围岩是同一体系系统不同阶段的产物, 构建其成岩作用模式: 弱大理岩化粗晶泥质白云岩(I类)的原岩为钙质泥岩, 高盐度卤水下渗, 在岩性界面处与泥岩和白云岩反应形成泥质白云岩, 沉积稳定后受构造运动影响, 热液流体沿断裂上升, 在有利地段形成泥质白云岩大理岩化(结构上改变); 去白云石化巨晶灰岩(II类)比弱大理岩化粗晶泥质白云岩(I类)蚀变更强烈, 经历矿化、大理岩化作用和去白云石化(结构和成分上改变)而形成。综合分析认为两类蚀变围岩与铅锌矿体在时间、空间、成矿物质和成矿流体等方面都具有密切的成因联系, 提出大理岩化、去白云石化作用对该类矿床成矿与找矿均具有重要的指示意义。

**关键词:** 大理岩化; 去白云石化; 找矿指示意义; 毛坪、会泽铅锌矿床; 滇东北铅锌矿集区

以碳酸盐岩为容矿围岩的后生热液铅锌矿床数量众多, 分布广泛, 是全球重要的铅锌矿类型, 引起诸多地质学者的广泛关注(Leach et al., 1993, 2005, 2010; 黄智龙等, 2001, 2004, 2011; 李文博等, 2004a, 2006; 张长青等, 2005; 韩润生等, 2007, 2010, 2012, 2016, 2019, 2020; 胡瑞忠等, 2007, 2020; 侯增谦等, 2008; 周家喜等, 2012a, 2012b; Zhou Jiayi et al., 2015, 2018a; 毕献武等, 2019)。云南毛坪和会泽超大型铅锌矿床是川滇黔铅锌矿集区内代表性的以碳酸盐岩为容矿围岩的后生热液超大型铅锌矿床, 前人从矿床成因、成矿规律和成矿预测等不同方面进

行了研究(柳贺昌等, 1999; 李文博等, 2004b; Wei Aiyong et al., 2015; 张艳等, 2015, 2016; 韩润生等, 2019; 2020), 认为白云石化、黄铁矿化与铅锌成矿密切相关(胡彬等, 2003; 邹海俊等, 2004; 马更生等, 2006; 郭欣, 2007; 韩润生等, 2007, 2010, 2016; 文德潇等, 2014a; 邱文龙等, 2015; 赵冻等, 2016; 陈随海等, 2016; 李孜腾等, 2017; 任顺利等, 2018; 吴永涛和韩润生, 2018)。近年来, 笔者等关注到该矿集区两处超大型矿床中常见一种麻点状蚀变围岩—俗称“麻石”, 呈不规则状分布于矿(化)体或断裂构造周边, 显示出热液重结晶的特点, 空间上与构造、矿化

注: 本文为国家重点研发计划项目(编号: 2018YFC0603900)、国家自然科学基金资助项目(编号: 41102049)、云南省矿产资源预测评价工程实验室(2010)和云南省地质过程与矿产资源创新团队(2012)项目的成果。

收稿日期: 2021-05-06; 改回日期: 2021-11-23; 网络首发: 2021-12-20; 责任编辑: 章雨旭、赵雪。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.015

作者简介: 谭茂, 女, 1995生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业; Email: 791027590@qq.com。通讯作者: 吴鹏, 男, 1981生, 教授, 主要从事矿产普查与勘探的教学与科研; Email: wupeng8104@163.com。

结伴出现。已有的研究表明,大理岩化作用是达到一定温度的热液与围岩反应的过程。在气液变质作用下,原岩发生重结晶作用形成蚀变岩(陈世悦,2002;杨坤光等,2009;李昌红等,2014),去白云石化是指高Ca/Mg值的流体与白云石反应,白云石被方解石交代,白云石溶解的现象(Evamy,1967;翟永红等,1997;张杰等,2012;李婧娟等,2019)。本文研究认为“麻石”是大理岩化和去白云石化作用的产物,与铅锌矿化有紧密联系,这在前人研究成果中鲜有提及,与前人认为白云石化与铅锌矿化关系密切的观点也有所不同。基于麻点状蚀变围岩与构造—流体—成矿的密切关联,引发出一系列思考:该蚀变围岩的物质组成、成因是什么?与铅锌成矿是否具成因联系?对找矿预测有何指示意义等?

本文以麻点状蚀变围岩(I类、II类)为主要研究对象,通过大比例尺坑道剖面精细测量、岩相分析、电子探针分析、X射线微区衍射分析、主量—微量元素分析,研究其物质组成和组构特征,探讨这类蚀变与铅锌成矿的关系,不仅为深部及外围找矿预测提供依据,而且为区域上同类矿床蚀变与矿化关系的研究提供参考。

## 1 地质概况

滇东北铅锌矿集区是扬子地块西南缘之川—滇—黔多金属成矿域的重要组成部分,展布于南北向小江深断裂、北东向弥勒—师宗深断裂带及北西向紫云—垭都深断裂带所围成的“三角区”内(韩润生等,2012;张艳等,2017;吴永涛等,2018)。毛坪、会泽铅锌矿床位于该矿集区东部,受小江深大断裂和曲靖—昭通隐伏断裂控制。矿区内出露震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系等地层,以灰白色厚层状白云岩与浅灰色厚层状生物碎屑粉晶—细晶灰岩为主。矿区出露的岩浆岩仅见二叠系峨眉山玄武岩(图1b、c)。两个矿床的主矿体分别赋存于上泥盆统宰格组、下石炭统摆佐组,受NE向层间断裂控制。矿石矿物主要有闪锌矿、方铅矿、黄铁矿,脉石矿物主要有白云石、铁白云石、方解石等。矿石结构主要包括粒状结构、交代结构、残余结构、包含结构等;矿石构造主要为块状、网脉状等(韩润生等,2012,2019;王健等,2018)。

## 2 样品及测试分析方法

在坑道、钻孔内采集代表性样品,其中毛坪矿床15件,会泽矿床5件,样品岩性包括两类蚀变围岩、

赋矿地层中的白云岩(未蚀变)、矿化白云岩。通过手标本观察、薄片鉴定、X射线微区衍射分析、电子探针分析、岩石化学全分析、ICP-MS微量元素分析和LA-ICP-MS微量和稀土元素分析等开展相关研究。

X射线微区衍射分析和电子探针分析在中南大学地球科学与信息物理学院完成,X衍射仪型号为Rigaku Rapid II微区衍射仪,测试条件:电压40 kV,电流250 mA,测试范围100  $\mu\text{m}$ ,出射角 $22^\circ$ ,测试时间20 min。电子探针仪器型号为EPMA-1720型(日本岛津公司),测试条件为:加速电压15 kV,电流20 nA,电子束斑直径5  $\mu\text{m}$ ,ZAF3校正,检出限为0.01%,测试数据相对误差小于5%。点分析的测试条件为电压25 kV,电流10~40 mA,束斑直径10  $\mu\text{m}$ 。岩石化学全分析和ICP-MS微量元素分析在西北有色地质研究院测试中心完成。

对两类蚀变围岩中白云石进行原位微量分析,测试在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LA-ICP-MS上完成,所使用的仪器为ArFexcimer laser 193nm激光系统和Agilent 7700x等离子体质谱,用NIST SRM 612作为外标、Ca为归一化元素校正,用BCR2-G监控数据质量,频率为5 Hz,束斑为44  $\mu\text{m}$ 。单次测量时间为60 s,背景测量时间为18 s,每完成15个点的分析就加测一次标样,本次测试数据的相对误差小于10%。

## 3 麻点状蚀变围岩的岩石学特征

麻点状蚀变围岩主要呈透镜状、囊状分布在灰白色粗晶白云岩中,常伴随断裂出现,多位于断裂一侧,产出位置常见星点状、细脉状黄铁矿和铅锌矿,空间上形成麻点状蚀变围岩—构造—矿化三者结伴出现的现象,说明该蚀变围岩是与断裂、矿化关系密切的蚀变体,是构造—流体—蚀变耦合作用的产物(图2)。

由颜色、形态、结构差异,可鉴别出两类蚀变围岩(图3):I类呈团块状或块状分布在粗晶白云岩中,产于断裂旁侧(图3a—c),蚀变围岩内常见星点状黄铁矿,其手标本为浅灰色,矿物颗粒均匀且呈砂糖状,具典型的晶粒结构,矿物颗粒约占70%,灰色黏土胶结物约占30%(图3d);II类主要呈团斑状、脉状、浸染状产于灰白色粗晶白云岩中(图3e—g),旁侧多见块状、脉状方铅矿和闪锌矿、细脉状方解石(图3i—l),均受到断裂的严格控制,其手标本为浅灰至灰黑色,其中浅灰色颗粒(约占75%)呈斑点

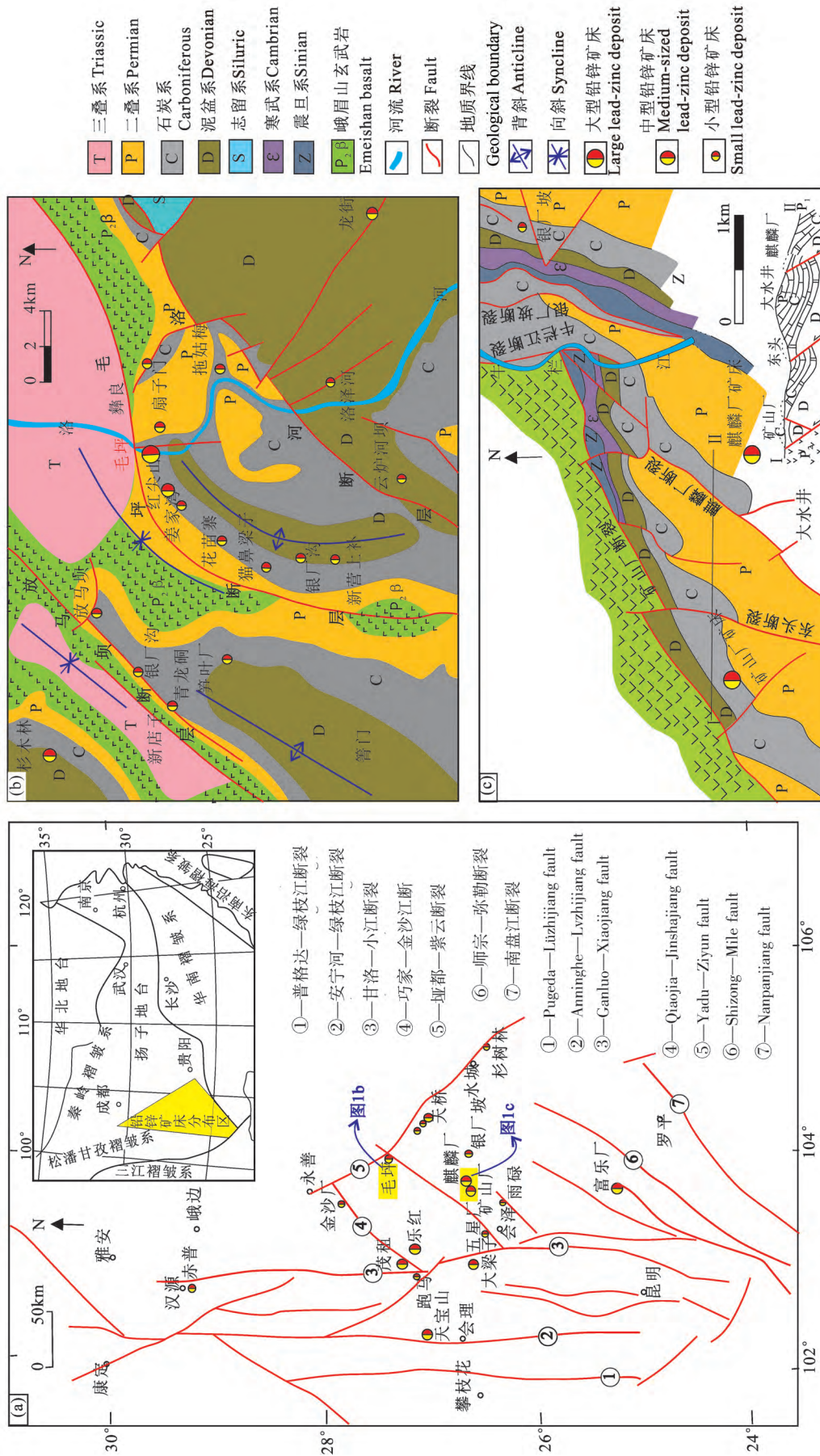


图 1 川滇黔区域地质图 (a); 毛坪铅锌矿矿区地质图 (b) 和会泽铅锌矿矿区地质图 (c) (据林方成, 2005; 韩润生等, 2012; 谈树成等, 2019 修改)  
 Fig. 1 Sichuan—Yunnan—Guizhou regional geological map (a); geological map of Mao ping lead—zinc deposit (b) and Huize lead—zinc deposit (c)  
 (modified from Lin Fangcheng, 2005; Han Runsheng et al., 2012; Tan Shucheng et al., 2019)

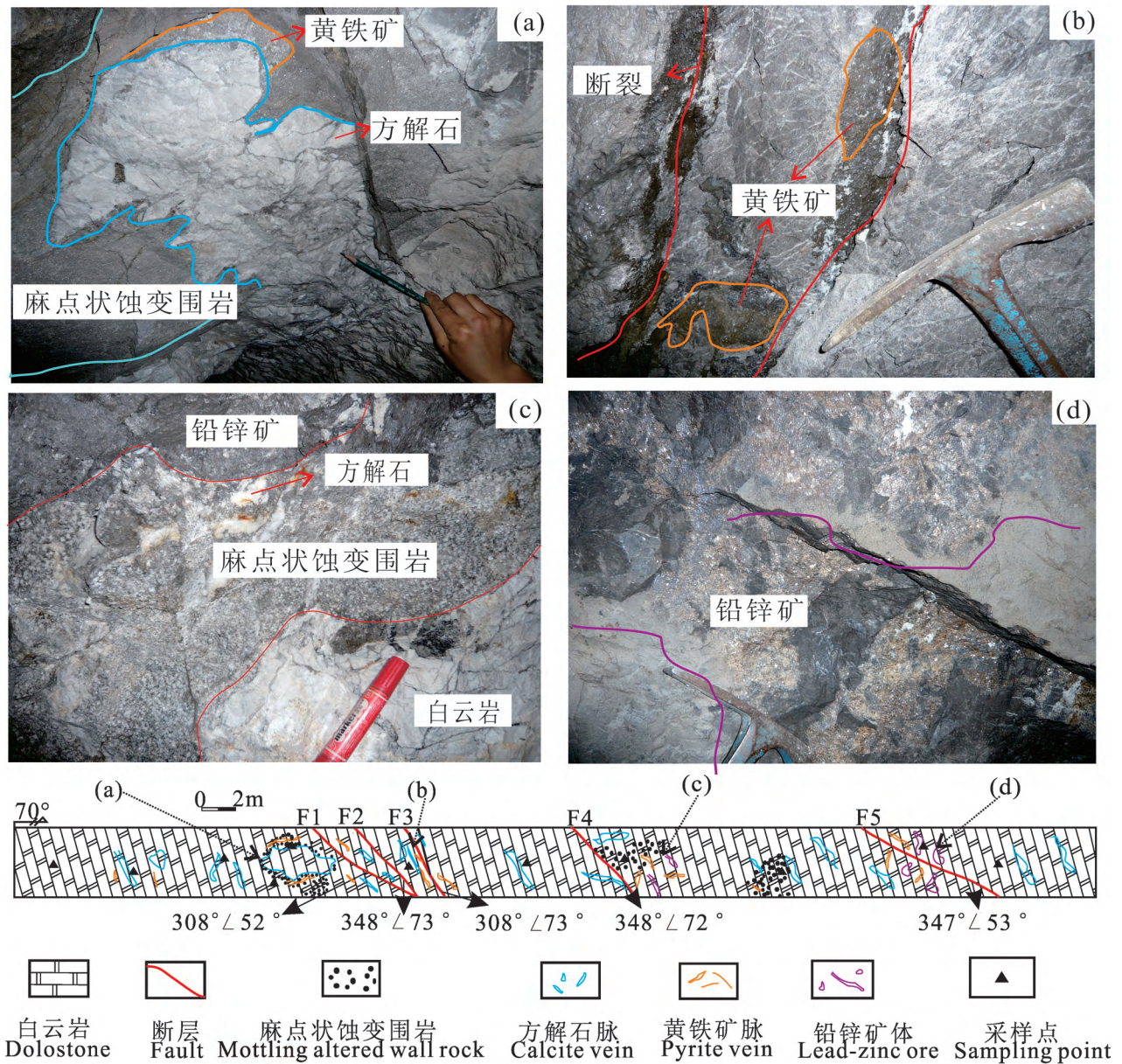


图2 滇东北毛坪铅锌矿床670m平巷实测剖面图

Fig. 2 Measured profile of 670 m drift in Maoping lead—zinc deposit, northeastern Yunnan

状,被黑色炭质、泥质(约占25%)胶结(图3h),黑色炭质胶结物污手。

钻孔中与麻点状蚀变围岩相关的岩性段具有如下变化:碎裂白云岩(断裂)→两类蚀变围岩→大理岩化白云岩→大理岩→碎裂白云岩(断裂)→大理岩化白云岩→炭质、泥质灰岩→灰白色白云岩(图4),从中可以看出两类蚀变围岩与断裂、铅锌矿化在空间上关系密切,大理岩的出现反映出强的热液蚀变作用,可能与成矿流体作用有关。

I类蚀变围岩与II类蚀变围岩相比,II类蚀变

更强烈,矿物颗粒更大,普遍见黄铁矿化,与铅锌矿化(体)更为密切。

## 4 矿物学特征

### 4.1 镜下特征

经过重结晶作用的碳酸盐岩,常具有晶粒结构,晶粒大小分为巨晶(>2 mm)、粗晶(2~0.5 mm)、中晶(0.5~0.25 mm)和细晶(0.25~0.005 mm)(杨坤光等,2009)。镜下观察见I类蚀变围岩中主要为白云石(约60%)、伊利石等黏土矿物(约30%)和方

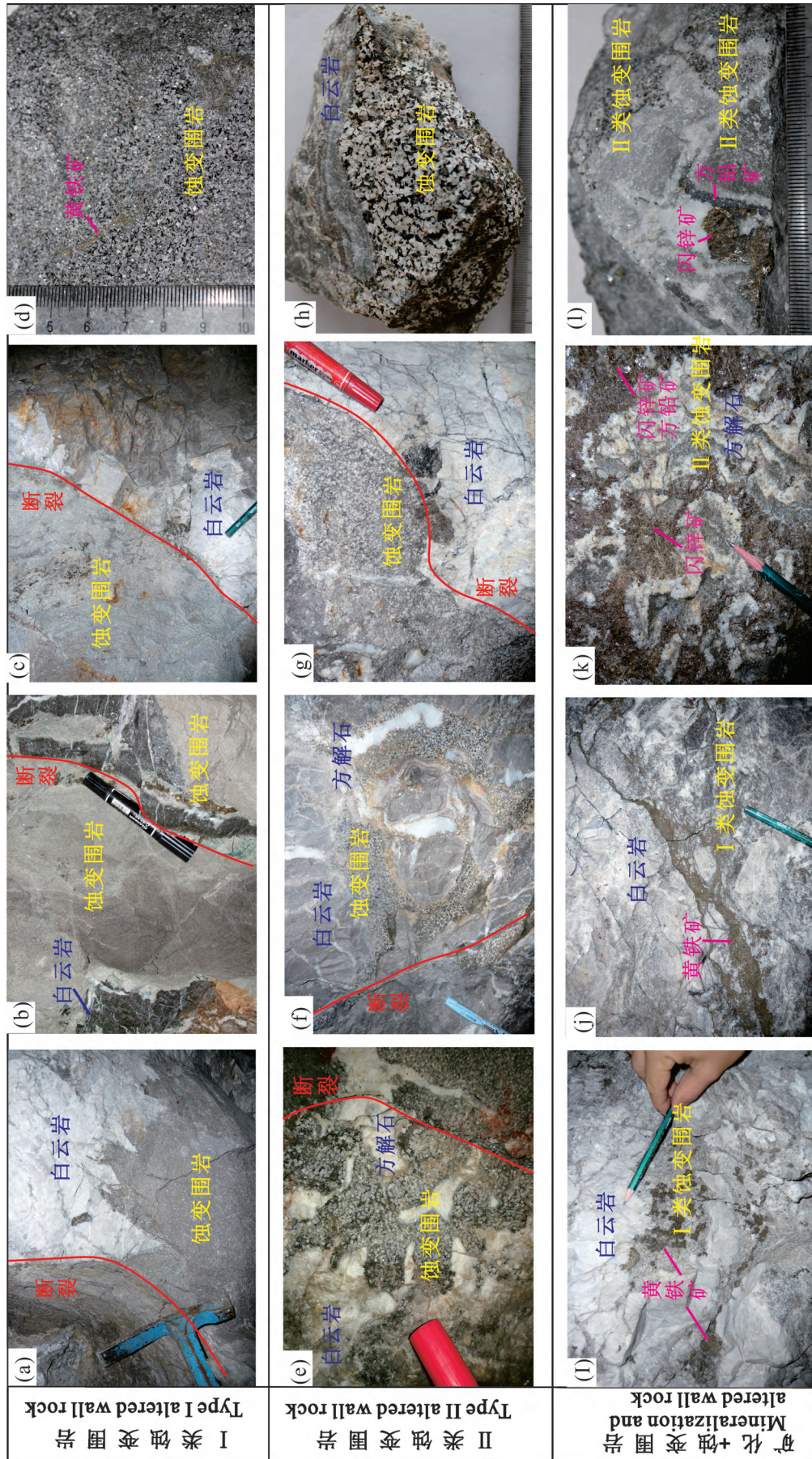


图3 毛坪、会泽铅锌矿床两类蚀变围岩手标本照片: (a) — (c) 坑道内I类蚀变围岩照片; (d) — (g) 坑道内II类蚀变围岩照片; (h) II类蚀变围岩手标本照片 (h) II类蚀变围岩手标本照片; (i) — (k) 坑道内矿化+蚀变围岩照片; (l) 矿化围岩手标本照片

Fig. 3 Hand specimens photos of altered wall rock from Maoping and Huize lead-zinc deposits: (a) — (c) Photo of the type I altered wall rock in a tunnel; (d) — (g) photographs of the type II altered wall rock in a tunnel; (h) — (k) photo of the type II altered wall rock in a tunnel; (l) photograph of mineralized surrounding rock wall rock hand specimen; (i) — (k) photo of mineralization and altered wall rock in a tunnel; (l) photograph of mineralized surrounding rock

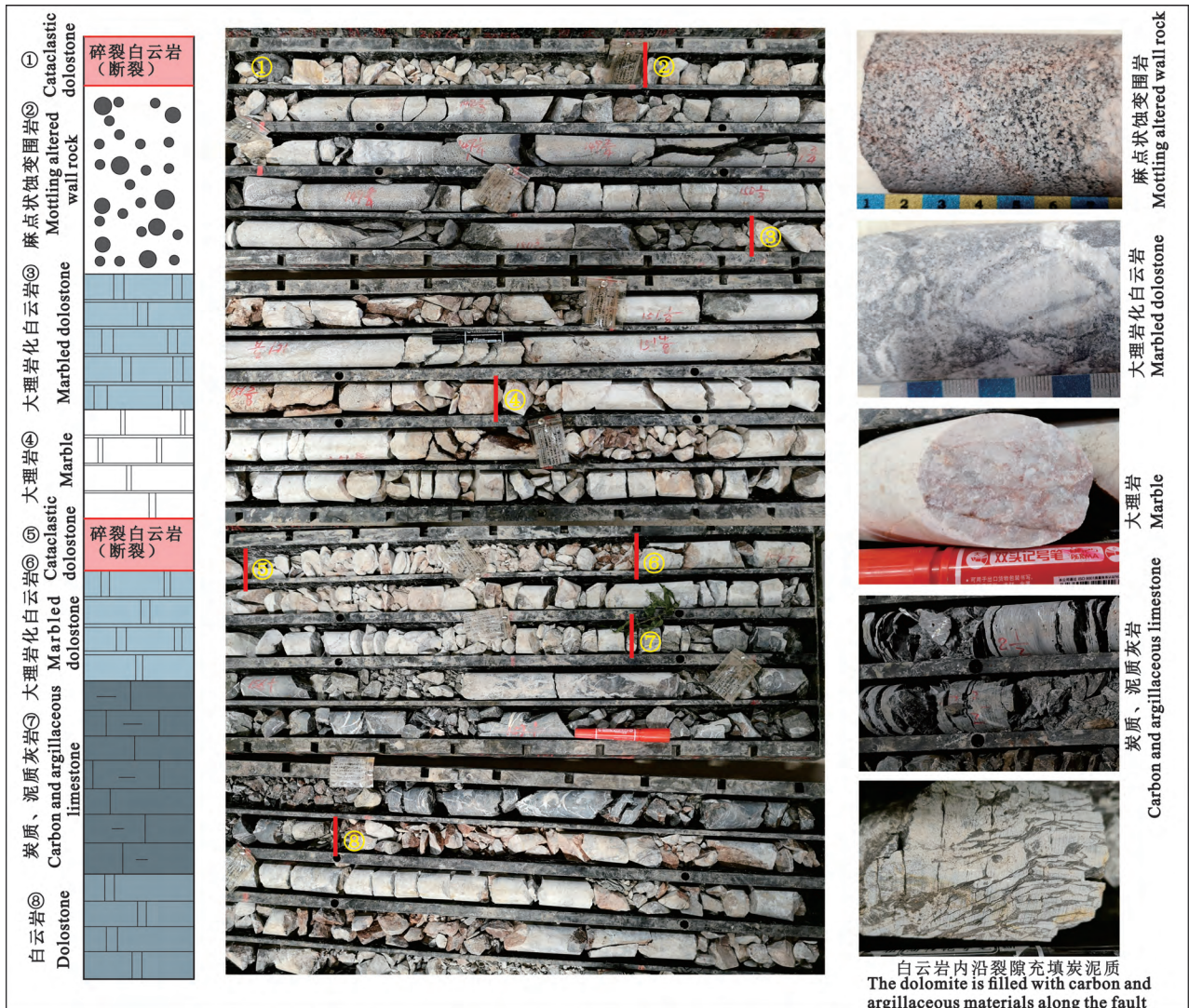


图4 滇东北毛坪铅锌矿床 ZK II 9-1 钻孔岩芯柱状图

Fig. 4 Core histogram of the ZK II 9-1 borehole in Maoping lead—zinc deposit, northeastern Yunnan

解石(约 10%), 矿物颗粒介于 0.5~1 mm 之间, 为粗晶结构, 单偏光下部分白云石晶体见雾心亮边结构(图 5a), 胶结物为褐色, 其矿物成分主要为黏土物质(图 5b、c); II 类蚀变围岩由大量的方解石(约 80%)、少量白云石(约 10%)和伊利石等黏土矿物(约 10%)组成, 矿物颗粒粗大, 介于 1~3 mm 之间, 为巨晶结构, 且方解石呈白云石晶形或呈菱面体晶形, 矿物缝隙充填黑色炭、泥质物质(图 5d)。薄片经过茜素红染色以区分白云石和方解石(Dickson, 1965), 部分白云石边部被染红, 反映白云石经去 Mg 作用, 边缘已蚀变为方解石, 从颗粒边部向中心具去白云石化作用(图 5e), 矿物颗粒间空隙充填的有机质呈灰褐色, 在反射光下见有机质空隙间的星点状黄铁矿(图 5f)。

#### 4.2 电子探针和 X 衍射分析结果

通过电子探针分析, I 类蚀变围岩中主要矿物为白云石、铁白云石和方解石, 另见少量黄铁矿、石英。其中黄铁矿呈半自形—自形粒状结构, 石英呈椭球状, 大小为 5~10  $\mu\text{m}$ , 磨圆程度高(图 6a—c)。II 类蚀变围岩中主要矿物为白云石、方解石、黄铁矿和闪锌矿(图 6d—f)。相比赋矿地层中的灰岩、白云岩, 两类蚀变围岩中的矿物粒径均显著增大, 呈粒状变晶结构, 为热液重结晶现象, 具大理岩化特征。灰岩、白云岩因热液重结晶作用, 表现为大理岩化蚀变围岩。

I 类蚀变围岩中的胶结物在显微镜透射光下呈半透明(图 5a), 通过 X 衍射微区分析(图 7a), 其中主要组成为伊利石, 特征衍射峰  $d$  值为 3.3376、

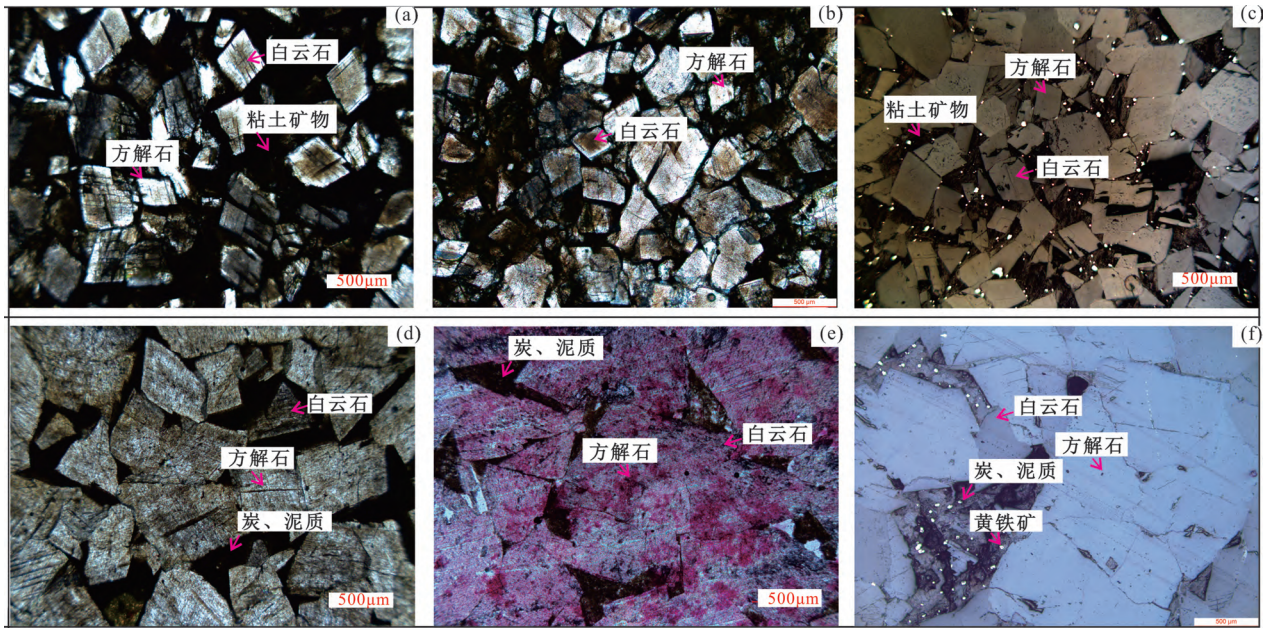


图 5 滇东北毛坪和会泽超大型铅锌矿床两类蚀变围岩电子显微镜照片: (a)、(b)—I 类蚀变围岩单偏光镜下照片; (c) I 类蚀变围岩反射光镜下照片; (d) II 类蚀变围岩单偏光镜下照片; (e) II 类蚀变围岩, 茜素红染色, 单偏光镜下照片; (f) II 类蚀变围岩反射光镜下照片

Fig. 5 Electron microscope photos of two types of altered wall rocks of Maoping and Huize super-large lead—zinc deposits in Northeast Yunnan: (a), (b) Photos of the type-I altered wall rocks under a single polarizer; (c) photographs of the type-I altered wall rocks under reflection light microscope; (d) photographs of the type-II altered wall rocks under a single polarizer; (e) the type-II altered wall rock, alizarin red staining, and photo under single polarizer; (f) photographs of the type-II altered wall rocks under reflection light microscope

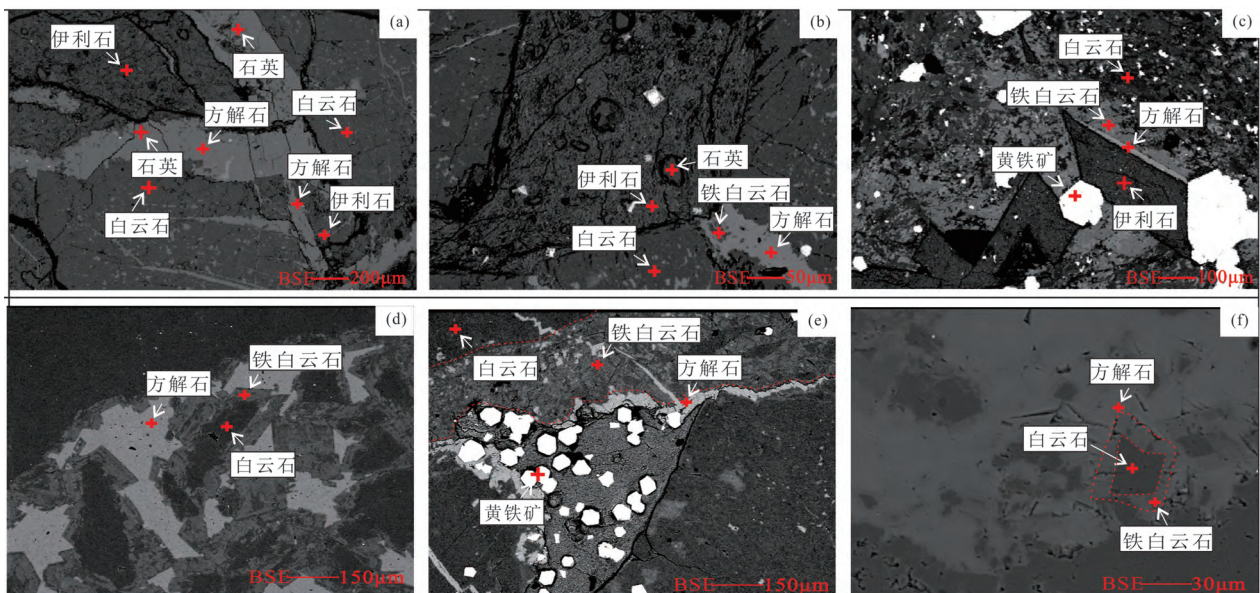


图 6 滇东北毛坪和会泽超大型铅锌矿床两类蚀变围岩电子探针背散射图像: (a)—(c) I 类蚀变围岩中矿物组成; (d)—(f) II 类蚀变围岩中矿物组成

Fig. 6 Electron probe backscattering images of two kinds of altered wall rock of Maoping and Huize super-large lead—zinc deposits in Northeast Yunnan: (a)—(c)—Mineral composition in the type-I altered wall rocks; (d)—(f)—mineral composition in the type-II altered wall rocks

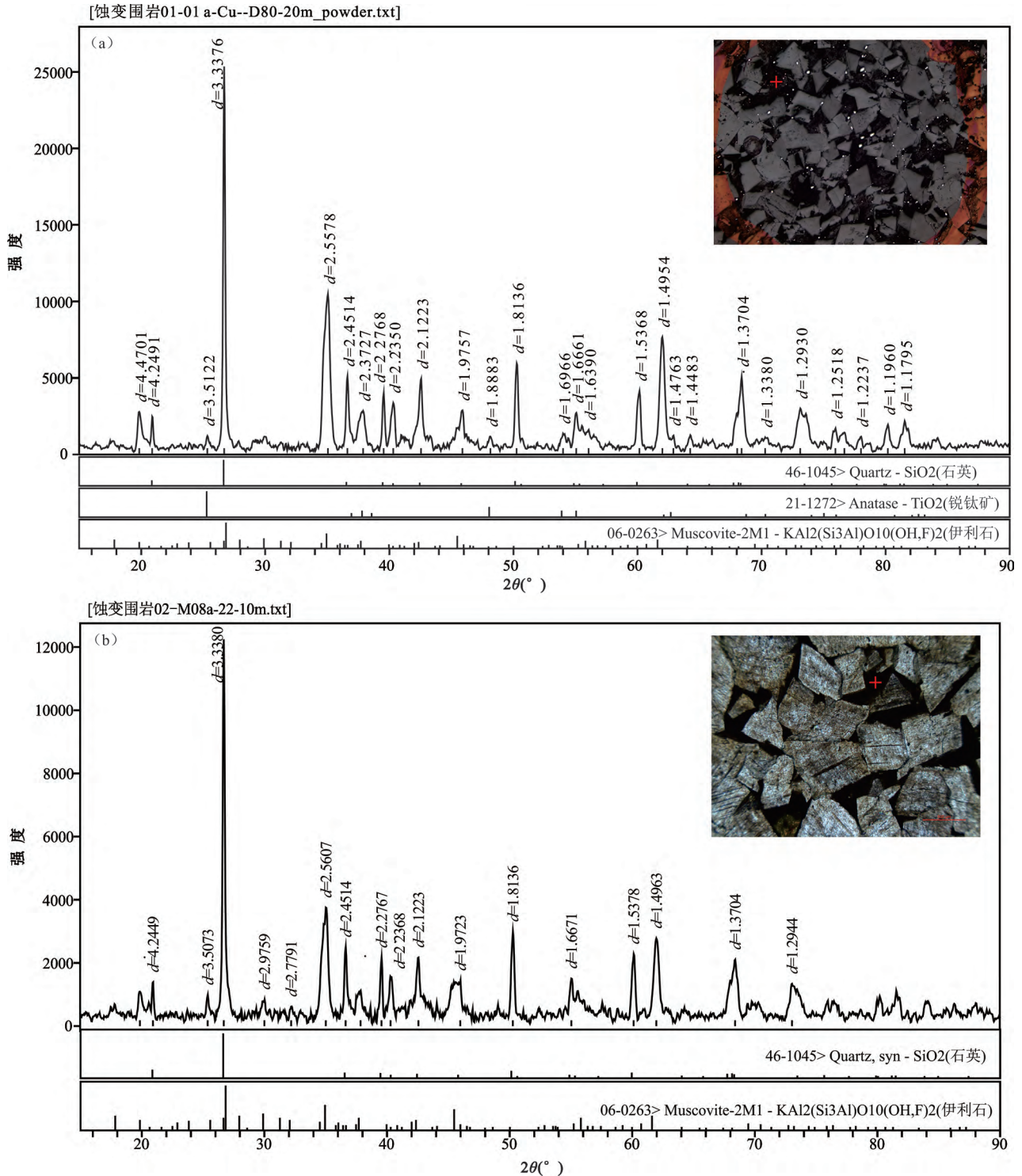


图7 滇东北毛坪和会泽超大型铅锌矿床两类蚀变围岩 X 射线微区分析图谱

Fig. 7 X-ray microanalysis map of two kinds of altered wall rock of Maoping and Huize super-large lead—zinc deposits in Northeast Yunnan

2.5578、1.8136、1.4954,另见少量石英和锐钛矿,指示其陆源碎屑特征;手标本中见Ⅱ类蚀变围岩胶结物由黑色炭、泥质组成,X衍射微区分析(图7b)得

其泥质物质为伊利石和石英,特征衍射峰  $d$  值为 3.3380、2.5607、1.8136、1.4963。

此外,靠近方铅矿、闪锌矿的白云石边缘常见浅



色“环带”,电子探针分析,从白云石中心至边缘,依次为白云石—→铁白云石—→方解石(图 6d—f),即白云石边缘溶解,被方解石交代,反映流体作用过程中白云石失去了 Mg,显示近矿蚀变围岩具去白云石化作用,与镜下特征一致。

矿山地质工作中俗称的“麻石”,常作为重要、直接的找矿标志,但未进行科学定名,通过以上手标本观察、镜下鉴定和综合分析,为区别于赋矿地层中的白云岩、灰岩(未蚀变),突出热液蚀变作用,将 I 类蚀变围岩定名为弱大理岩化粗晶泥质白云岩(砂糖状),II 类蚀变围岩定名为去白云石化巨晶灰岩(斑点状)。

## 5 岩石地球化学测试结果

### 5.1 主量元素

两类蚀变围岩、白云岩、矿化白云岩主量元素含量见表 1。

从表 1 中可以看出,弱大理岩化粗晶泥质白云岩(I 类)主要化学成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ ;去白云石化巨晶灰岩(II 类)主要化学成分以  $\text{CaO}$  为主,其次为  $\text{MgO}$ ,两类蚀变围岩主要化学成分存在差异,指示二者可能经历了不同的蚀变作用而形成的;白云岩和矿化白云岩的主要化学成分为  $\text{CaO}$  和  $\text{MgO}$ 。不同岩石主量元素特征差异较大,主要表现为:①  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  的含量特征:I 类蚀

变围岩中最高,而 II 类蚀变围岩、白云岩和矿化白云岩中整体偏低,与前文 I 类中出现伊利石、石英、黄铁矿等矿物特征一致;②  $\text{CaO}$  的含量特征:II 类蚀变围岩>白云岩和矿化白云岩>I 类蚀变围岩,与前文 II 类中出现大量方解石相对应;③  $\text{MgO}$  的含量特征:白云岩和矿化白云岩>I 类蚀变围岩>II 类蚀变围岩。通过绘制  $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  关系图发现,II 类蚀变围岩与矿化白云岩相似,反映出与矿化有一定的联系(图 8)。

### 5.2 微量元素和稀土元素

两类蚀变围岩、白云岩和矿化白云岩的微量、稀土元素含量见表 2,两类蚀变围岩中的白云石 LA-ICP-MS 微量、稀土元素见表 3。

表 2 可以看出,I 类蚀变围岩和 II 类蚀变围岩中 V、Cs、Sc、Ni、Ga、Rb、In、Bi 的含量区别较大,推测与蚀变类型、程度的差异有关。Zn、Pb 作为该区主要矿化元素,在 I 类和 II 类中明显富集。从两类蚀变围岩中白云石 LA-ICP-MS 微量元素看出(表 3),I 类蚀变围岩中白云石的 Mn、Fe、Cs、Co、Ni、Zn、Cd 元素含量明显低于 II 类蚀变围岩中的白云石;I 类中白云石的 V、Sc、Cr、Cu、Ga、Sr、In 元素含量高于 II 类中的白云石。此外,I 类蚀变围岩的  $\Sigma\text{REE}$  含量为  $134.53 \times 10^{-6} \sim 371.61 \times 10^{-6}$ 、LREE 含量为  $123.89 \times 10^{-6} \sim 359 \times 10^{-6}$ 、HREE 含量为  $10.64 \times 10^{-6} \sim 14.59 \times 10^{-6}$ 、LREE/HREE 含量为  $10.43 \sim$

表 1 毛坪、会泽铅锌矿床不同岩石的主量元素含量(%)

Table 1 Major element content of different rocks in Maoping and Huize lead—zinc deposits (%)

样品		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{TFe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MnO}$	$\text{TiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	烧失
弱大理岩化粗晶泥质白云岩(I 类)	I-1	26.79	16.64	11.86	7.52	0.40	5.37	8.94	0.18	0.03	0.81	0.04	21.52
	I-2	27.46	16.59	13.50	3.91	0.18	5.35	9.50	0.67	0.01	0.98	0.06	22.68
	I-3	17.25	10.96	21.96	3.21	0.26	3.55	11.30	0.31	0.03	0.64	0.02	31.09
去白云石化巨晶灰岩(II 类)	II-1	2.01	1.23	50.93	0.41	0.13	0.26	2.30	0.92	0.01	0.07	0.02	41.66
	II-2	0.13	0.25	54.78	0.31	0.26	0.02	1.69	0.02	0.01	0.01	0.01	43.02
	II-3	0.47	0.16	54.86	0.43	0.19	0.05	1.09	0.10	0.01	0.01	0.01	43.01
	II-4	0.64	0.25	54.34	0.15	0.12	0.08	0.79	0.07	0.01	0.02	0.01	43.05
白云岩	yb-1	6.68	4.72	32.76	2.95	0.37	1.39	12.75	0.02	0.03	0.16	0.02	38.69
	yb-2	2.79	1.74	29.78	6.33	0.45	0.43	16.89	0.05	0.01	0.07	0.01	41.46
	yb-3	0.52	0.57	33.57	0.47	0.16	0.09	19.85	0.02	0.01	0.02	0.01	44.89
	yb-4	1.05	0.59	31.81	0.86	0.32	0.17	19.68	0.58	0.04	0.06	0.01	45.21
	yb-5	0.15	0.26	31.14	0.40	0.32	0.01	21.80	0.10	0.01	0.01	0.01	46.04
	yb-6	4.36	2.88	29.47	1.30	0.24	0.84	18.07	0.02	0.01	0.10	0.01	43.04
	yb-7	5.20	2.96	32.68	0.81	0.48	0.76	17.01	0.02	0.01	0.12	0.02	40.40
矿化白云岩	kb-1	2.10	0.10	30.42	16.96	1.22	0.02	12.49	0.20	0.57	0.03	0.01	35.79
	kb-2	0.04	0.25	31.94	7.18	2.03	0.02	14.72	3.55	0.66	0.01	0.01	41.29
	kb-3	1.01	0.39	37.57	19.94	1.54	0.06	6.76	0.01	0.21	0.02	0.01	21.02

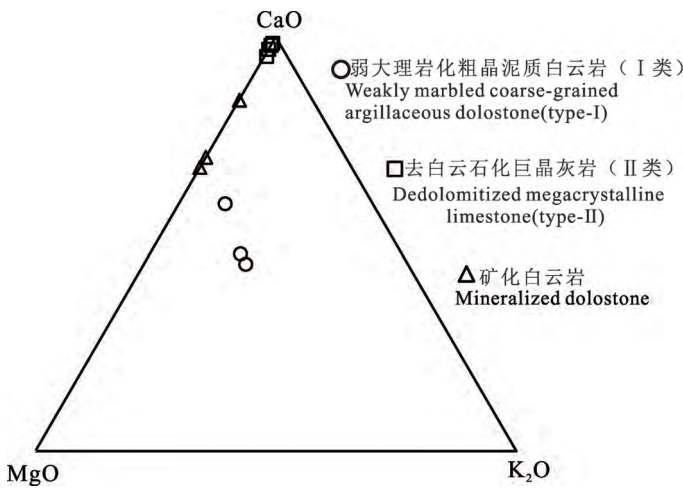


图8 滇东北毛坪和会泽超大型铅锌矿床两类蚀变围岩与矿化白云岩 CaO、MgO、K<sub>2</sub>O 关系图

Fig. 8 Diagram of the relationship between two kinds of altered wall rock and mineralized dolostone CaO, MgO and K<sub>2</sub>O in Maoping and Huize super-large lead—zinc deposits in Northeast Yunnan

28.48、La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 含量为 7.83~20.21；II类蚀变围岩的ΣREE 含量为 2.62×10<sup>-6</sup>~15.49×10<sup>-6</sup>、LREE 含量为 1.82×10<sup>-6</sup>~13.73×10<sup>-6</sup>、HREE 含量为 0.8×10<sup>-6</sup>~1.76×10<sup>-6</sup>、LREE/HREE 含量为 2.27~7.79、La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> 含量为 3.75~19.14，其中II类蚀变围岩稀土元素含量与矿化白云岩类似。表2、表3可以看出，两类蚀变围岩的全岩稀土数据和白云石 LA-ICP-MS 稀土数据表现的特征一致。两类蚀变围岩中白云石的稀土元素含量差异较大(图9)，I类蚀变围岩中稀土元素含量均高于II类蚀变围岩，这些区别可能反映二者蚀变程度差异。

## 6 讨论

### 6.1 麻点状蚀变围岩成岩作用模式

钻孔揭露麻点状蚀变围岩所处岩性段在垂向上的变化特征表明，化学活动性的气体和热液与岩石进行反应，在热接触变质过程中，原岩会发生重结晶作用，温度越高，流体含量越充分，

原岩成分越单一，越有利于重结晶的进行，发生大理岩化作用，在结构上发生变化(杨坤光等，2009)。白云石被方解石交代，白云石溶解的过程为去白云石化作用，在矿物成分上发生变化(图10)。

弱大理岩化粗晶泥质白云岩(I类)中含有磨圆度较高的石英碎屑、锐钛矿以及大量的黏土物质，与主量元素高 Al、K、Si 等特征一致，指示其原岩为钙质泥岩，是抬升陆源剥蚀搬运沉淀的产物。富含石英碎屑、锐钛矿、锆石等的钙质泥岩，沉积在下伏碳酸盐岩之上，形成泥岩和碳酸盐岩的喀斯特岩性界面。滇东北地区泥质的碳酸盐沉积台地经过抬升，局部隆起，在海拔较低处形成高盐度的潟湖，高盐度的卤水、海水(图10a)从地表往下渗，在岩性界面处与钙质泥岩和白云岩反应形成泥质白云岩。泥质白云岩沉积稳定后发生构造运动，热液流体沿断裂上升，泥岩成为阻挡层，较高温的热液在岩性界面处引起泥质白云岩发生弱大理岩化作用，矿物重结晶，结构上发生变化，形成颗粒均一的(≥1 mm)粗晶泥

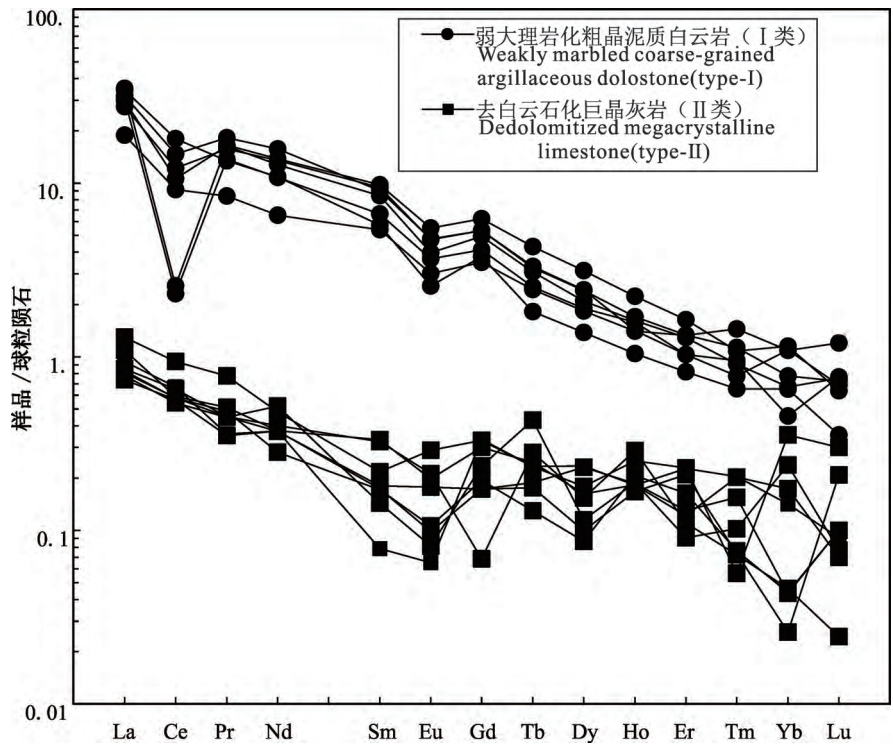


图9 弱大理岩化粗晶泥质白云岩(I类)和去白云石化巨晶灰岩(II类)中白云石 LA-ICP-MS 稀土元素球粒云石标准化分布型式图(标准化值据 Boynton, 1984)

Fig. 9 Standardized distribution pattern of LA-ICP-MS rare earth element spherulite dolomite in weakly marbled coarse-grained argillaceous dolostone (type-I) and dedolomitized megacrystalline limestone (type-II) (according to Boynton, 1984)

质白云岩,在断裂处形成弱大理岩化粗晶泥质白云岩(I类,图 10b)。岩性界面可作为流体通道,并且砂糖状白云岩通常具有优良的孔渗物性参数(李明

隆等,2020),为硫化物沉淀提供有利空间,最终在矿物颗粒空隙间沉淀。

张振亮(2006)通过水/岩相互作用的实验模

表 2 滇东北毛坪、会泽铅锌矿床不同岩石的微量元素含量( $\times 10^{-6}$ )及相关参数值

Table 2 Trace element content ( $\times 10^{-6}$ ) and related parameters of different rocks in Maoping and Huize lead—zinc deposits in northeastern Yunnan

岩性	弱大理岩化粗晶泥质白云岩(I类)			去白云石化巨晶灰岩(II类)				白云岩							矿化白云岩		
	I-1	I-2	I-3	II-1	II-2	II-3	II-4	yb-1	yb-2	yb-3	yb-4	yb-5	yb-6	yb-7	kb-1	kb-2	kb-3
V	71.00	76.00	36.00	8.00	26.00	40.64	8.28	89.00	37.00	10.00	10.00	5.60	39.00	15.00	35.00	10.00	5.00
Cs	13.00	9.00	4.90	0.90	0.10	0.10	0.45	3.70	1.40	1.00	1.00	0.10	1.90	2.20	1.00	1.00	0.10
Sc	13.00	8.40	11.00	1.25	1.15	9.91	0.50	13.00	2.30	1.00	5.00	1.00	2.20	2.41	1.00	1.00	0.14
Cr	80.00	88.00	15.00	51.66	55.03	7.04	8.36	53.00	44.00	50.00	16.00	39.19	72.00	40.38	16.00	43.00	40.49
Co	12.00	10.00	6.00	5.00	5.00	7.93	1.70	16.00	5.00	8.40	5.00	5.00	4.10	5.00	8.00	2.40	5.00
Ni	37.00	36.00	12.00	10.16	8.55	17.74	15.41	14.00	21.51	7.80	16.00	9.64	13.00	11.52	15.00	6.60	8.30
Cu	20.00	29.00	10.00	5.98	9.36	9.97	3.84	51.00	13.04	66.00	5.00	6.51	20.00	6.76	25.00	20.00	39.68
Zn	219.00	27.00	2100	15.00	52.21	102.40	14.71	204.00	80.21	25.00	66.00	151.20	74.00	15.00	516.00	833.00	74500
Ga	18.00	17.00	13.00	2.00	2.00	2.00	1.05	6.10	2.41	1.00	2.00	2.00	4.00	3.56	2.00	1.00	2.00
Ge	0.60	0.30	0.90	0.15	0.93	0.10	0.10	0.20	0.78	0.10	0.60	0.23	0.10	0.21	0.70	7.20	9.02
Rb	139.00	107.00	61.00	8.30	0.60	3.27	2.99	39.00	14.00	2.30	5.70	0.50	19.00	20.00	2.00	2.30	0.90
Ag	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	14.00	12.00	48.00
Cd	0.08	0.13	4.40	0.21	0.06	0.68	0.40	0.32	0.79	0.13	0.17	0.60	0.18	0.18	2.90	3.00	79.50
In	0.07	0.06	0.08	0.04	0.04	0.01	0.02	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06	0.09
Bi	0.70	0.30	0.30	0.10	0.10	0.53	0.12	0.20	0.10	0.30	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Tl	1.70	0.60	0.60	0.11	0.10	0.10	0.10	0.50	0.42	0.10	0.10	0.10	0.20	0.15	0.10	0.10	0.09
Pb	31.00	33.00	502.00	9.75	13.51	57.65	6.12	401.00	21.53	12.00	60.00	10.00	26.00	10.00	6700	310.0	31800
As	34.00	10.00	24.00	1.80	5.00	8.40	1.00	48.00	87.00	1.00	19.00	2.60	2.80	2.30	607.00	135.00	629.00
Sb	2.90	1.90	2.10	0.20	0.40	2.40	0.18	28.00	10.00	0.60	1.20	0.60	0.80	0.20	24.00	8.00	32.00
La	35.98	78.07	26.73	2.48	0.52	4.33	2.57	8.50	5.03	2.85	1.20	0.38	6.29	3.19	1.00	2.56	0.50
Ce	77.11	199.82	64.44	3.82	0.66	4.22	5.23	14.07	7.43	3.35	3.14	0.63	9.51	6.01	1.31	1.64	0.81
Pr	8.01	17.52	6.70	0.45	0.15	1.07	0.77	2.06	1.14	0.88	0.44	0.13	1.74	0.71	0.24	0.77	0.13
Nd	27.10	59.08	23.07	1.64	0.33	3.47	2.84	6.14	4.11	2.06	1.14	0.34	5.23	2.69	1.05	1.09	0.40
Sm	3.44	3.87	2.55	0.30	0.06	0.50	0.48	0.76	0.75	0.30	0.18	0.06	0.78	0.41	0.32	0.14	0.08
Eu	0.55	0.65	0.40	0.09	0.10	0.14	0.13	0.13	0.25	0.10	0.07	0.10	0.15	0.10	0.06	0.10	0.10
Gd	3.18	3.78	2.20	0.25	0.10	0.66	0.48	0.74	0.69	0.29	0.18	0.07	0.75	0.41	0.31	0.20	0.10
Tb	0.56	0.38	0.40	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.13	0.07	0.10	0.10	0.10
Dy	3.40	2.22	2.56	0.29	0.10	0.34	0.33	0.68	0.54	0.31	0.22	0.08	0.68	0.45	0.20	0.16	0.10
Ho	0.76	0.52	0.56	0.06	0.10	0.10	0.10	0.16	0.11	0.10	0.10	0.10	0.13	0.08	0.10	0.10	0.10
Er	2.51	2.14	1.90	0.19	0.10	0.20	0.18	0.49	0.31	0.18	0.16	0.06	0.50	0.27	0.09	0.10	0.07
Tm	0.40	0.35	0.33	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Yb	3.30	2.77	2.30	0.19	0.10	0.16	0.15	0.57	0.34	0.18	0.10	0.05	0.49	0.28	0.10	0.10	0.07
Lu	0.49	0.44	0.39	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Y	16.48	10.67	13.74	1.71	0.56	2.22	3.47	3.92	3.36	1.54	1.20	0.77	3.78	2.27	1.36	1.08	0.55
$\Sigma$ REE	166.77	371.61	134.53	10.05	2.62	15.49	13.56	34.63	20.95	10.89	7.23	2.29	26.59	14.86	5.07	7.25	2.76
LREE	152.19	359.00	123.89	8.77	1.82	13.73	12.02	31.67	18.72	9.54	6.17	1.63	23.71	13.10	3.98	6.30	2.02
HREE	14.59	12.60	10.64	1.28	0.80	1.76	1.54	2.96	2.24	1.36	1.06	0.67	2.88	1.76	1.09	0.95	0.74
$\frac{LREE}{HREE}$	10.43	28.48	11.64	6.84	2.27	7.79	7.82	10.68	8.36	7.04	5.84	2.44	8.23	7.42	3.63	6.61	2.73
$La_N/Yb_N$	7.83	20.21	8.35	9.14	3.75	19.14	12.69	10.63	10.66	11.36	8.60	5.28	9.27	8.14	7.17	18.34	5.11
$\delta Eu$	0.50	0.51	0.51	0.96	3.96	0.72	0.84	0.54	1.06	1.03	1.20	4.77	0.58	0.71	0.57	1.87	3.38
$\delta Ce$	1.07	1.27	1.15	0.82	0.57	0.47	0.90	0.80	0.73	0.51	1.06	0.69	0.69	0.94	0.64	0.28	0.75

拟,认为白云岩的元素活化能力更高,碳酸盐矿物的分解可以释放出部分元素,白云石的分解促使更多稀土元素从白云石中迁移出来,蚀变作用越强,其迁移的量越多,因而在白云石中残留的稀土元素越少,这与前文去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)中的白云石稀土元素含量明显高于弱大理岩化粗晶泥质白云岩

(Ⅰ类)的特征一致。此外,去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)中含有有机质、大量方解石、少量白云石和黏土物质,与Ⅰ类蚀变围岩比较,方解石增多,方解石呈菱面体结构,白云石减少,矿物颗粒重结晶现象明显,其结构和成分上均发生改变,暗示Ⅱ类比Ⅰ类蚀变更强烈。弱大理岩化粗晶泥质白云岩沉积稳定

表3 滇东北毛坪、会泽铅锌矿床两类蚀变围岩中白云石 LA-ICP-MS 微量元素含量( $\times 10^{-6}$ )及相关参数值

Table 3 LA-ICP-MS trace element contents( $\times 10^{-6}$ ) and related parameters of the two kinds of altered wall rock of dolomite in Maoping and Huize lead—zinc deposits in northeastern Yunnan

样品 编号	弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)中白云石							去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)中白云石							
	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	I-7	II-1	II-2	II-3	II-4	II-5	II-6	II-7	II-8
Mn	38.41	130.1	29.68	163.7	106.4	189.9	89.53	100.5	102.5	96.93	125.1	122.9	127.9	101.9	80.06
Fe	488.2	335.6	347.3	487	1341	1254	1221	1075	1175	1120	1264	1253	1000	1201	1059
V	0.423	0.436	0.413	8.794	0.403	0.369	0.484	1.153	1.289	1.286	1.002	1.234	0.855	1.486	0.959
Cs	0.015	0.03	0.003	0.066	0.044	0.039	0.037	0.02	0.024	0.027	0.03	0.03	0.046	0.023	0.023
Sc	1.083	2.582	1.13	44.55	1.108	1.176	2.698	1.167	0.859	1.39	0.699	1.141	0.724	1.337	0.834
Cr	8.39	2.588	14.29	55.31	11.54	13.49	6.051	6.672	9.637	4.221	6.915	13.07	4.398	6.936	4.128
Co	0.106	0.091	0.092	0.078	0.153	0.127	0.087	0.176	0.224	0.208	0.171	0.142	0.134	0.154	0.168
Ni	1.975	1.744	2.082	1.074	0.408	0.275	0.044	1.047	1.423	0.938	0.947	1.037	1.406	1.179	1.085
Cu	1.163	0.891	0.817	0.682	0.023	0.184	0.137	-	0.008	0	0.143	0.088	-	-	0.259
Zn	5.148	6.883	5.049	5.77	2.329	3.216	5.19	2.633	8.696	4.586	6.106	4.364	3.22	9.079	5.754
Ga	0.081	0.021	0.099	0.151	0.068	0.057	0.111	0	0.019	0.071	0.029	0.033	0.046	0.016	0.006
Rb	0.095	0.105	0.044	0.457	0.179	0.128	0.026	0.072	0.134	0.179	0.11	0.077	0.18	0.122	0.044
Sr	91.75	120.8	76.303	70.436	49.88	45.39	48.01	19.97	16.61	16.89	22.16	19.38	25.88	16.58	16.56
Cd	0.183	0.189	0.187	0.094	-	0.088	0.042	-	-	0.078	-	0.041	-	0.127	0.14
In	0.053	0.014	0.013	0.012	0.037	0.01	-	0.015	0.003	-	0.004	0.018	0.007	-	-
La	8.329	7.232	8.140	4.467	7.542	6.534	7.045	0.184	0.257	0.307	0.197	0.192	0.202	0.174	0.223
Ce	1.571	1.411	11.011	5.608	8.996	7.465	6.478	0.332	0.361	0.574	0.354	0.355	0.399	0.346	0.410
Pr	1.570	1.303	1.275	0.801	1.731	1.495	1.553	0.043	0.048	0.074	0.046	0.043	0.043	0.033	0.034
Nd	6.446	5.040	5.072	3.044	7.357	6.303	5.963	0.243	0.175	0.225	0.132	0.174	0.187	0.174	0.174
Sm	1.497	1.015	0.877	0.826	1.384	1.444	1.294	0.022	0.051	0.033	0.026	0.028	0.050	0.027	0.012
Eu	0.320	0.213	0.148	0.175	0.277	0.274	0.230	0.005	0.011	0.017	0.006	0.010	0.012	0.006	0.004
Gd	1.283	0.848	0.775	0.718	1.093	1.093	1.015	0.048	0.062	0.068	0.040	0.036	0.014	0.035	0.069
Tb	0.161	0.094	0.068	0.091	0.124	0.122	0.115	0.016	0.009	0.009	0.005	0.007	0.011	0.007	0.009
Dy	0.795	0.481	0.351	0.467	0.618	0.612	0.533	0.029	0.041	0.045	0.022	0.025	0.039	0.059	0.060
Ho	0.126	0.090	0.059	0.080	0.080	0.096	0.091	0.011	0.010	0.014	0.012	0.009	0.016	0.011	0.010
Er	0.270	0.170	0.136	0.220	0.171	0.221	0.214	0.015	0.020	0.038	0.027	0.035	0.018	0.022	0.038
Tm	0.028	0.024	0.017	0.037	0.020	0.029	0.023	0.003	0.005	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.005
Yb	0.196	0.077	0.111	0.185	0.186	0.132	0.114	0.040	0.030	0.060	0.007	0.004	0.008	0.007	0.024
Lu	0.016	0.019	0.009	0.030	0.018	0.018	0.019	0.002	0.002	0.008	0.003	0.005	0.001	0.003	0.002
Y	3.034	1.763	1.672	2.224	2.733	2.688	2.411	0.369	0.332	0.481	0.292	0.322	0.321	0.311	0.408
$\Sigma$ REE	22.607	18.018	28.048	16.750	29.595	25.838	24.688	0.992	1.083	1.473	0.879	0.925	1.001	0.907	1.074
LREE	19.732	16.214	26.523	14.923	27.287	23.515	22.564	0.828	0.904	1.229	0.761	0.801	0.892	0.760	0.857
HREE	2.875	1.805	1.525	1.828	2.309	2.324	2.124	0.164	0.179	0.244	0.118	0.123	0.109	0.147	0.217
$\frac{LREE}{HREE}$	6.864	8.984	17.391	8.165	11.818	10.120	10.622	5.035	5.041	5.046	6.477	6.500	8.222	5.170	3.950
$La_N/Yb_N$	30.518	67.006	52.667	17.308	29.155	35.548	44.274	3.277	6.254	3.646	18.907	31.117	18.435	16.956	6.623
$\delta Eu$	0.688	0.682	0.538	0.678	0.665	0.641	0.593	0.430	0.625	1.056	0.580	1.003	1.081	0.568	0.315
$\delta Ce$	0.099	0.104	0.753	0.672	0.587	0.563	0.459	0.883	0.738	0.906	0.880	0.920	0.999	1.040	1.033

注:“-”为低于检测限值。

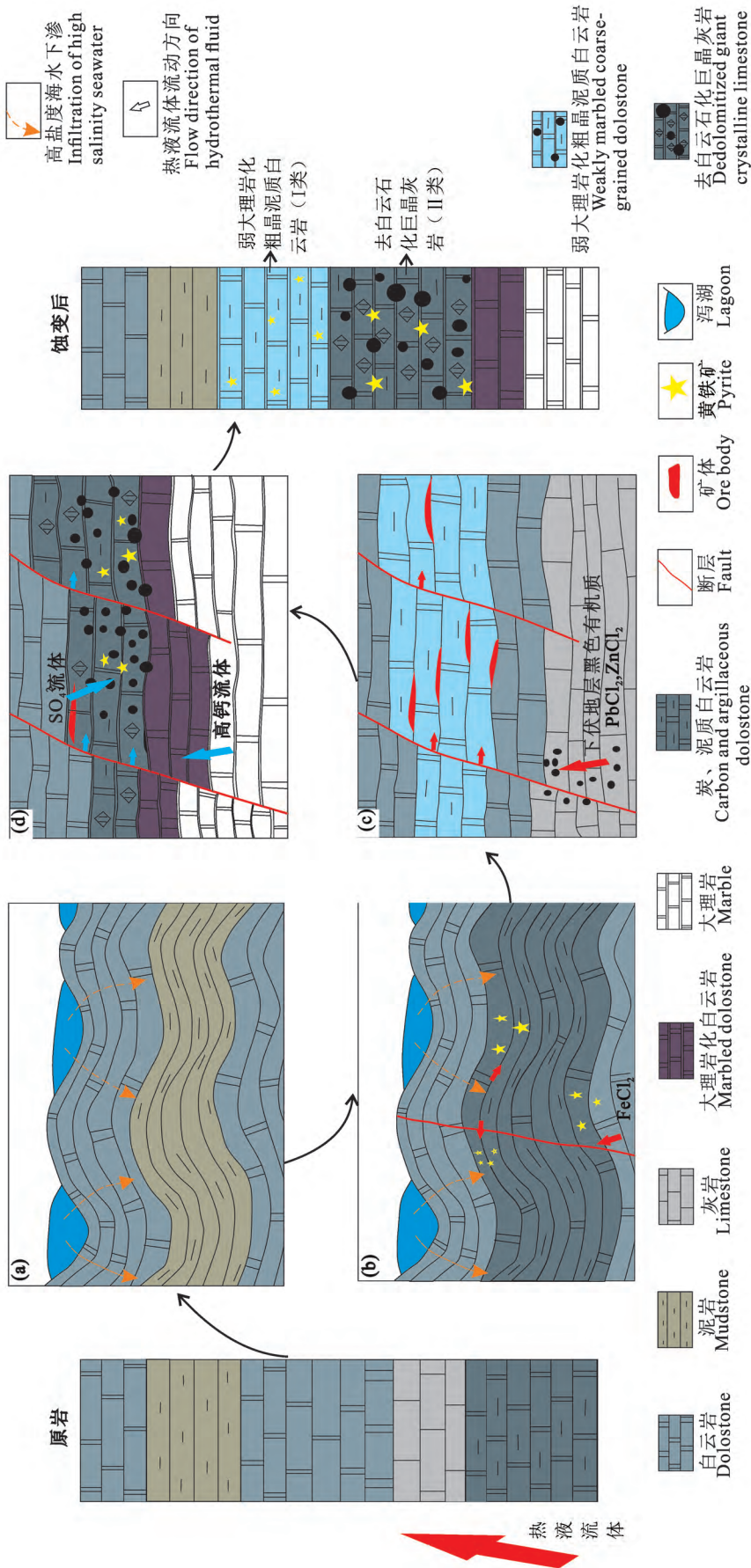


图10 弱大理岩化粗晶泥质白云岩 (I类) 和去白云石化巨晶灰岩 (II类) 的成岩作用模式图: (a) 钙质泥岩与白云岩形成喀斯特界面, 海拔较低处形成泻湖, 高盐度海水下渗; (b) 热液流体沿断层上升, 下渗的高盐度海水以及热液流体在岩性界面处发生大理岩化; (c) 下伏地层中黑色有机质和成矿热液沿断层上升, 在弱大理岩化粗晶泥质白云岩中形成铅锌矿体; (d) 富石膏等海相硫酸盐的蒸发岩层和TSR结束后提供丰富的硫酸根以及蒸发岩层丰富的钙源而产生的高Ca/Mg值的流体同时引起弱大理岩化粗晶泥质白云岩发生去白云石化和大理岩化

Fig. 10 Diagenesis model diagram of weakly marbled coarse-grained dolomite(type-I) and dedolomitized giant crystalline limestone(type-II):

(a) Karst interface is formed between calcilitite and dolomite, lagoons are formed at lower altitude, and high salinity seawater is infiltrated; (b) the hydrothermal fluid rises along the fault, the infiltrated high salinity seawater and hydrothermal fluid are occurred marbling and illitization at the lithologic interface; (c) black organic matter in the underlying strata and ore-forming hydrothermal solution rise along the fault, and lead-zinc ore bodies are formed in marble coarse-grained dolomite; (d) the evaporation gypsum salt layer rich in marine sulfate such as gypsum and after mineralization provide abundant sulfate radicals, as well as the fluid with high Ca/Mg value produced by evaporation gypsum salt layer with rich calcium source, which simultaneously causes the weakly marbled coarse-grained argillaceous dolomite to undergo dolomitization and marbarlization

后,下伏地层中的黑色有机质和成矿热液沿断裂上升,成矿热液与白云岩反应,并使矿物颗粒重结晶,黑色有机质充填在矿物裂隙中(图 10c)。白云岩蚀变为高 CaO 灰岩,反映经历了与白云石化相反的过程。菱面体晶形的方解石是去白云石化的有利证据,富钙的流体沿白云石解理或晶面渗入,在内部一边溶解白云石一边沉淀方解石,未破坏白云石的菱面体晶形,而直接形成菱面体晶形的方解石(毕仲其,1986)。白云石的溶解和方解石的沉淀,这个过程有两种方式:①白云石与富含硫酸根离子的溶液反应,这可以导致方解石的沉淀,因此硫酸根离子的存在有助于去白云石化作用(黄思静等,1996;闫志为,2008);②Ca 离子的加入,高 Ca/Mg 值的流体容易导致发生去白云石化,溶液中 Ca/Mg 值越高,白云石  $Mg^{2+}$  释放速率越快,去白云石化作用越快,膏盐可以提供钙源,使得 Ca/Mg 值升高,因此发育大套膏盐能促进去白云石化(王小林等,2009)。富金属元素的成矿流体与富石膏等海相硫酸盐的蒸发膏盐层、富  $S^{2-}$  或  $SO_4^{2-}$  的层间建造流体混合,开启硫酸盐热化学还原(TSR),形成大量自形粒状黄铁矿和他形粒状的闪锌矿(黄智龙等,2004;Leach et al., 2005,2010;王童,2018;谈树成等,2019),当硫化物沉淀时会影响成矿热液的物理化学性质,这个过程需要通过溶解-再结晶碳酸盐矿物缓冲作用来维持相对稳定的物理化学条件进而持续进行水/岩相互作用(Zhou Jiaxi et al., 2018b)。这一过程中,富石膏等海相硫酸盐的蒸发膏盐层和硫酸盐热化学还原(TSR)结束后提供丰富的硫酸根离子可以促使白云石溶解,方解石沉淀;另外蒸发膏盐层丰富的钙源而产生的高 Ca/Mg 值的流体与白云石反应,具有一定渗透性的白云岩有利于流体发生热对流(孙伟等,2020),两种方式同时促进去白云石化。值得注意的是,陈随海(2014)认为毛坪铅锌矿中的石膏和有机质参与了铅锌的成矿作用,当石膏和含硫有机质反应释放  $H_2S$  和大量的  $Ca^{2+}$ ,富含金属离子与该类成矿流体在有利位置汇聚,金属离子与有机质演化的  $H_2S$  反应,沉淀胶状闪锌矿、黄铁矿;同时其中大量  $Ca^{2+}$  与白云石反应,取代围岩白云石中的  $Mg^{2+}$ ,发生去白云石化作用,因此铅锌矿化的过程正是  $Ca^{2+}$  取代  $Mg^{2+}$  的过程,因此又进一步促进了去白云石化。弱大理岩化泥质白云岩与流体反应,使泥质白云岩发生大理岩化,矿物重结晶,富含硫酸根离子和高 Ca/Mg 值的较高温成矿热液使白云石发生去白云石化作用,生成大量的方解石,最终形成去白

云石化巨晶灰岩(Ⅱ类,图 10d)。去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)旁侧的大理岩由较纯的碳酸盐岩(原岩)发生强的热接触变质作用而形成,其中的方解石和白云石重结晶。

综上所述,原岩通过大理岩化和去白云石化而形成不同的蚀变围岩。弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)是由原岩为钙质泥岩,高盐度卤水在钙质泥岩和白云岩的岩性界面反应形成泥质白云岩,较高温的热液上升使泥质白云岩发生弱大理岩化,表现为白云石和方解石重结晶,结构上发生改变,形成粗晶结构;而去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)相对于弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)蚀变更强烈,经历矿化、大理岩化和去白云石化作用而形成,表现为白云石蚀变为方解石,大量方解石和少量白云石重结晶,颗粒粗大。

## 6.2 找矿指示意义

已有的研究表明以碳酸盐岩为容矿围岩的后生热液铅锌矿床中蚀变对找矿具有重要指示意义,蚀变围岩可能提供了部分成矿物质(黄智龙等,2003;文德潇等,2014b;陈随海等,2016;赵冻等,2016)。综合前期研究成果和地质事实,弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)和去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)与铅锌矿成因关联如下:

(1)从时间层面上看:经过大理岩化和去白云石化形成的蚀变围岩,其矿物组合和生成顺序与前人对毛坪铅锌矿床总结的结果一致(魏爱英,2015;王童,2018)。

(2)从空间层面上看:在前文中提到弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)和去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)是与断裂、矿化关系密切的蚀变围岩,是构造—流体—蚀变耦合作用的产物(图 2),尤其是Ⅱ类,空间上与铅锌矿化密切相伴。

(3)从成矿物质和成矿流体层面上看:去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)中 V、Ni、Ga、Sc、Cs、Rb 等元素的含量低,Pb、Zn 含量显著增高。

当含硫有机质演化形成  $H_2S$ ,与富含金属离子与  $SO_4^{2-}$  的成矿流体迅速反应,沉淀胶状的闪锌矿、黄铁矿,铅锌矿化的过程伴随着去白云石化作用,促进去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)的形成。去白云石化是富钙热卤水上涌交代的结果(Land et al., 1981)。毛坪铅锌矿床包裹体成分研究结果(胡彬等,2003)表明其成矿流体为  $Na^+—Cl^-—Ca^{2+}$  热水溶液,而形成Ⅱ类蚀变围岩的也正是富钙的热卤水,Ⅰ类蚀变围岩到Ⅱ类蚀变围岩中白云石由强负 Ce 异

常到弱负 Ce 异常变化,反映其成矿环境由碱性向中性或弱酸性演化,这与成矿阶段环境演化一致,去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)比弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)蚀变更强烈,反映二者与铅锌矿体是同一流体系统不同阶段的产物。

综上所述,毛坪、会泽铅锌矿床中的麻点状蚀变围岩与铅锌矿和黄铁矿体之间在时间、空间、成矿物质和成矿流体等方面都均有密切的成因联系:弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)为黄铁矿提供有利的空间;去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)的形成先后经历了矿化、大理岩化和去白云石化作用,因此两类蚀变围岩的形成对不同硫化物的富集有重要的作用,其蚀变强度,分布范围越广,对铅锌富集成矿就越为有利。

## 7 结论

(1)毛坪、会泽铅锌矿床中麻点状蚀变围岩与构造、矿化结伴出现,综合研究将其分为两类:Ⅰ类定名为弱大理岩化粗晶泥质白云岩,Ⅱ类定名为去白云石化巨晶灰岩。

(2)构建了两类蚀变围岩成岩作用模式:弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)的原岩为钙质泥岩,高盐度卤水下渗,在岩性界面处与泥岩和白云岩反应形成泥质白云岩,沉积稳定后发生构造运动,热液流体沿断裂上升,热液使泥质白云岩结构上发生改变,引起泥质白云岩大理岩化;去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)比弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)蚀变更强烈,经历矿化、大理岩化和去白云石化作用而形成,去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)除结构上改变外,白云石蚀变为方解石,形成巨晶。

(3)弱大理岩化粗晶泥质白云岩(Ⅰ类)和去白云石化巨晶灰岩(Ⅱ类)与铅锌矿(化)体之间在时间、空间、成矿物质和成矿流体等方面都具有密切的成因联系,是该类矿床重要的找矿指示标志。

## 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)

毕献武,唐永永,陶琰,王长明,胥磊落,戚华文,兰青,木兰. 2019. 西南三江碰撞造山带沉积岩容矿 Pb—Zn—Ag—Cu 贱金属复合成矿与深部过程. 岩石学报, 35(5): 1341~1371.  
 毕仲其. 1986. 下扬子地区黄龙组中巨晶灰岩的成因. 江苏地质, (4): 1~9.  
 陈世悦. 2002. 矿物岩石学. 山东东营: 中国石油大学出版社: 1~288.

陈随海,韩润生,申屠良义,吴鹏,邱文龙,文德潇. 2016. 滇东北矿集区昭通铅锌矿区蚀变岩分带及元素迁移特征. 吉林大学学报(地球科学版), 46(3): 711~721.  
 陈随海. 2014. 云南昭通铅锌矿床蚀变岩相研究与构造地球化学找矿预测. 导师: 韩润生. 昆明理工大学博士学位论文: 1~139.  
 翟永红,郭成贤. 1997. 湖北随州薛家店地区灯影组去白云石化特征及意义. 矿物岩石地球化学通报, 16(4): 225~229.  
 郭欣. 2007. 滇东北金沙厂铅锌矿成矿特征及其深部、外围远景预测. 矿产与地质, 21(6): 636~641.  
 韩润生,胡煜昭,王学琨,黄智龙,陈进,王峰,吴鹏,李波,王洪江,董英,雷丽. 2012. 滇东北富锗银铅锌多金属矿集区矿床模型. 地质学报, 86(2): 280~294.  
 韩润生,李波,倪培,邱文龙,王旭东,王天刚. 2016. 闪锌矿流体包裹体显微红外测温及其矿床成因意义—以云南会泽超大型富锗银铅锌矿床为例. 吉林大学学报: 地球科学版, 46(1): 91~104.  
 韩润生,王峰,赵高山,王进,周高明,王学琨. 2010. 滇东北矿集区昭通毛坪铅锌矿床深部找矿新进展. 地学前缘, 17(3): 275.  
 韩润生,吴鹏,王峰,周高明,李文尧,邱文龙. 2019. 论热液矿床深部大比例尺“四步式”找矿方法——以川滇黔接壤区毛坪富锗铅锌矿为例. 大地构造与成矿学, 43(2): 246~257.  
 韩润生,张艳,任涛,邱文龙,魏平堂. 2020. 碳酸盐岩容矿的非岩浆后生热液型铅锌矿床研究综述. 昆明理工大学学报(自然科学版), 45(4): 29~40.  
 韩润生,邹海俊,胡彬,胡煜昭,薛传东. 2007. 云南毛坪铅锌(银、锗)矿床流体包裹体特征及成矿流体来源. 岩石学报, 23(9): 2109~2118.  
 侯增谦,宋玉财,李政,王召林,杨志明,杨竹森,刘英超,田世洪,何龙清,陈开旭,王富春,赵呈祥,薛万文,鲁海峰. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb—Zn—Ag—Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型. 矿床地质, 27(2): 123~144.  
 胡彬,韩润生,马德云,马更生,邹海俊. 2003. 云南毛坪铅锌矿区 I 号矿体分布区断裂构造岩稀土元素地球化学特征及找矿意义. 地质地球化学, 31(4): 22~28.  
 胡瑞忠,陈伟,毕献武,付山岭,尹润生,肖加飞. 2020. 扬子克拉通前寒武纪基底对中生代大面积低温成矿的制约. 地学前缘, 27(2): 137~150.  
 胡瑞忠,彭建堂,马东升,苏文超,施春华,毕献武,涂光焱. 2007. 扬子地块西南缘大面积低温成矿时代. 矿床地质, 26(6): 583~596.  
 黄思静,杨俊杰,张文正,黄月明,刘桂霞,肖林萍. 1996. 石膏对白云岩溶解影响的实验模拟研究. 沉积学报, 14(1): 103~108.  
 黄智龙,陈进,韩润生,李文博,刘丛强,张振亮,马德云,高德荣,杨海林. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因—兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系. 北京: 地质出版社: 1~214.  
 黄智龙,陈进,刘丛强,韩润生,李文博,赵德顺,高德荣,冯志宏. 2001. 峨眉山玄武岩与铅锌矿床成矿关系初探—以云南会泽铅锌矿床为例. 矿物学报, 21(4): 681~688.  
 黄智龙,胡瑞忠,苏文超,温汉捷,刘燊,符亚洲. 2011. 西南大面积低温成矿域: 研究意义、历史及新进展. 矿物学报, 31(3): 309~314.  
 黄智龙,李文博,陈进,吴静,韩润生,刘丛强. 2003. 云南会泽超大型铅锌矿床构造带方解石稀土元素地球化学. 矿床地质, 22(2): 199~207.  
 李昌红,李净红. 2014. 矿物岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~289.

- 李娟娟, 史云鹤, 魏柳斌, 张成弓, 苏中堂. 2019. 鄂尔多斯盆地东南部奥陶系马五段去白云石化过程的地球化学示踪. 中国岩溶, 38(3): 336~343.
- 李明隆, 谭秀成, 苏成鹏, 芦非凡, 张本健, 潘政屹, 肖笛. 2020. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组砂糖状白云岩特征及成因机制—以广元上寺剖面为例. 地质论评, 66(3): 591~610.
- 李文博, 黄智龙, 陈进, 韩润生, 张振亮, 许成. 2004a. 会泽超大型铅锌矿床成矿时代研究. 矿物学报, 24(2): 112~116.
- 李文博, 黄智龙, 王银喜, 陈进, 韩润生, 许成, 管涛, 尹牡丹. 2004b. 会泽超大型铅锌矿田方解石 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 地质论评, 50(2): 189~195.
- 李文博, 黄智龙, 张冠. 2006. 云南会泽铅锌矿田成矿物质来源: Pb、S、C、H、O、Sr 同位素制约. 岩石学报, 22(10): 2567~2580.
- 李孜腾, 韩润生, 闫庆文. 2017. 会泽超大型富锗银铅锌矿床矿化—蚀变分带规律及构造的控制作用. 中国地质, 44(2): 316~330.
- 林方成. 2005. 扬子地台西缘大渡河谷超大型层状铅锌矿床地质地球化学特征及成因. 地质学报, 8(4): 540~556, 583~584.
- 柳贺昌, 林文达. 1999. 滇东北铅锌银矿床规律研究. 昆明: 云南大学出版社: 1~385.
- 马更生, 胡彬, 韩润生, 邹海俊. 2006. 毛坪铅锌矿床地质地球化学特征. 云南地质, 25(4): 474~480.
- 邱文龙, 韩润生. 2015. 昭通铅锌矿床氢氧同位素特征研究. 地质学报, 89(S1): 173~174.
- 任顺利, 李延河, 曾普胜, 邱文龙, 范昌福, 胡古月. 2018. 膏盐层在云南会泽和毛坪铅锌矿成矿中的作用: 硫同位素证据. 地质学报, 92(5): 1041~1055.
- 孙伟, 陈明, 万友利, 何江林, 兰叶芳, 卫红伟, 陈浩. 2020. 封闭系统中的白云石化作用过程及其油气地质意义—以南羌塘拗陷中侏罗统布曲组白云岩为例. 地质论评, 66(5): 1217~1229.
- 谈树成, 周家喜, 罗开, 向震中, 何小虎, 张亚辉. 2019. 云南毛坪大型铅锌矿床成矿物质来源: 原位 S 和 Pb 同位素制约. 岩石学报, 35(11): 3461~3476.
- 王健, 张均, 仲文斌, 杨清, 李发科, 朱政坤. 2018. 川滇黔地区天宝山、会泽铅锌矿床成矿流体来源初探: 来自流体包裹体及氢氧同位素的证据. 地球科学, 43(6): 2076~2099.
- 王童. 2018. 云南昭通毛坪铅锌矿床地质特征及成因探讨. 导师: 李葆华. 成都理工大学硕士学位论文: 1~65.
- 王小林, 胡文瑄, 钱一雄, 张军涛, 谢小敏, 李庆. 2009. 塔里木盆地柯坪地区中寒武统藻白云岩去白云岩化研究. 矿物学报, 29(1): 56~62.
- 魏爱英. 2015. 滇东北毛坪 Pb—Zn 矿床白云石化及其与金属成矿作用的耦合关系研究. 导师: 薛传东. 昆明理工大学博士学位论文: 1~167.
- 文德潇, 韩润生, 王峰, 贺姣姣, 邱文龙, 夏颜乐, 陈随海, 倪尔建. 2014a. 云南会泽超大型铅锌矿床 HTD 白云岩的厘定及其形成机制. 岩石矿物学杂志, 33(6): 1086~1098.
- 文德潇, 韩润生, 吴鹏, 贺姣姣. 2014b. 云南会泽 HZT 型铅锌矿床蚀变白云岩特征及岩石—地球化学找矿标志. 中国地质, 41(1): 235~245.
- 吴永涛, 韩润生. 2018. 滇东北矿集区茂租铅锌矿床热液白云石稀土元素特征. 矿床地质, 37(3): 656~666.
- 闫志为. 2008. 硫酸根离子对方解石和白云石溶解度的影响. 中国岩溶, 27(1): 24~31.
- 杨坤光, 袁晏明. 2009. 地质学基础. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~432.
- 张杰, 寿建峰, 文应初, 王一刚, 胡安平. 2012. 去白云石化作用机理及其对储集层的改造. 古地理学报, 14(1): 69~84.
- 张艳, 韩润生, 魏平堂, 邱文龙. 2017. 云南会泽矿山厂铅锌矿床流体包裹体特征及成矿物理化学条件. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3): 719~733.
- 张艳, 韩润生, 魏平堂. 2015. 会泽超大型铅锌矿床成矿流体同位素示踪综述. 地质学报, 89(S1): 242~244.
- 张艳, 韩润生, 魏平堂. 2016. 碳酸盐岩型铅锌矿床成矿流体中铅锌元素运移与沉淀机制研究综述. 地质论评, 62(1): 187~201.
- 张长青, 毛景文, 吴锁平, 厚民, 刘峰, 郭保健, 高德荣. 2005. 川滇黔地区 MVT 铅锌矿床分布、特征及成因. 矿床地质, 24(3): 336~348.
- 张振亮. 2006. 云南会泽铅锌矿床成矿流体性质和来源——来自流体包裹体和水岩反应的证据. 导师: 黄智龙. 中国科学院研究生院地球化学研究所博士学位毕业论文: 1~128.
- 赵冻, 韩润生, 任涛, 王加昇, 张小培, 吴永涛, 崔峻豪. 2016. 滇东北大型矿集区乐红大型铅锌矿床矿化蚀变分带模式. 矿物岩石地球化学通报, 35(6): 1258~1269.
- 周家喜, 黄智龙, 周国富, 曾乔松. 2012b. 黔西北天桥铅锌矿床热液方解石 C、O 同位素和 REE 地球化学. 大地构造与成矿学, 36(1): 93~101.
- 周家喜, 黄智龙, 高建国, 王涛. 2012a. 滇东北茂租大型铅锌矿床成矿物质来源及成矿机制. 矿物岩石, 32(3): 62~69.
- 邹海俊, 韩润生, 胡彬, 刘鸿. 2004. 云南昭通毛坪铅锌矿床成矿物质来源的新证据—NE 向断裂构造岩微量元素 R 型因子分析结果. 地质与勘探, 40(5): 43~48.
- Bi Xianwu, Tang Yongyong, Tao Yan, Wang Changming, Xu Leiluo, Qi Huawen, Lan Qing, Mu Lan. 2019. Composite metallogenesis of sediment-hosted Pb—Zn—Ag—Cu base metal deposits in the Sanjiang collisional orogen, SW China, and its deep driving mechanisms. Acta Petrologica Sinica, 35(5): 1341~1371.
- Bi Zhongqi. 1986. Genesis of megacryst limestone in Huanglong formation in lower Yangtze region. Jiangsu Geology, 04: 1~9.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. Developments in Geochemistry, 2: 63~114.
- Chen Shiyue. 2002. Mineral Petrology. Dongying Shandong: China University of Geosciences Press: 1~288.
- Chen Suihai, Han Runsheng, Shentu Liangyi, Wu Peng, Qiu Wenlong, Wen Dexiao. 2016. Alteration zoning and geochemical element migration in alteration rock of Zhaotong lead—zinc deposit in Northeastern Yunnan mineralization concentration area. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(3): 711~721.
- Chen Suihai. 2014. The study of alteration facies and tectonic geochemical ore-respecting in Zhaotong lead—zinc deposit, Yunnan Province. Tutor: Han runsheng. Doctor dissertation of Kunming University of Science and Technology: 1~139.
- Dickson J A D. 1965. A modified staining technique for carbonates in thin sections. Nature, 205: 587.
- Evamy B D. 1967. Dedolomitization and the development of rhombohedral pores in limestones. Journal of Sedimentary Petrology, 37: 1204~1215.
- Guo Xin. 2007. Ore-forming characteristics of the Jinshachang Pb—Zn deposit and the perspective prediction of its deep part and periphery, northeast Yunnan. Mineral Resources and Geology, 21(6): 636~641.
- Han Runsheng, Hu Yuzhao, Wang Xuekun, Huang Zhilong, Chen Jin, Wang Feng, Wu Peng, Li Bo, Wang Hongjiang, Dong Ying, Lei Li. 2012. Mineralization model of rich Ge—Ag-bearing Pb—Zn polymetallic deposit concentrated district in northeastern Yunnan, China. Acta Geologica Sinica, 86(2): 280~294.
- Han Runsheng, Li Bo, Ni Pei, Qiu Wenlong, Wang Xudong, Wang



- Tiangang. 2016#. Infrared micro-thermometry of fluid inclusions in sphalerite and geological significance of Huize super-large Zn—Pb (Ge—Ag) deposit, Yunnan Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(1):91~104.
- Han Runsheng, Liu Congqiang, Huang Zhilong, Chen Jin, Ma Deyun, Li Yuan. 2001#. Study on the metallogenic model of the Huize Pb—Zn deposit in Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(4):674~680.
- Han Runsheng, Wu Peng, Wang Feng, Zhou Gaoming, Li Wenyao, Qiu Wenlong. 2019#. Four steps type ore-prospecting method for deeply concealed hydrothermal ore deposit—A case study of the Maoping Zn—Pb—(Ag—Ge) deposit in Southwestern China. *Geotectonica et Metallogenia*, 43(2):246~257.
- Han Runsheng, Zhang Yan, Ren Tao, Qiu Wenlong, Wei Pingtang. 2020#. Summary of research on carbonate-hosted, non-magmatic, epigenetic, hydrothermal type Pb—Zn deposits. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 45(4):29~40.
- Han Runsheng, Zou Haijun, Hu Bin, Hu Yuzhao, Xue Chuandong. 2007#. Features of fluid inclusions and sources of ore-forming fluid in the Maoping carbonate-hosted Zn—Pb—(Ag—Ge) deposit, Yunnan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9):2109~2118.
- Han Runsheng, Wang Feng, Zhao Gaoshan, Wang Jin, Zhou Gaoming, Wang Xuekun. 2010#. New progress in deep prospecting of Zhaotong Maoping lead—zinc deposit, northeastern Yunnan Province metallogenic district. *Earth Science Frontiers*, 17(3):275.
- Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, Wang Zhaolin, Yang Zhiming, Yang Zhusen, Liu Yingchao, Tian Shihong, He Longqing, Chen Kaixu, Wang Fuchun, Zhao Chengxiang, Xue Wanwen, Lu Haifeng. 2008#. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb—Zn—Ag—Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt; geological features and tectonic model. *Mineral Deposits*, 27(2):123~144.
- Hu Bin, Han Runsheng, Ma Deyun, Ma Gengsheng, Zou Haijun. 2003#. REE geochemical features of NE-trending fault tectonites and their ore-finding significance in the maoping Pb—Zn deposit, Yunnan, China as exemplified by the distribution area of NO. 1 orebody. *Geology Geochemistry*, 31(4):22~28.
- Hu Ruizhong, Chen Wei, Bi Xianwu, Fu Shanling, Yin Runsheng. 2020#. Control of the precambrian basement on the formation of the Mesozoic large-scale low-temperature mineralization in the Yangtze Craton. *Earth Science Frontiers*, 27(2):137~150.
- Hu Ruizhong, Peng Jiantang, Ma Dongsheng, Su Wenchao, Shi Chunhua, Bi Xianwu, Tu Guangchi. 2007#. Epoch of large-scale low-temperature mineralizations in southwestern Yangtze massif. *Mineral Deposits*, 26(6):583~596.
- Huang Sijing, Yang Junjie, Zhang Wenzheng, Huang Yueming, Liu Guixia, Xiao Linping. 1996#. Effects of gypsum (or anhydrite) on dissolution of dolomite under different temperatures and pressures of epigenesis and burial diagenesis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(1):103~108.
- Huang Zhilong, Chen Jin, Han Runsheng, Li Wenbo, Liu Congqiang, Zhang Zhenliang, Ma Deyun, Gao Derong, Yang Hailin. 2004#. Geochemistry and Genesis of the Huize Super-large Pb—Zn Deposit in Yunnan Province: Concurrently Discuss the Relationship between Emeishan Basalt and Lead—Zinc Deposits. Beijing: Geological Publishing House; 1~214.
- Huang Zhilong, Chen Jin, Liu Congqiang, Han Runsheng, Li Wenbo, Zhao Deshun, Gao Derong, Feng Zhihong. 2001#. A preliminary discussion on the genetic relationship between Emeishan basalts and Pb—Zn deposits as exemplified by the huize Pb—Zn deposit, yunnan province. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(4):681~688.
- Huang Zhilong, Hu Ruizhong, Su Wenchao, Wen Hanjie, Liu Shen, Fu Yazhou. 2011#. A study on the large-scale low-temperature metallogenic domain in Southwestern China—Significance, history and new progress. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(3):309~314.
- Huang Zhilong, Li Wenbo, Chen Jin, Wu Jing, Han Runsheng, Liu Congqiang. 2003#. REE geochemistry of calcites from fault zone of Huize superlarge Pb—Zn deposits in Yunnan Province. *Mineral Deposits*, 22(2):199~207.
- Kong Zhigang, Wu Yue, Zhang Feng, Zhang Changqing, Meng Xuyang. 2018#. Sources of ore-forming material of typical Pb—Zn deposits in the Sichuan—Yunnan—Guizhou metallogenic province: constraints from the S—Pb isotopic compositions. *Earth Science Frontiers*, 25(1):125~137.
- Land L S and Prezbindowski D R. 1981. The origin and evolution of saline formation water, lower cretaceous carbonates, Southcentral Texas, USA. Elsevier, 54:51~74.
- Leach D L and Sangster D F. 1993. Mississippi Valley-type lead—zinc deposits. *Mineral deposit modeling Geological Association of Canada Special Paper*, 40:289~314.
- Leach D L, Bradley D C, Huston D, Pisarevsky S A, Taylor R D, Gardoll S J. 2010. Sediment-hosted lead—zinc deposits in Earth history. *Economic Geology*, 105(3):593~625.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, Large R R, Garven G, Allen C R, Gutzmer J, Walters S G. 2005. Sediment-hosted lead—zinc deposits: A global perspective. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*:561~607.
- Li Changhong, Li Jinghong. 2014#. *Mineral Petrology*. Wuhan: China University of Geosciences Press; 1~289.
- Li Jingjuan, Shi Yunhe, Wei Liubin, Zhang Chenggong, Su Zhongtang. 2019#. Geochemical tracing to the dedolomitization process of Ordovician Ma-5 in the southeast of Ordos basin. *Carsologica Sinica*, 38(3):336~343.
- Li Minglong, Tan Xiucheng, Su Chengpeng, Lu Feifan, Zhang Benjian, Pan Zhengyi, Xiao Di. 2020#. Characteristics and genetic mechanism of granulocyte dolomites from the Qixia formation of middle Permian, northwest Sichuan Basin: a case study of the Guangyuan Shangsi section. *Geological Review*, 66(3):561~610.
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Chen Jin, Han Runsheng, Zhang Zhenliang, Xu Cheng. 2004a#. Rb—Sr dating of mineral assemblage from the Huize giant Pb—Zn deposit, Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 24(2):112~116.
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Wang Yinxi, Chen Jin, Han Runsheng, Xu Cheng, Guan Tao, Yin Mudan. 2004b#. Sm—Nd isochron age of calcite in Huize super-large lead—zinc ore field and its geological significance. *Geological Review*, 50(2):189~19.
- Li Wenbo, Huang Zhilong, Zhang Guan. 2006#. Sources of the ore metals of the Huize ore field in Yunnan province: constraints from Pb, S, C, H, O and Sr isotope geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10):2567~2580.
- Li Ziteng, Han Runsheng, Yan Qingwen. 2017#. Mineralization—alteration zoning regularity and structural ore-controlling role in the Huize super-large sized Ge—Ag-rich Pb—Zn deposit, Yunnan Province. *Geology in China*, 44(2):316~330.
- Lin Fangcheng. 2005#. Geological and geochemical characteristics and genesis of super-large-scale sedex-type stratiform lead—zinc deposits in the Dadu river valley on the western margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica*, 8(4):540~556, 583~

- 584.
- Liu Hechang, Lin Wenda. 1999#. Study on the regularity of Pb—Zn—Ag deposit in northeast Yunnan. Kunming: Yunnan University Press, 1~385.
- Ma Gengsheng, Hu Bin, Han Runsheng, Zou Haijun. 2006#. Geological and geochemical characteristics of Maoping lead—zinc deposit. *Yunnan Geology*, 25(4): 474~480.
- Qiu Wenlong, Han Runsheng. 2015#. Study on hydrogen and oxygen isotope characteristics of Zhaotong lead—zinc deposit. *Acta Geologica Sinica*, 89(S1):173~174.
- Ren Shunli, LiYanhe, Zeng Pusheng, Qiu Wenlong, Fan Changfu, Hu Guyue. 2018#. Effect of sulfate evaporate salt layer in mineralization of the Huize and Maoping lead—zinc deposits in Yunnan; evidence from sulfur isotope. *Acta Geologica Sinica*, 92(5): 1041~1055.
- Sun Wei, Chen Ming, Wan Youli, He Jianglin, Lan Yefang, Wei Hongwei, Chen Hao. 2020#. Closed-system dolomitization process and the significance for petroleum geology—An example from dolostone in the Middle Jurassic Buqu Formation in southern Qiangtang Depression. *Geological Review*, 66(5):1217~1229.
- Tan Shucheng, Zhou Jiayi, Luo Kai, Xiang Zhenzhong, He Xiaohu, Zhang Yahui. 2019#. The sources of ore-forming elements of the Maoping large-scale Pb—Zn deposit, Yunnan Province: Constrains from in-situ S and Pb isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 35(11): 3461~3476.
- Wang Jian, Zhang Jun, Zhong Wenbin, Yang Qing, Li Fake, Zhu Zhengkun. 2018#. Sources of ore-forming fluids from Tianbaoshan and Huize Pb—Zn deposits in Yunnan—Sichuan—Guizhou region, southwest China; evidence from fluid inclusions and He—Ar isotopes. *Editorial Committee of Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 43(6):2076~2099.
- Wang Tong. 2018#. Study on geology and genesis of the Mao Ping lead—zinc deposit, Zhaotong, Yunnan, China. Tutor: Li Baohua. Master dissertation of Chengdu University of Technology, 1~65.
- Wang Xiaolin, Hu Wenxuan, Qian Yixiong, Zhang Juntao, Xie Xiaomin, Li Qing. 2009#. Dedolomitization of algal dolomites of middle cambrian, Keping area, Tarim basin. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(1): 56~62.
- Wei Aiyong, Xue Chuandong, Xiang Kun, Li Jing, Liao Cheng, Akhter Q J. 2015. The ore-forming process of the Maoping Pb - Zn deposit, northeastern Yunnan, China: Constraints from cathodoluminescence (CL) petrography of hydrothermal dolomite. *Ore Geology Reviews*, 70:562~577.
- Wei Aiyong. 2015#. Study on dolomitization and its coupling relationship with metal mineralization in Maoping Pb—Zn deposit, northeast Yunnan. Tutor: Xue Chuandong. Doctor dissertation of Kunming University of Science and Technology, 1~167.
- Wen Dexiao, Han Runsheng, Wang Feng, He Jiaojiao, Qiu Wenlong, Xia Yanle, Chen Suihai, Ni Erjian. 2014a#. Features and formation mechanism of HTD dolomites in the Huize lead—zinc deposit, Yunnan Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(6):108~1098.
- Wen Dexiao, Han Runsheng, Wu Peng, He Jiaojiao. 2014b#. Altered dolomite features and petro-geochemical prospecting indicators in the Huize lead—zinc deposit. *Geology in China*, 41(1): 235~245.
- Wu Yongtao, Han Runsheng. 2018#. REE geochemistry of hydrothermal dolomites from Maozu Pb—Zn deposit, northeastern Yunnan. *Mineral Deposits*, 37(3): 656~666.
- Yan Zhiwei. 2008#. Influences of  $SO_4^{2-}$  on the solubility of calcite and dolomite. *Carsologica Sinica*, 27(1): 24~31.
- Yang Kunguang, Yuan Yanming. 2009#. *Fundamentals of Geology*. Wuhan: China University of Geosciences Press; 1~432.
- Zhai Yonghong, Guo Chengxian. 1997#. Characteristics and significance of dolomitization of Dengying Group in Xuejiadian Area, Suizhou, Hubei Province. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 16(4): 225~229.
- Zhang Changqing, Mao Jingwen, Wu Suoping, HouMin, Liu Feng, Guo Baojian, Gao Derong. 2005#. Distribution, characteristics and genesis of Mississippi Valley-type lead—zinc deposits in Sichuan—Yunnan—Guizhou area. *Mineral Deposits*, 24(3): 336~348.
- Zhang Jie, Shou Jianfeng, Wen Yingchu, Wang Yigang, Hu Anping. 2012#. Mechanism of dedolomitization and its rebuilding to reservoir. *Journal of Palaeogeography*, 14(1): 69~84.
- Zhang Yan, Han Runsheng, Wei Pingtang, Qiu Wenlong. 2017#. Fluid inclusion features and physicochemical conditions of the Kuangshanchang Pb—Zn deposit, Huize, Yunnan Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(3):719~733.
- Zhang Yan, Han Runsheng, Wei Pingtang. 2015#. Review on isotopic tracing of ore-forming fluids in Huize super-large lead—zinc deposit. *Acta Geologica Sinica*, 89(S1):242~244.
- Zhang Yan, Han Runsheng, Wei Pingtang. 2016#. Research overview on the migration and precipitation mechanisms of lead and zinc in ore-forming fluid system for carbonate-hosted lead—zinc deposits. *Geological Review*, 62(1):187~201.
- Zhang Zhenliang. 2006#. Feature and sources of ore-forming fluid in the Huize lead—zinc ore deposits, Yunnan Province, China: evidence from fluid inclusions and water—rock reaction experiments. Tutor: Huang Zhilong. Doctor dissertation of Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 1~128.
- Zhao Dong, Han Runsheng, Ren Tao, Wang Jiasheng, Zhang Xiaopei, Wu Yongtao, Cui Junhao. 2016#. The mineralization and alteration zoning of the Lehong lead zinc deposit, the large deposit concentration area in the northeast of Yunnan Province, China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(6): 1258~1269.
- Zhou Jiayi, Bai Junhao, Huang Zhilong, Zhu Dan, Yan Zaifei, Lü Zhicheng. 2015. Geology, isotope geochemistry and geochronology of the Jinshachang carbonate-hosted Pb—Zn deposit, Southwest China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 272~284.
- Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Gao Jianguo, Wang Tao. 2012a#. Sources of ore-forming metals and fluids, and mechanism of mineralization, maozu large carbonare-hosted lead—zinc deposit, northeast yunnan province. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 32(3):62~69.
- Zhou Jiayi, Huang Zhilong, Zhou Guofu, Zeng Qiaosong. 2012b#. C, O isotope and REE geochemistry of the hydrothermal calcites from the Tianqiao Pb—Zn ore deposit in NW Guizhou Province, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(1):93~101.
- Zhou Jiayi, Luo Kai, Wang Xuance, Wilde S A, Wu Tao, Huang Zhilong, Cui Yinliang, Zhao Jiixin. 2018a. Ore genesis of the fule Pb—Zn deposit and its relationship with the Emeishan large igneous province: Evidence from mineralogy, bulk C—O—S and in situ S—Pb isotopes. *Gondwana Research*, 54: 161~179.
- Zhou Jiayi, Wang Xuance, Wilde S A, Luo Kai, Huang Zhilong, Wu Tao, Jin Zhongguo. 2018b. New insights into the metallogeny of MVT Pb—Zn deposits; A case study from the Nayongzhi in South China, using field data, fluid compositions, and in situ S—Pb isotopes. *American Mineralogist*, 103(1): 91~108.
- Zou Haijun, Han Runsheng, Hu Bin, Liu Hong. 2004#. New evidences of origin of metallogenic materials in the maoping Pb—Zn

ore deposit, Zhaotong, Yunnan; R-factor analysis results of trace elements in NE-extending fractural tectonites. *Geology and*

*Grospecting*, 40(5): 43~48.

## Genesis of coarse—giant carbonate rocks in Maoping and Huize super-large lead—zinc deposits in Northeast Yunnan and its prospecting significance

TAN Mao<sup>1,2)</sup>, WU Peng<sup>1,2)</sup>, HAN Runsheng<sup>1,2)</sup>, ZHANG Yan<sup>1,2)</sup>, HUANG Zhilong<sup>3)</sup>,  
JIANG Longyan<sup>1,2)</sup>, YANG Hang<sup>1,2)</sup>

1) *Faculty of Land Resources Engineering, University of Science and Technology, Kunming, 650093;*

2) *Southwest Institute of Geological Survey, Geological Survey Center for Non-ferrous Metals Resources, Kunming, 650093;*

3) *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550081*

**Objectives:** Maoping and Huize Pb—Zn deposits in Yunnan Province are important parts of carbonate type Pb—Zn metallogenic domain in Sichuan, Yunnan and Guizhou, and are the two most representative super-large deposits in northeast Yunnan Pb—Zn concentration area. The lenticular and cystic alteration near the lead—zinc ore body is commonly known as “mottling rock” because of its mottling-like appearance, which is accompanied by faults and mineralization in space, and is an important prospecting sign.

**Methods:** In this paper, mottling altered wall rock is taken as the main research object, the material composition, fabric characteristics and formation process were studied by fine measurement of large-scale tunnel section, petrographic analysis, electron probe analysis, X-ray micro-area diffraction analysis and principal and trace element analysis.

**Results:** According to the fabric characteristics, altered wall rock can be divided into two categories. the type-I altered wall rock is saccharoidal, and the mineral particles are mainly dolomite and calcite with coarse crystalline structure (0.5~1 mm), which are cemented by clay minerals such as brown illite; the type-II altered wall rock is mottled, and the mineral particles are mainly calcite and dolomite with giant crystal texture (1~3 mm), which are obviously recrystallized and cemented by black argillaceous and organic matter. Through hand specimen observation, microscopic identification and comprehensive analysis, the type-I altered wall rock is named as weakly marbled coarse-grained argillaceous dolostone, and the type-II altered wall rock is named as dedolomitized giant crystalline limestone. Compared with the major element characteristics of the two types of altered wall rock, the content of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and K<sub>2</sub>O in type-I is higher. The trace element characteristics show that the main mineralized elements (Zn, Pb) are enriched in the two kinds of altered wall rock. The REE characteristics show that the REE contents in weakly marbled coarse-grained argillaceous dolostone (type-I) are higher than that of dedolomitized giant crystalline limestone (type-II), and the REE characteristics of dedolomitized giant crystalline limestone (type-II) are similar to those of mineralized dolomite.

**Conclusions:** Two types of altered wall rock are products of different stages of the same fluid system, and their diagenesis models are constructed: the original rock of weakly marbled coarse-grained argillaceous dolomite (type-I) is calcareous mudstone, and high-salinity brine seeps down, which reacts with mudstone and dolomite at the lithologic interface to form argillaceous dolomite. After the sedimentation is stable, due to the influence of tectonic movement, hydrothermal fluid rises along the fault, and argillaceous dolomite marmalization is formed in favorable sections (structural change). Dedolomitized giant crystalline limestone (type-II) is more strongly altered than the weakly marbled coarse-grained argillaceous dolostone (type-I), which has undergone mineralization, marbling and dedolomitization. The comprehensive analysis shows that there is a close genetic relationship between altered wall rock and lead—zinc ore bodies in terms of time, space, ore-forming materials and ore-forming fluids, etc. It is suggested that the marbling and dedolomitization have important indicative significance for the ore-forming and ore-prospecting of this type of deposit.

**Keywords:** marbling; dedolomitization; indicative significance for prospecting; Maoping and Huize Pb—Zn deposits; Pb—Zn concentration area in northeast Yunnan

**Acknowledgements:** This study was supported by National Key R&D Project (No. 2018YFC0603900), National natural Science Foundation of China (No. 41102049), Yunnan Engineering Laboratory of Mineral Resources Prediction and Evaluation (YM lab) (2010), Geological Process and Mineral Resources Innovation Team (2012)

**First author:** TAN Mao, female, born in 1995, postgraduate, Major in mineralogy, petrology and economic geology; Email: 791027590@qq.com

**Corresponding author:** WU Peng, male, born in 1981, Professor, mainly engaged in teaching and scientific research of mineral survey and exploration; Email: wupeng8104@163.com

**Manuscript received on:** 2021-05-06; **Accepted on:** 2021-11-23; **Network published on:** 2021-12-20

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2021.12.015

**Edited by:** ZHANG Yuxu, ZHAO Xue

## 《地质学报》(中、英文版)和《地质论评》2021年度取得优秀成绩

《地质学报》(中、英文版)和《地质论评》三刊编辑部努力学习领会十九届六中全会精神,认真贯彻习近平总书记在科技创新大会、两院院士大会、中国科协第九次全国代表大会上的讲话精髓,积极落实“着力打造具有核心竞争力和国际影响力的一流科技期刊”的要求,努力工作,默默奉献,2021年度又取得了优秀的成绩。

### 1 编辑出版大量高质量的文章

三刊收到并处理稿件 1400 余篇,出版正刊纸质期刊 24 期,刊发文章近 600 篇,总页码达 8000 多页,且另加增刊 2 期。刊登了一批高质量的关乎国民经济发展急需的矿产资源找矿、国家重大工程建设项目及国家自然科学基金资助项目的论文。如《地质学报》(中文版)围绕大陆动力学和固体地球科学研究的若干重要关键问题,组织出版了《再论大陆动力学发展面临的重大挑战》专辑;针对我国紧缺的战略性矿产资源钾盐和战略新兴矿产资源锂矿分别组织出版了《盐湖沉积、钾锂成矿与勘查开采技术》专辑和《新能源锂矿战略与大陆动力学研究》专辑;为服务国家“一带一路”倡议,组织出版了《非洲国际合作地质调查》专辑;随着我国在深空探测方面取得的卓越成就,为增强行星科学与传统地质学的融合,组织出版了《行星地质与化学》专辑。《地质学报》(英文版)为能源安全提供支撑,刊发了南海油气专辑、“干热岩”专辑。《地质论评》刊出了青藏高原油气地质专栏。这些专辑、专栏的出版充分发挥了期刊对学术发展的推动作用和导向作用。《地质论评》出版了中国地质学会第五届全国青年地质大会摘要集增刊 1 期,《地质学报(英文版)》出版了中国地质科学院深部中心主办的“DEEP-2021 深部地球勘察与应用会议”拓展摘要文集。

### 2 大力开展期刊宣传及中国地质学会的期刊工作

加强中国地学期刊网及三刊网站的维护及及时更新;积极开展网络预出版,进一步缩短了文稿从投稿到面世的时间;加强微信公众号维护和更新,目前微信公众号粉丝数量近 5000 人;加强文章的精准推送;积极参加各类学术会议。

围绕办好地学期刊的途径与措施,提高地学期刊的学术影响力和更好服务地质科技创新,为中国地质学会 2021 年海南博鳌年会地学期刊分会场组织了 30 个精彩的报告,

印发了参会所需的各种宣传手册 3000 多份(因新冠疫情延期召开)。

### 3 承担多个研究项目

三刊编辑部 2021 年度主持中国科协有关期刊的项目 5 个,分别为:《地质学报》卓越行动计划项目、《地质学报》(英文版)卓越行动计划项目、全国学会出版能力提升计划产业发展服务项目、全国学会出版能力提升计划国际学术交流项目、中国科协优秀论文遴选项目。另,我刊编辑方向博士、郭现轻博士、蔡志慧博士各负责国家自然科学基金资助项目一项。

### 4 获得多项荣誉

(1)《地质学报》(英文版)、《地质学报》获得“中国最具国际影响力学术期刊”(即 Top-5%),《地质论评》获得“中国最具国际影响力优秀学术期刊”(即 Top-5%~10%)称号。

(2)《地质学报》和《地质论评》获得“第五届中国精品科技期刊”称号。

(3)《地质学报》1 篇论文获得“第六届中国科协优秀科技论文”称号。

(4)《地质学报》和《地质论评》均有多篇文章入选中国科学技术信息研究所 2020 年“领跑者 5000 中国精品科技期刊顶尖学术论文”。

(5)《地质学报》和《地质论评》继续入编北京大学图书馆编纂的《中文核心期刊要目总览》。

(6)三刊均入选世界期刊影响力指数(WJCI)报告(2020 科技版),按 WJCI 排序,三刊均位居 Q1 区。

(7)三刊均进入《2021 中国学术期刊影响因子年报(自然科学与工程技术版)》中国学术期刊影响力指数 Q1 区。

(8)三刊多个期次获得印刷“优质品证书”称号。

(9)《地质学报》常务副主编周健和《地质论评》编辑部主任刘志强荣获中国科技期刊卓越行动计划“2021 年度优秀编辑”荣誉称号。

**LIU Zhiqiang: Acta Geologica Sinica (Chinese and English Versions) and Geological Review achieved excellent results in 2021**