中国科学: 地球科学 2022 年 第 52 卷 第 2 期: 340 ~ 355
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

孢粉化石对三江成矿带厂硐密西西比河谷型铅锌矿床成矿年龄的限定

刘英超[1*], 宋玉财[1†], 侯增谦[1], 席党鹏[2], 李素萍[1], 岳龙龙[1], 马旺[2], 唐波浪[3]

1. 中国地质科学院地质研究所, 自然资源部深地动力学重点实验室, 北京 100037;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 江苏南京地质工程勘查院, 南京 210041
* 通讯作者, E-mail: lychappy@126.com
† 通讯作者, E-mail: song_yucai@126.com

收稿日期: 2020-08-24; 收修改稿日期: 2021-07-16; 接受日期: 2021-08-31; 网络版发表日期: 2021-11-30
国家自然科学基金项目(批准号: 41922022、41773042、41773043、41772088、41472067)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(编号: XDA20070304)、自然资源部深地动力学重点实验室项目(编号: J1901-6)、中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(编号: J2105)和国际地学对比计划项目(编号: IGCP-662)资助

摘要 密西西比河谷型铅锌矿床是世界上最重要的铅锌储库之一, 成因备受关注. 然而, 由于成矿温度低, 矿床极少发育合适的放射性同位素定年矿物, 矿床定年问题一直是困扰其研究的一个世界性难题. 文章针对中国西部三江铅锌成矿带思茅盆地内厂硐铅锌矿床开展工作, 通过容矿岩石中孢粉化石的定年间接限定了其成矿年龄, 进而讨论了其成矿构造背景. 厂硐矿床的铅锌矿化主要赋存在地下水成因古喀斯特溶洞的内沉积层中, 闪锌矿和方铅矿以交代内沉积物中的方解石或充填其内孔洞的形式产出, 矿化形成在内沉积层沉积之后. 孢粉化石研究表明, 厂硐矿床内沉积物中发育以栗属、栎属、山核桃属为主的被子植物花粉和以水龙骨科、凤尾蕨属、蹄盖蕨科为主的蕨类孢子的孢粉组合. 对比区域古气候与古植被特征, 判定厂硐矿床内沉积物及古溶洞最可能的形成时代为早-中渐新世, 由此判定铅锌矿化应晚于早渐新世(~34Ma), 即晚于古溶洞内沉积物开始沉积的时间. 对文章研究结果和区域地质构造资料的综合分析表明, 厂硐矿床是一个发育在三江褶皱逆冲推覆系统中的、由古喀斯特溶洞控矿的密西西比河谷型铅锌矿床, 其控矿溶洞是由区域逆冲推覆作用将深埋的二叠纪灰岩地层抬升到近地表接受地下水溶蚀而形成的. 厂硐铅锌矿床和三江铅锌成矿带东、北段广泛发育的密西西比河谷型铅锌成矿作用成矿时间一致, 成矿特征相似, 因此, 三江铅锌成矿带可向南延伸500km进入思茅盆地内. 本次工作为年轻构造背景下发育的、赋存于地下水成因古喀斯特溶洞内沉积物或碎屑岩中的密西西比河谷型铅锌矿床定年提供了一种新途径.

关键词 密西西比河谷型铅锌矿床, 定年, 孢粉, 内沉积, 古喀斯特溶洞, 厂硐矿床, 三江褶皱逆冲带

中文引用格式: 刘英超, 宋玉财, 侯增谦, 席党鹏, 李素萍, 岳龙龙, 马旺, 唐波浪. 2022. 孢粉化石对三江成矿带厂硐密西西比河谷型铅锌矿床成矿年龄的限定. 中国科学: 地球科学, 52(2): 340–355, doi: 10.1360/N072020-0286
英文引用格式: Liu Y, Song Y, Hou Z, Xi D, Li S, Yue L, Ma W, Tang B. 2022. Palynological constraints on the age of the Mississippi Valley-type Changdong Pb-Zn deposit, Sanjiang belt, West China. Science China Earth Sciences, 65(1): 167–181, https://doi.org/10.1007/s11430-020-9838-4

© 2021 《中国科学》杂志社

1　引言

密西西比河谷型(Mississippi Valley-type, MVT)铅锌矿床是一类与盆地卤水有关的低温热液铅锌矿床, 主要赋存在碳酸盐岩地层中, 是世界上最重要的铅锌矿床类型之一(Leach等, 2005), 提供了全球约23%的铅锌资源量(戴自希, 2005). 自20世纪80年代以来, 国内外学者对MVT铅锌矿床的成矿流体和成矿物质来源、成矿时代、成矿构造背景等开展了大量研究(例如, Basuki和Spooner, 2004; Leach等, 2005), 提出这类矿床的大地构造背景主要为汇聚造山带的前陆盆地和褶皱逆冲带(Bradley和Leach, 2003; Liu等, 2017), 极少数矿床发育在伸展背景下的裂谷环境中(Rowan和de Marsily, 2001; Ostendorf等, 2015). 虽然取得了诸多进展, 但是MVT矿床成矿年龄的限定却一直是一个世界性难题(Leach等, 2005; Liu, 2017; Song等, 2019). 多年来, 人们针对这一问题尝试了各种放射性同位素测试手段, 包括闪锌矿的Rb-Sr等时线定年(例如, Nakai等, 1990; Brannon等, 1992; Tian等, 2014), 方解石和萤石的Sm-Nd等时线定年(例如, Chesley等, 1994; Li等, 2007; Tian等, 2014), 方解石的U-Pb等时线定年(例如, Brannon等, 1996a; Grandia等, 2000; Symons和Arne, 2003)、黄铁矿的Re-Os等时线定年(例如, 唐永永等, 2013; Liu等, 2019)等, 但是, 这些定年方法都或多或少存在一定问题, 导致了其定年结果的不确定性(Jiang等, 2000; Leach和Song, 2020). 比如, 闪锌矿的Rb-Sr定年曾被广泛应用在MVT铅锌矿床的研究中(例如, Nakai等, 1990; Brannon等, 1992; Tian等, 2014), 但是, 实际上大多数Rb-Sr等时线获得的成矿年龄并不可靠, 究其原因是因为在铅锌矿化的过程中, 成矿流体会溶蚀碳酸盐岩围岩, 围岩溶解后残留的富钾矿物(如黏土矿物)进入成矿流体后会对流体中的Rb、Sr含量和同位素组成造成扰动(Brannon等, 1996b; Leach等, 2001), 从而导致成矿流体中Rb-Sr体系不封闭. 黄铁矿的Re-Os等时线定年是应用于MVT矿床定年中的一种新方法(Hnatyshin等, 2015; Kelley等, 2017), 但是, 实际上多数MVT铅锌矿中都很难准确找到和铅锌矿化同时发育的黄铁矿. 这是因为, 在MVT矿床的成矿流体中(低温、高盐度、低pH)虽然Pb、Zn离子溶解度很高(~10000ppm, 1ppm=10^{-6}), 但是Fe离子的溶解度却极低(~1ppm)(Cooke等, 2000; Emsbo, 2000), 从而造成了MVT铅锌矿床中虽然存在多阶段黄铁矿, 但却仅有极少黄铁矿和铅锌硫化物共生的情况(黄世强, 2019; Rieger等, 2019). 方解石和萤石的定年也存在相似问题, 即实际工作中很难准确挑选出与铅锌硫化物同时沉淀的方解石和萤石. 如果在样品选择中出现了错误, 那么这种样品获得的放射性同位素等时线年龄也会相应出现较大偏差(Leach和Song, 2020). 由于定年工作的困难, MVT矿床大地构造背景也常难以明确, 从而限制了人们对其成矿机制的深入理解. 因此, 探索可靠的定年方法, 获得准确的证据来限定MVT矿床的成矿年龄对进一步理解该类矿床的成矿作用至关重要.

孢粉学是古生物学的一个分支. 孢粉学的一个重要研究内容就是孢粉地质年代学, 它通过孢粉化石的种类、分布和丰度为地层提供年龄限定(王伟铭, 2009; 谢宇龙等, 2019). 孢粉地质年代学主要应用于对第四纪以前的地层时代的判定, 并广泛应用于石油和煤炭地质找矿中(王伟铭, 2009; 周山富, 2000). 通常, 孢粉地质年代学可以将地层的形成时间限定在一定地质时期内(例如, 周山富, 2000; 谢宇龙等, 2019), 但无法给出精确的年龄, 因此, 目前其还没有被应用于矿床学研究中. 实际上, 孢粉地质年代学或可应用在MVT铅锌矿床的成矿年龄限定上. 理论上讲, 如果可以在MVT铅锌矿床的赋矿围岩中找到孢粉化石, 那么通过孢粉组合则可限定围岩的形成时代, 同时限定MVT铅锌成矿年龄的上限. 确定MVT铅锌矿床成矿年龄的一个主要目的是为了将其成矿作用与大地构造背景联系起来, 从而推断它们可能的成矿过程, 因此, 如果获得的成矿年龄上限足够年轻, 大地构造环境在此之后并未发生改变, 那么, 这个年龄限制对MVT矿床成矿过程提供的信息与精确年龄对MVT矿床成矿过程提供的信息是一致的. 此外, 对比放射性同位素年龄的不确定性(例如, 会泽MVT铅锌矿床应用放射性同位素等时线获得的成矿年龄从40~226Ma; Li等, 2007; 江小均等, 2018), 孢粉地质年代学提供的是更为可靠的地质证据, 不会出现上百个Ma的误差. 因此, 对相对年轻的MVT铅锌矿床开展孢粉地质年代学的应用研究是值得尝试的.

基于此, 本次工作首次应用孢粉地质年代学对MVT铅锌矿床的成矿年龄限定进行了尝试, 具体工作在中国青藏高原三江褶皱逆冲带思茅盆地中的厂硐铅锌矿床展开. 研究工作获得了厂硐矿床有效的成矿年

龄上限, 不但为进一步认识三江成矿带区域MVT铅锌矿化提供了新的成矿年龄数据(侯增谦等, 2008; He等, 2009), 而且为MVT铅锌矿床的定年工作指出了一个新的方向.

2 地质特征简介

三江褶皱逆冲带位于青藏高原东、北缘, 夹持于金沙江和班公湖-怒江两条缝合带之间(图1; Hou等, 2007; Deng等, 2014). 沉积岩容矿的铅锌矿床在带内广泛分布(图1), 其南起兰坪盆地, 北至沱沱河地区, 形成了一条长达1000km的巨型铅锌成矿带(图1; 侯增谦等, 2008; Liu等, 2016), 铅锌资源潜力巨大(宋玉财等, 2011; Liu等, 2017). 成矿年代学研究表明, 这些矿床均形成于41Ma至约20~16Ma之间(Tian等, 2014; Song等, 2015; Liu等, 2016; 黄世强, 2019), 为新生代印度-欧亚大陆碰撞环境下成矿(Mo等, 2008; Liebke等, 2013). 对比区域构造演化, 其形成于褶皱逆冲推覆构造系统中(侯增谦等, 2008; Liu等, 2017), 就位于区域挤压(逆冲)向挤压后伸展(走滑或抬升)的应力转换时期(Spurlin等, 2005; Song等, 2015). 褶皱逆冲活动引发的一系列次级构造, 包括断裂、构造穹隆、盐底辟、溶洞等控制了这些铅锌矿床的就位(Leach等, 2017; Zhang等, 2017). 综合来看, 带内铅锌矿床具有相似的成矿特征(Song等, 2015; Liu等, 2017; Liu等, 2019), 包括: (1) 铅锌矿体层控产出, 均赋存于区域逆冲断层上、下盘的石炭系到三叠系的灰岩或白云石化灰岩中; (2) 矿物组合简单, 以闪锌矿、方铅矿为矿石矿物, 以黄铁矿、方解石、白云石、重晶石、萤石为主要脉石矿物; (3) 成矿流体为低温(集中于110~150℃)、高盐度(集中于16~27wt.% NaCl eqv.)的盆地卤水; (4) 后生成矿, 成矿作用与岩浆作用无直接关系. 这些特征均为世界MVT铅锌矿床的典型成矿特征(Leach等, 2005; Wilkinson, 2014), 三江铅锌成矿带是一条巨型的MVT铅锌成矿带.

厂硐铅锌矿床在地理位置上位于云南省南部, 在大地构造位置上位于三江带最南段的兰坪-思茅褶皱逆冲带内(图1; Zhang等, 2010; Yang等, 2014), 与萝卜山、幔旭两个特征相似的铅锌矿床共同构成了思茅盆地内最大的碳酸盐岩容矿铅锌矿集区——萝卜山-厂硐铅锌矿集区(图2; 李爽等, 2013; 魏中林等, 2015). 厂硐矿床已圈定铅锌矿体4个, 铅、锌品位分别为1.27~3.22%和9.7~9.9%(李爽等, 2013), 截至2017年底探明铅锌资源量20万吨.

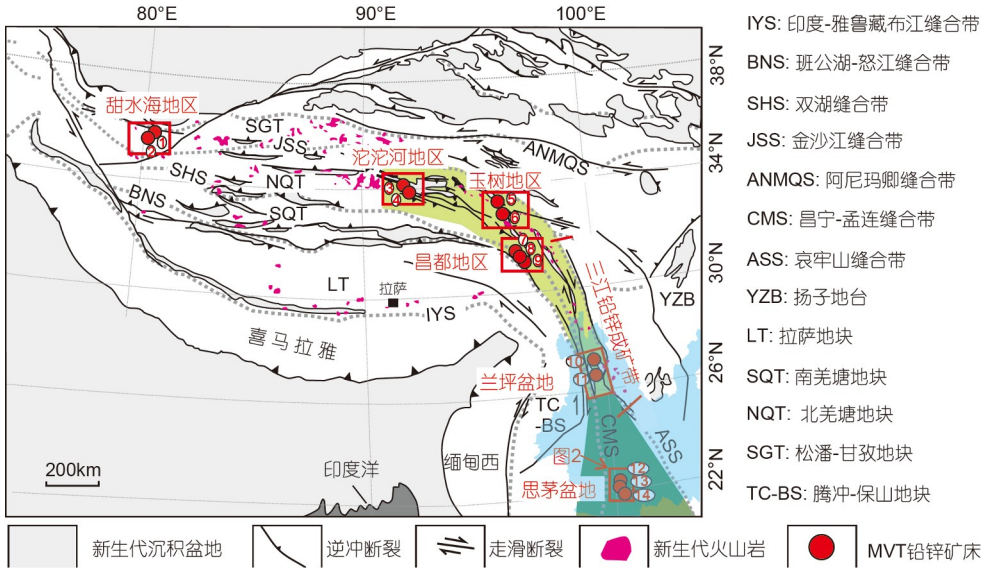


图 1 三江MVT铅锌成矿带大地构造背景

据Spurlin等(2005)和Yin和Harrison(2000)修改. 浅绿色代表前人厘定的三江MVT铅锌成矿带范围, 深绿色代表本次研究将三江MVT铅锌成矿带南延的范围. 浅蓝色区域代表云南省. 三江带内典型MVT铅锌矿床: 1, 多宝山; 2, 火烧云; 3, 茶曲帕查; 4, 纳保扎陇; 5, 东莫扎抓; 6, 莫海拉亨; 7, 加膜山; 8, 赵发勇; 9, 拉拢拉; 10, 华昌山; 11, 金顶; 12, 厂硐; 13, 萝卜山; 14, 曼旭

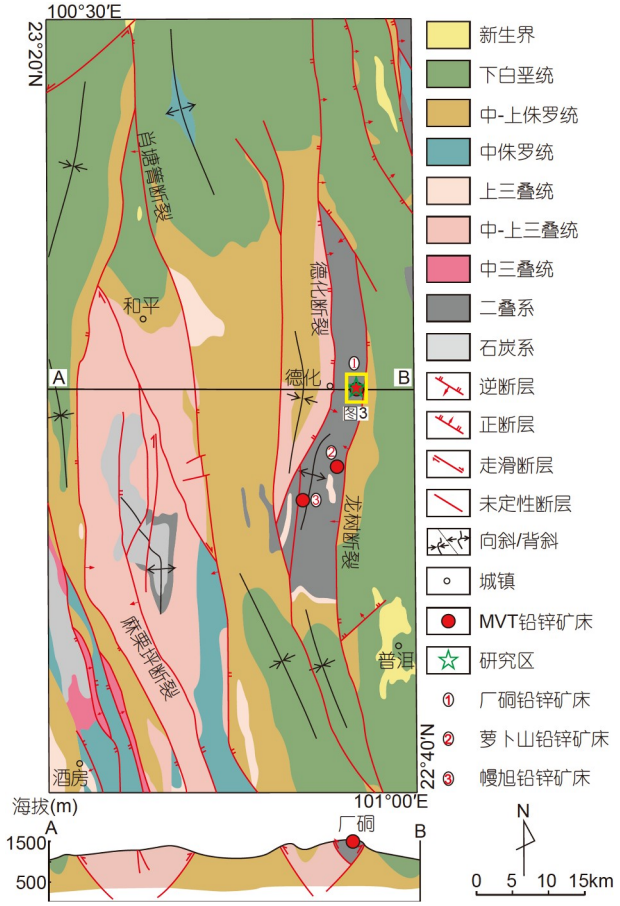


图 2　萝卜山-厂硐MVT铅锌矿集区区域地质简图

据江彪(2014)修改. 位置见图1

龙树逆冲断层是厂硐铅锌矿区最主要的断层，在区域上属于无量山-营盘山逆冲推覆系统(刘善印等, 1998). 其在矿区内将上二叠统长兴组碳酸盐岩地层(P_3ch)推覆至中侏罗统花开左组紫红色砂岩和泥岩之上(J_2h)(图3). 断层上盘长兴组下段灰色厚层生物碎屑灰岩(P_3ch^1)是厂硐铅锌矿体的主要赋矿围岩(图3). 在厂硐矿区内，P_3ch^1灰岩中广泛发育角砾岩，角砾岩带总体沿N-S向的龙树断裂分布，并在局部向西延伸(图3). 角砾岩为杂基支撑角砾岩, 角砾主要由几厘米到几米不等的灰岩组成，杂基主要为粒度更小的灰岩碎屑(图4a和4b)和石英、黏土等矿物(图4c). 角砾岩带局部可见粒度较大的角砾发生明显旋转，岩性对比表明这些角砾来自层位较高的长兴组中段(P_3ch^2)和上段(P_3ch^3)的岩石(图3). 当杂基中包含较多黏土矿物时, 其会由于氧化作用而形成红色氧化色(图4d). 角砾岩之间大的空隙多被层状沉积物充填(图4e)形成内沉积层. 这些内沉积物主要由来自灰岩的方解石、硅质矿物(石英和燧石)、黏土(图4f)组成，矿物碎屑颗粒直径从<0.01mm到1cm不等. 内沉积层呈棕黄色到白色，局部浅棕色到黑色，通常由几毫米到几厘米厚的浅色与暗色交替层组成(图4e和4f). 内沉积粒序层普遍存在，通常具有多个向上粒度变细的旋回(图4f)，软沉积变形(如落石挤压导致的变形)普遍发育，这些现象可能由于轻微冲刷、差异性沉积压实或压溶作用导致. 宏观来看，内沉积层在角砾岩带内可形成厚度达3m以上，宽数米，长数十米的层状体(图4e)，其和周围角砾岩截然接触.

厂硐铅锌矿床的矿物组合为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和方解石. 内沉积层是铅锌矿化的主要发育位置(图3、4g、4h)，铅锌硫化物以交代内沉积层中先存的碳酸盐(如方解石)碎屑(图4j)或充填内沉积碎屑之间的孔洞等两种形式(图4k和4l)发育. 虽然厂硐矿床的铅锌矿化可能形成于不同的阶段(如图4i)，但是各阶段的铅锌矿石都具有相同的结构构造特征(如图4i)，如方铅矿和闪锌矿都为细粒(图4i和4j)或胶状结构(图4i)，形成层状(图4g)或块状矿石(图4h). 厂硐矿区内基本不发育热液蚀变，黄铁矿和方解石发育较少. 强矿化的内沉积层在空间上通常与NW-SE走向的正断层相关(图3)，且越远离断裂，内沉积层中的铅锌矿化也越弱，局部见铅锌硫化物沿这些正断层呈脉状发育. 铅锌矿体总体层控产出，且仅在长兴组下段的角砾岩中发育(图3).

3　样品选择与分析方法

本次共选取了平硐及钻孔中的12件内沉积层样品进行了孢粉化石分析. 为了能够充分把握孢粉化石的组成，样品包含了8件灰色内沉积物和4件红色内沉积物，均采自矿床中典型的内沉积层中(如图5a和5b). 值得注意的是，MVT矿床铅锌矿化过程中通常会产生HCl(Leach等, 2001; Machel, 2001)，一般而言，HCl并不会对孢粉化石的形态产生影响(李元美, 1988; 李育等, 2007)，但是，如果在较高的温度条件下(如在120℃的成矿温度下)，含HCl的热液可能会对孢粉造成破坏(李元美, 1988). 因此，为了避免采集到被破坏的孢粉化石，本次仅选择了未发生蚀变或矿化的样品.

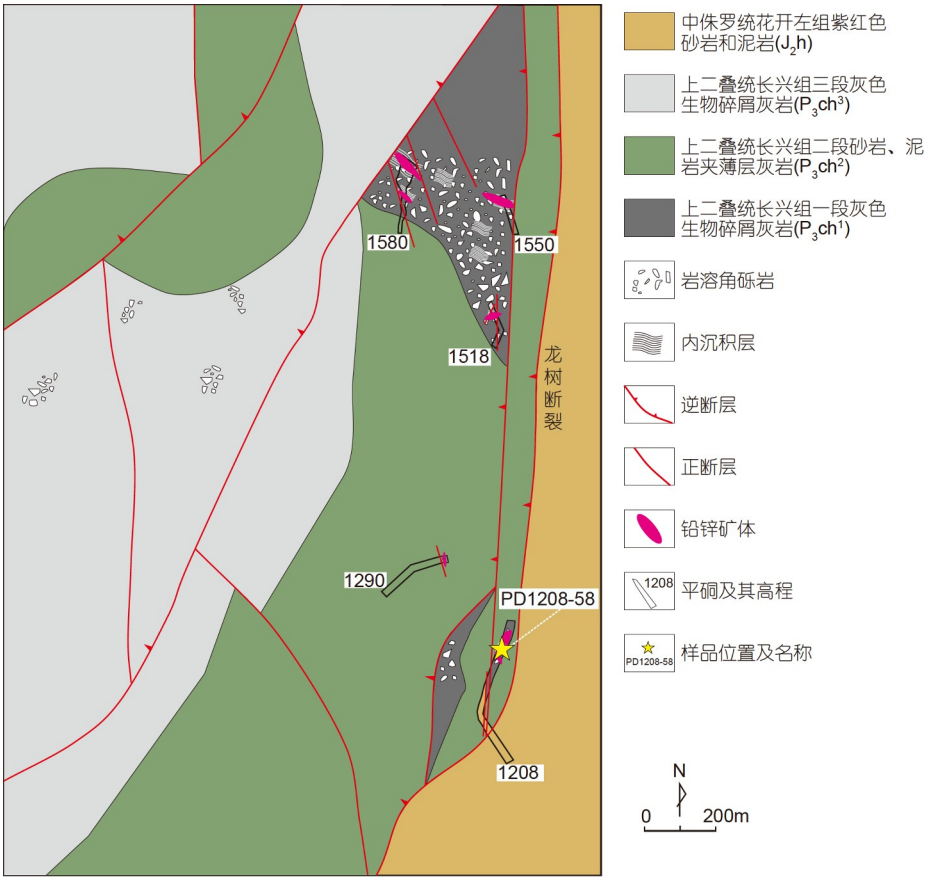


图 3　厂硐铅锌矿床地质简图

位置见图2

孢粉化石的分离过程为: 取样品60g, 用研钵碎样到样品粒径1~3mm; 先加入10~20%的HCl搅拌, 除去碳酸钙, 8小时后加水清洗至样品中性; 再加入40%的HF搅拌, 除去硅酸盐, 2~5天后水洗至中性; 随后, 加入36%的浓盐酸50~100mL煮沸15min, 除去反应生成的氟化物, 加水清洗至样品中性; 最后, 使用10%的KOH溶液水浴处理5~10min, 除去样品中的有机质. 处理过的样品进行重液浮选, 使用10μm网布结合超声波振荡器过筛, 收集剩余物, 离心后备用. 用明胶、甘油、水熬制制片胶, 用石蜡封口制作固定片. 以甘油为分散剂制作活动片. 样品处理及制片在中国地质大学(北京)微体古生物实验室完成. 孢粉化石主要依据《中国孢粉化石(第一卷　晚白垩世和第三纪孢粉)》(宋之琛, 1999)的分类描述方法进行鉴定, 具体在OLYMPUS BH2显微镜400倍镜下进行观察和统计, 必要时在630倍镜下补充观察.

4　结果

前处理结果发现, 所选择的12件样品中, 9件未发现孢粉化石, 2件样品(红色、灰色内沉积物各1件)含有少量孢粉, 1件灰色内沉积物(PD1208-58, 位置见图3)则保存了大量完好的花粉和孢子(图6), 因此本文主要介绍该样品的孢粉组合. 样品PD1208-58中被子植物含量高达64.00%(图6、图7), 以壳斗科为主(含量达29.14%), 主要包括栗属(16.57%)、栎属(8.75%)、栲属(1.71%)、青冈属(1.14%), 胡桃科山核桃属花粉(8.00%)也频繁出现. 蕨类植物百分比含量为32.57%(图6, 图8a~图8t), 主要以单缝孢子为主, 包括水龙骨科(14.29%)和蹄盖蕨科(5.71%), 凤尾蕨属孢子也较常见, 含量为6.29%. 裸子植物花粉含量极低(3.43%)(图6, 图8u~图8w), 仅出现松属花粉(2.86%)和杉科花粉(0.57%).

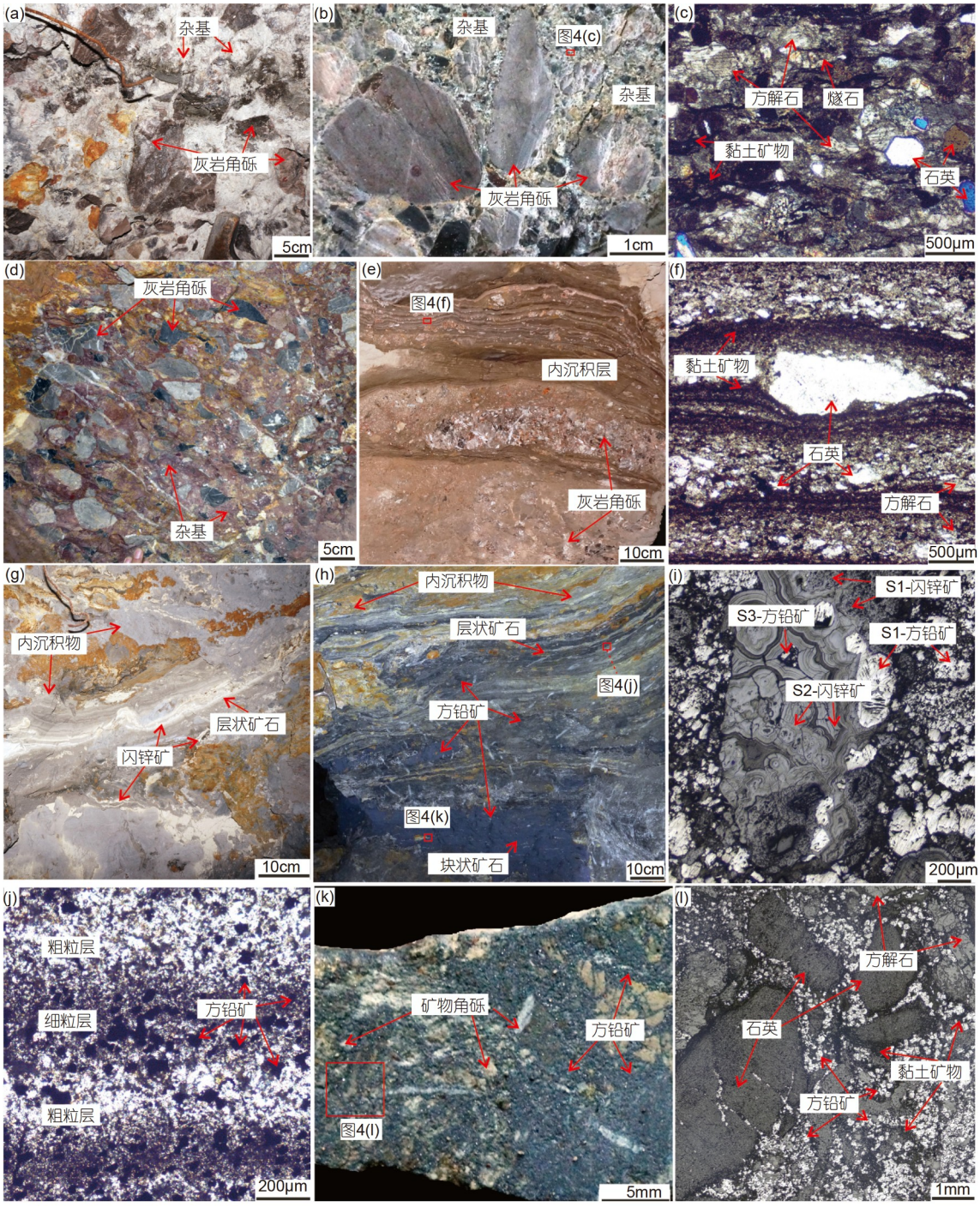


图 4　厂硐铅锌矿床灰岩角砾岩、内沉积层和铅锌矿石的典型特征

(a) 灰岩角砾岩露头; (b) 灰岩角砾岩手标本; (c) 角砾岩中的杂基(正交光), 位置见图4b; (d) 红色杂基支撑灰岩角砾岩; (e) 内沉积层露头; (f) 内沉积层微观结构(正交光), 位置见图4e; (g) 闪锌矿交代灰色内沉积层中的碳酸盐矿物并充填孔洞形成层状矿石; (h) 方铅矿交代灰色内沉积层中的碳酸盐矿物并充填孔洞形成层状、块状矿石; (i) 具有胶状和粒状结构的铅锌硫化物(反射光), S1、S2、S3分别代表从早到晚发育的阶段1、阶段2、阶段3; (j) 方铅矿交代内沉积层中先存的碳酸盐矿物(如方解石)沉淀, 因为粗粒层有更多的碳酸盐矿物存在, 方铅矿在粗粒层中沉淀较多. 位置见图4h; (k) 方铅矿围绕内沉积层中的角砾生长, 充填开放空间发育(手标本尺度), 位置见图4h; (l) 方铅矿围绕内沉积层中的角砾生长, 充填开放空间发育(显微尺度, 反射光), 位置见图4k

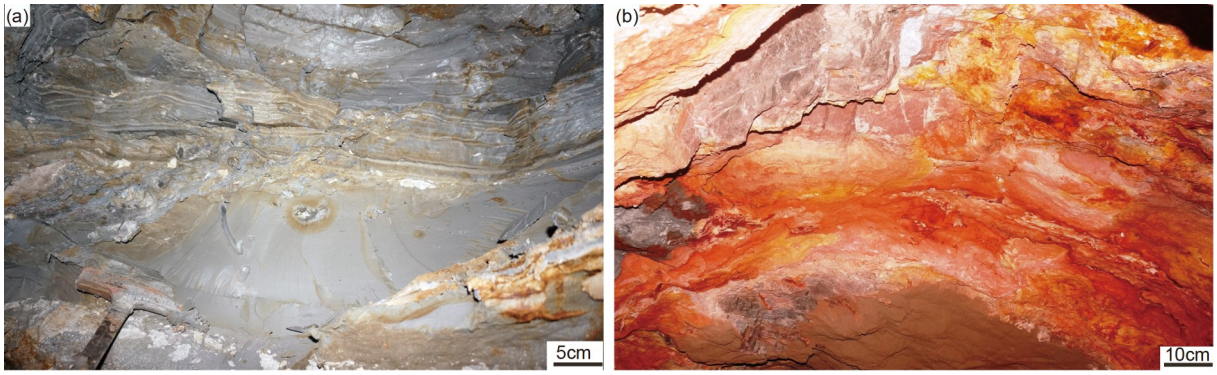


图 5　厂硐铅锌矿床典型的灰色(a)和红色(b)内沉积层

5　讨论

5.1　孢粉化石对厂硐铅锌矿床古溶洞及铅锌成矿时代的限定

内沉积物是指充填在碳酸盐岩溶解形成空隙中的块状、层状碎屑沉积或化学沉积(Kendall, 1960; Bouabdellah等, 1996), 它们是溶洞的典型产物, 并与溶蚀垮塌角砾岩同时发育(Sangster, 1988; Rybicki等, 2017). 发育内沉积的溶洞构造在北美和西特提斯域的前陆地区广泛存在, 是MVT铅锌矿床的典型容矿构造(Hagni, 1986; Velasco等, 2003). 内沉积层可形成于两类溶洞中, 第一类为由地下水和大气降水溶蚀碳酸盐岩所形成的喀斯特溶洞(Dżułyński和Kubicz, 1971; Ford, 1988), 第二类则是由成矿流体溶蚀碳酸盐岩形成的热液溶洞(Bouabdellah等, 2012; Dublyansky, 2013). 两类溶洞的内沉积物都主要来自于围岩溶解、垮塌形成的碎屑物质. 其中, 在第一类溶洞中, 内沉积物中也会有来自周围环境的外来物质(包括孢粉), 这些外来物质一般是通过大气降水或地下水的搬运作用进入到溶洞中的. 如前所述, 厂硐铅锌矿床广泛发育灰岩角砾岩, 并在角砾岩带中发育大量内沉积层(图3). 角砾岩均为杂基支撑角砾岩, 其角砾来自上覆灰岩地层, 且角砾发育明显的磨圆、旋转现象, 反映出了典型的溶洞内溶蚀垮塌角砾岩特征(Ford, 1988; Sangster, 1988). 角砾岩带中内沉积层理良好, 粒度均匀(图4e和4f), 孔隙度高, 含有碎屑石英和黏土物质, 表明其沉积发生在大型古岩溶洞穴或通道内的动态环境中(Rybicki等, 2017). 上述特征表明厂硐铅锌矿床中的灰岩角砾岩和内沉积层实际上代表了一个典型的地下水成因的古喀斯特溶洞系统.

根据矿物穿插关系, 厂硐矿床可能发育了三个铅锌矿化阶段(图4i), 但这三个阶段的方铅矿和闪锌矿都表现出交代内沉积物中的方解石或充填内沉积物中孔洞的成矿方式(图4g和4h). 因此, 厂硐矿床铅锌硫化物的沉淀一定晚于内沉积物的沉积, 即, 晚于古喀斯特溶洞系统的形成. 由于岩溶作用可以发生在成岩后的任何时间, 所以围岩的年龄并不能限定古溶洞的形成时间. 但是, 内沉积物是在溶洞形成过程中发育的, 所以其沉积时代等同于溶洞的形成时代, 并代表了铅锌矿化时代的上限.

内沉积物中的孢粉组合(图6)可以为内沉积物的沉积时代提供有效信息. 本次研究的孢粉组合中山核桃属、青冈属、栲属以及水龙骨科、凤尾蕨属等均是热带、亚热带地区常见的植物类群(徐永椿和任宪威, 1979; 李建国, 1999), 大量蕨类植物的出现反映了湿润的气候(尤树刚, 2000; 林尤兴, 2000), 因此, 孢粉结果指示了研究区当时温暖湿润的气候环境. 总体来看, 孢粉组合反映的植被类型为温暖湿润的常绿落叶阔叶混交林, 林内乔木层以壳斗科植物为主, 林下生长有大量的蕨类植物和一些草本被子植物, 例如伞形科、蔷薇科和大戟科等(图6). 本次样品中松属花粉偶有出现(小于3%), 但是, 松属花粉是一种典型的超代表型花粉, 其花粉产量巨大、传播距离很远, 所以松属花粉的出现, 并不代表本地有松林(Shaw, 1982; 杨振京等, 2003). 因此, 样品中出现的松属花粉有极大的可能性为外源性花粉, 而非本地生长, 即当时当地并不发育针叶林. 综合上述, 我们认为本次获得的孢粉组合反映出当时厂硐矿区附近的植被尚未显示垂直分带

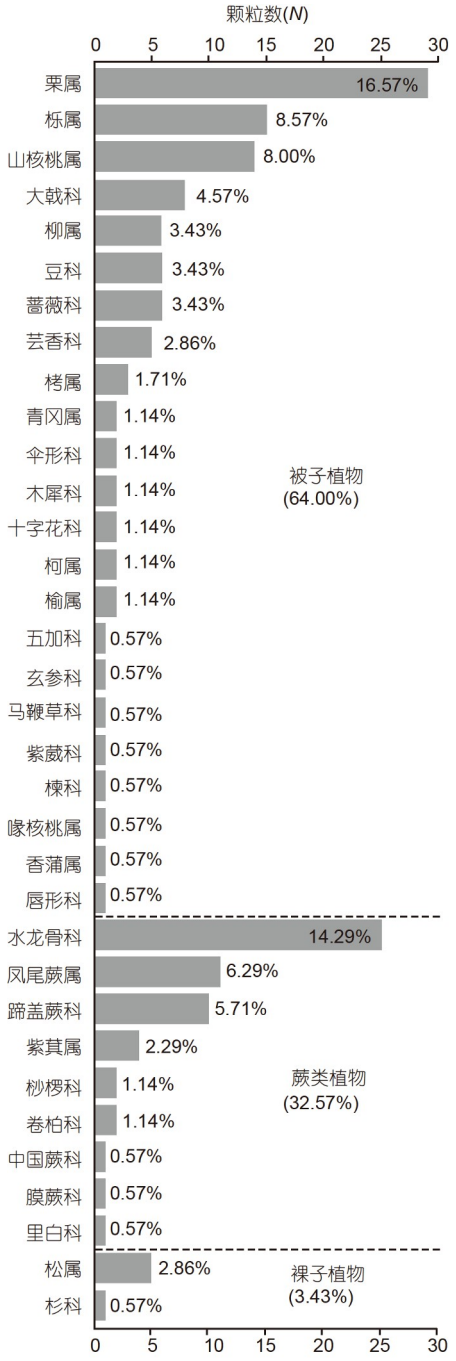


图 6　厂硐铅锌矿床内沉积物中的孢粉组合 (PD1208-58样品)

迹象.

本次孢粉组合中的优势分子为被子植物花粉栗属、栎属、山核桃属、蕨类植物孢子水龙骨科、凤尾蕨属，均体现了区域上古近系-新近系植被的特征(宋之琛，1999). 谢宇龙等(2019)全面总结了云南新生代孢粉记录，获得了云南地区古新世以来的植被演替与气候演变趋势. 古新世，滇南勐腊地区以落叶阔叶成分为优势，植被为以落叶阔叶植物为主的常绿落叶阔叶混交林，反映偏干旱的亚热带气候(宋之琛和李曼英, 1976; 孙湘君, 1979). 始新世, 孢粉记录缺失. 早渐新世, 滇中吕合地区孢粉组合以栎属、桤木属为主, 植被类型为亚热带常绿阔叶林，反映了温暖湿润的气候条件(徐景先, 2002; Xu等, 2008); 滇南景谷地区(位于厂硐西北50km处)则以单缝孢蕨类植物为优势，被子植物花粉少，主要为栎属，松柏类零星(宋之琛和钟碧珍, 1984). 晚渐新世至早中新世, 景谷地区松柏类花粉十分丰富, 针叶树种占42%(宋之琛和钟碧珍, 1984). 中新世，滇南景东地区、景洪以及勐腊地区的孢粉研究结果均显示松属花粉都有一定的含量(张绪敏，1996; Zhang等，2012)，表明从晚渐新世开始，滇西南地区已经存在了明显的植被垂直分带发育, 即, 那时的研究区内至少存在着以阔叶林和针叶林为主的植被带. 对比上述云南地区古新世以来的植被演化和本次厂硐内沉积物孢粉组合所反映的植被类型(温暖湿润的常绿落叶阔叶混交林, 不存在植被分带), 我们推测, 研究区所获得的孢粉组合代表的时代最有可能为早-中渐新世. 虽然本次研究的孢粉组合与景谷渐新世的孢粉组合略有差异(宋之琛和钟碧珍, 1984), 相比于景谷地区以单缝蕨类植物孢子为主要优势类群的情况(宋之琛和钟碧珍, 1984), 本研究中被子植物为优势类群, 但单缝蕨类植物孢子也有较高的百分含量，裸子植物仅零星出现，这可能反映了气候干湿的波动，即本研究反映的气候较当时景谷地区更为湿润.

由于内沉积物同其内的孢粉同时沉积，因此本次获得的孢粉组合同时限定了厂硐铅锌矿床内沉积物形成于早-中渐新世，同时证明了厂硐矿区的古喀斯特作用同样发育于上述时期. 铅锌矿化可能出现在内沉积开始沉积之后的任何时间，故厂硐矿床的铅锌矿化至少发生在早渐新世之后，即铅锌矿化晚于34Ma(早渐新世开始时间; Cohen等, 2013).

5.2　孢粉地质年代学对厂硐铅锌成矿作用的指示

虽然本次工作通过内沉积物中的孢粉化石组合仅限定了厂硐矿床古岩溶的形成时代和铅锌成矿时代的上限, 但是, 它为理解厂硐铅锌矿床的形成过程提供了

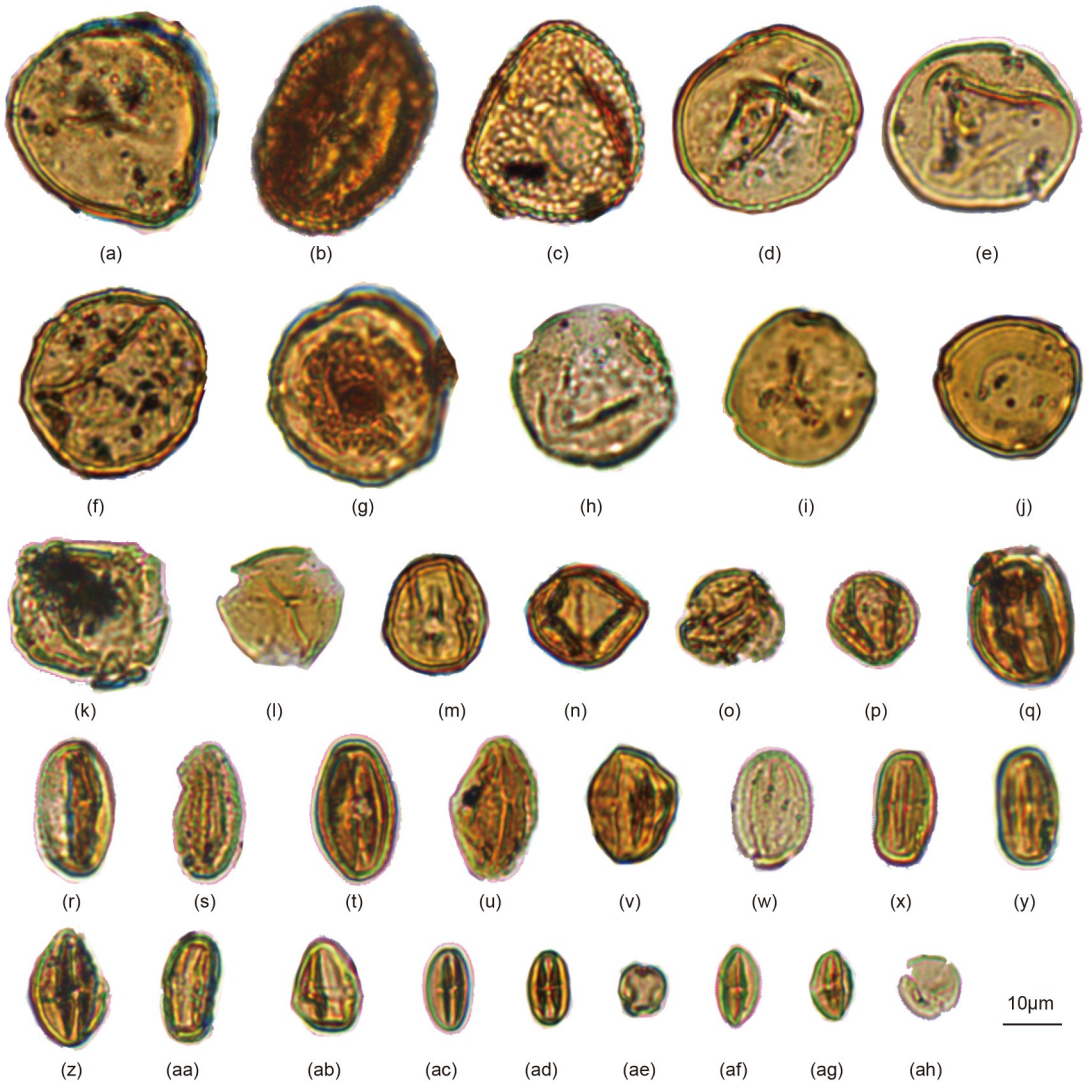


图 7　厂硐铅锌矿床内沉积物中的典型被子植物花粉照片

(a) 喙核桃属; (b) 马鞭草科; (c) 香蒲属; (d), (e), (h)~(j) 山核桃属; (f), (g) 榆属; (k) 楝科; (l) 蔷薇科; (m)~(p) 栎属; (q) 豆科; (r), (z) 大戟科; (s) 柳属; (t), (v), (ab) 芸香科; (u) 五加科; (w) 唇形科; (x), (y) 柯属; (aa) 伞形科; (ac)~(ae) 栗属; (af), (ag) 栲属; (ah) 玄参科

重要信息.

首先, 古岩溶的形成时代有效指示了厂硐矿床古溶洞发育的大地构造背景. 根据孢粉组合限定的早-中渐新世形成时代, 厂硐矿床的古岩溶作用并非形成于其围岩的成岩期(二叠纪; 图3), 而是形成于印度-欧亚大陆碰撞过程中(侯增谦等, 2006; Hou和Cook, 2009). 在印-亚大陆的持续汇聚和南北向挤压背景之下, 青藏高原(图1)于40~26Ma的晚碰撞阶段发育了陆内俯冲和地壳缩短, 其在地壳浅部体现为大规模的逆冲推覆和走滑断裂等构造活动(侯增谦等, 2006; Hou和Cook, 2009). 思茅盆地位于青藏高原东北缘三江构造转换带最南端(图1), 区内大规模褶皱逆冲推覆作用发生在晚始新世到晚渐新世(36~28Ma; 陈炳蔚等, 1991; 刘善印等, 1998; Deng等, 2014), 和厂硐铅锌矿床的古岩溶作用时间相当(早-中渐新世). 实际上, 这些大规模的逆冲推覆作用可以将深部碳酸盐岩地层抬升至近地表, 形成区域不整合, 导致碳酸盐岩地层被地下水溶解, 从而为后期的铅锌成矿作用提供良好的赋矿空间和控矿构造.

孢粉组合限定的铅锌成矿年龄上限为厂硐矿床的

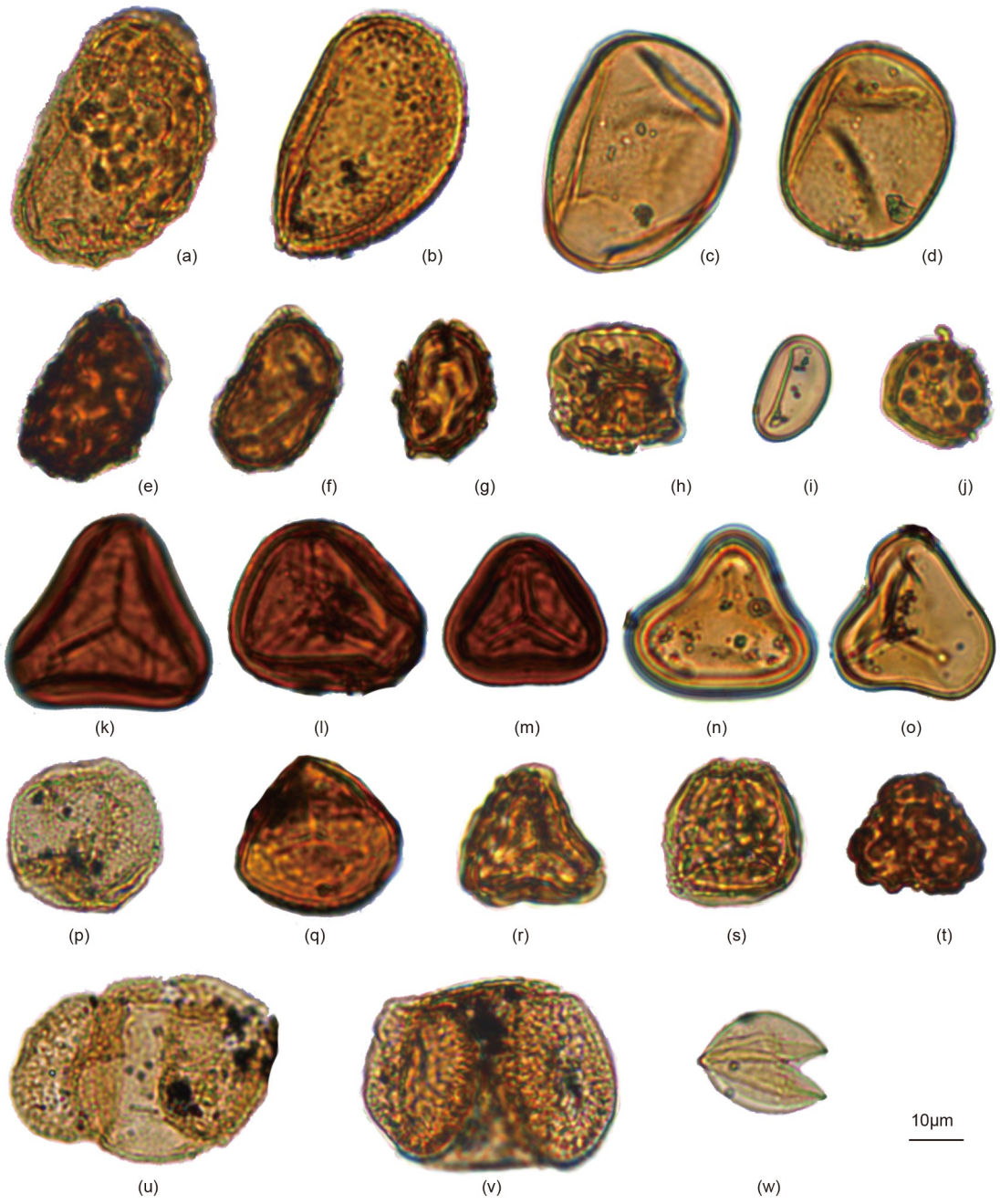


图 8　厂硐铅锌矿床内沉积物中典型的蕨类植物孢子和裸子植物花粉照片

(a)~(d), (h) 水龙骨科; (e)~(g), (i) 蹄盖蕨科; (j) 卷柏科; (k)~(m), (r), (s) 凤尾蕨属; (n) 里白科; (o) 桫椤科; (p) 紫萁属; (q) 膜蕨科; (t) 中国蕨科; (u), (v) 松属; (w) 杉科

成因机制和成矿大地构造背景提供了重要信息. 本次获得的厂硐铅锌矿化晚于早渐新世这一信息充分证明, 厂硐矿床是一个后生铅锌矿床. 结合其矿床地质特征, 包括: (1) 以灰岩为赋矿围岩; (2) 矿石矿物组合为低温胶状、粒状闪锌矿、方铅矿; (3) 主要成矿方式为铅锌硫化物交代内沉积物中的碳酸盐碎屑或充填内沉积物中开放空间, 说明厂硐铅锌矿床和世界上的多个MVT铅锌矿床相似(如Ohle, 1985; Sangster, 1988), 是

一种溶洞控制的MVT铅锌矿床. 但是, 它并非形成于传统的前陆背景, 而是形成在造山带的褶皱逆冲推覆构造体系中. 虽然逆冲断层并不直接控制厂硐铅锌成矿, 但其和矿化有着紧密联系, 主要表现在以下三个方面: (1) 逆冲推覆作用导致了厂硐矿床最重要的控矿构造——古喀斯特溶洞的形成; (2) 根据对三江带MVT矿床区域成矿的研究(Liu等, 2015, 2017), 逆冲推覆系统深部的拆离带可能为成矿流体的迁移提供了区域运移通道; (3) 逆冲推覆过程中产生的次级断裂在逆冲后的区域旋转过程中转换为伸展断层(季建清等, 2000; Sato等, 2007), 成为成矿流体从深部向矿区运移的通道, 直接控制了铅锌硫化物的沉淀.

综合上述, 本次通过孢粉化石研究获得的成矿时代限定证明了厂硐矿床是一个发育于褶皱逆冲推覆系统中的、受古喀斯特溶洞控制的MVT铅锌矿床, 其成矿过程和区域逆冲推覆构造活动密切相关.

5.3 对三江铅锌成矿带区域成矿作用的启示

三江铅锌成矿带的勘查和研究工作始于20世纪80年代, 最初主要集中在南段的兰坪盆地(例如, 施加辛等, 1983; 胡明安, 1989). 到21世纪, 一些工作逐渐将带内铅锌矿化的研究向北延伸(何龙清等, 2004; 侯增谦等, 2008), 提出从三江带南段兰坪盆地到北段沱沱河地区发育了由多个碳酸盐岩容矿的MVT铅锌矿床组成的铅锌成矿带(图1浅绿色部分). 这些研究指出, 三江带内这些铅锌矿床具有相似的铅锌矿化特征和成矿年龄(Xue等, 2007; Tian等, 2014; Song等, 2015; Liu等, 2016), 其成矿均同带内的褶皱逆冲推覆构造活动相关(He等, 2009; Liu等, 2011; Song等, 2015), 是形成于统一的成矿过程中的一套MVT铅锌矿床. 近些年来, 随着研究进一步展开, 人们在目前三江成矿带(图1浅绿色部分)的北侧和南侧又分别发现了一些新的碳酸盐岩容矿铅锌矿床, 例如北侧甜水海地区的火烧云超大型铅锌矿床和南侧思茅盆地萝卜山-厂硐铅锌矿集区(图1; 魏中林等, 2015; Li等, 2019). 但是, 由于缺失准确的成矿年龄证据, 并不能确定这些矿床是否同三江带内已知的MVT铅锌成矿作用为同一过程, 也无法确定现在的三江铅锌成矿带是否能向北或向南延伸.

本次对思茅盆地厂硐矿床铅锌成矿年龄的限定为三江铅锌成矿带向南延伸提供了明确证据. 厂硐矿床的铅锌成矿年龄上限和其矿床地质特征证明它是在印-亚大陆碰撞过程中形成的、受到褶皱逆冲推覆活动密切控制的MVT铅锌矿床, 同三江带中北部的MVT铅锌矿床特征完全一致(图1; 宋玉财等, 2011; Liu等, 2017). 虽然由于工作程度较弱, 厂硐矿床已探明的铅锌储量(李爽等, 2013)低于中北段铅锌矿床, 但是, 区内另有萝卜山(魏中林等, 2015)、岩脚(胡加昆等, 2019; 张权等, 2019)等相似矿床的发现, 反映了思茅盆地的MVT铅锌成矿潜力. 因此, 三江褶皱逆冲推覆系统内的MVT铅锌成矿带可向南延伸约500km进入思茅盆地内(图1深绿色部分). 在未来的工作中, 需要进一步关注思茅盆地内是否有其他类似MVT铅锌矿床的存在, 并且应思考三江MVT铅锌成矿带能否继续向南延伸进入东南亚的中南半岛(如老挝和泰国), 因为, 到目前为止, 这些地区的铅锌矿床还没得到充分重视(Diehl和Kern, 1981; 卢映祥等, 2009). 这些思考为三江带MVT铅锌矿床的找矿勘探工作指出了新的方向.

5.4 孢粉地质年代学在MVT铅锌矿床成矿作用中的应用

在本次研究中, 孢粉地质年代学为厂硐MVT铅锌矿床提供了有效的成矿时代限定, 但是, 并不是所有的MVT矿床都可以应用这一方法获得有效的年龄信息. 事实上, 孢粉地质年代学在MVT矿床中的应用需要在几个前提下进行. 首先, 矿床中应发育含孢粉化石的沉积物(或地层), 并且它们应同铅锌矿化有明确的时间关系. 在厂硐矿床, 铅锌矿化赋存于古喀斯特溶洞的内沉积层中, 其晚于内沉积层的发育, 故孢粉地质年代学可以在限定内沉积层时代的同时限定铅锌矿化时代的上限. 如果铅锌矿体赋存在发育孢粉化石的碎屑岩(如泥岩、粉砂岩等)中, 例如三江带的茶曲帕查铅锌矿床(图1; Song等, 2015), 同样可以将孢粉地质年代学应用其中. 但是, 如果铅锌矿化是赋存在热液溶洞的内沉积物中(如比利牛斯造山带的Beddiane铅锌矿床; Bouabdellah等, 1996)或是碳酸盐岩地层中(如三江带的东莫扎抓铅锌矿床, 图1; Liu等, 2011), 则无法应用孢粉地质年代学, 因为上述二者的围岩中都很难有孢粉化石的发育. 其次, 如引言所述, 所研究的MVT铅锌矿床应相对年轻, 且通过孢粉化石限定的成矿年龄上限也应相对年轻. 确定MVT铅锌矿床成矿年龄的最大意义就是明确其大地构造背景, 借以探讨其成矿过程. 孢粉地质年代学仅仅能够为MVT铅锌矿床提供成矿

年龄的上限, 因此, 只有在获得的这一上限年龄年轻到在其之后当地的大地构造背景一直未发生改变的情况下, 年龄的限定才对理解矿床的形成过程有本质作用. 例如, 本次厘定的厂硐矿床铅锌成矿时代上限为早渐新世, 而早渐新世之后区域上一直处于青藏高原碰撞造山过程中, 故成矿过程必定发生在这一背景下. 反之, 如果获得的成矿年龄上限相对较老, 老到这一年龄之后区域大地构造多次发生变化, 那么获得的年龄限制则不能发挥作用. 比如, 阿尔卑斯造山带上西里西亚地区的MVT铅锌矿床也曾通过孢粉化石被限定在三叠纪之后形成(Rybicki等, 2017), 但是, 三叠纪以后该区又分别发育了新特提斯洋的裂解和最终的碰撞造山两次构造事件(Richards, 2015), 所以难以判断铅锌成矿到底是发育在哪个背景之下, 难以厘清真正的铅锌成矿过程.

综上所述, 年轻构造背景下的、古喀斯特溶洞内沉积物容矿的、或者某些碎屑岩容矿的MVT铅锌矿床, 可以尝试应用孢粉地质年代学限定其成矿时代. 新特提斯巨型碰撞造山带内的一系列MVT铅锌矿床都属于上述类型, 例如喜马拉雅造山带三江带内的茶曲帕查、赵发勇、加膜山铅锌矿床(Song等, 2015; 刘英超等, 2019; Liu等, 2020), 阿尔卑斯造山带的Bleiberg和Lafatsch铅锌矿床(Bechstadt, 1978; Sass-Gustkiewicz等, 1982), 比利牛斯造山带的Les Malines和Reocin铅锌矿床(Le Guen等, 1991; Symons等, 2009)等. 虽然目前尚未在裂谷环境中发现适于应用孢粉地质年代学的相关矿床, 但是, 相信本次工作将对该环境中MVT矿床的研究带来启示.

6　结论

青藏高原三江铅锌成矿带厂硐铅锌矿床的古溶洞内沉积物中发育以栗属、栎属、山核桃属为主的被子植物花粉和以水龙骨科、凤尾蕨属、蹄盖蕨科为主的蕨类孢子, 研究区当时发育未发生植被分带的温暖湿润的常绿落叶阔叶混交林. 区域古气候和古植被类型对比分析表明, 本次孢粉组合最可能的形成时代为早-中渐新世, 从而限定厂硐铅锌矿床的内沉积物及古溶洞的形成均为上述时代. 厂硐铅锌矿床的矿石矿物赋存在内沉积物中, 以交代内沉积物中的碳酸盐碎屑或充填其内孔洞为主要成矿方式, 铅锌形成晚于内沉积物的沉积, 故铅锌矿化晚于早渐新世. 厂硐铅锌矿床是一个发育在褶皱逆冲体系中的、以古喀斯特溶洞为主要控矿构造、并同区域褶皱逆冲推覆作用密切相关的后生MVT铅锌矿床. 其成矿特征和成矿过程同三江成矿带中、北段的MVT铅锌矿床相似, 将三江褶皱逆冲系统赋矿的MVT铅锌成矿带向南延伸500km进入思茅盆地. 本次工作是应用孢粉地质年代学对MVT铅锌矿床成矿年龄限定的尝试, 研究结果反映了学科交叉在矿床研究中的有效应用. 在未来, 孢粉地质年代学可以尝试应用在年轻地质背景下由古喀斯特溶洞内沉积物容矿的、或一些碎屑岩容矿的MVT铅锌矿床中.

致谢　两位匿名审稿人提出了建设性修改意见, 野外工作得到了厂硐铅锌矿区全体工作人员的大力帮助, 中国地质大学(北京)郑倩宇完成了孢粉样品的预处理工作, 在此对上述单位及个人一并表示感谢.

参考文献

陈炳蔚, 李永森, 符振康. 1991. 金沙江构造带及邻区的构造变形特征. 见: 李廷栋, 主编. 青藏高原地质文集(21). 北京: 地质出版社. 222–234

戴自希. 2005. 世界铅锌资源的分布、类型和勘查准则. 世界有色金属, 3: 15–23

何龙清, 陈开旭, 余凤鸣, 魏君奇, 杨爱平, 李航. 2004. 云南兰坪盆地推覆构造及其控矿作用. 地质与勘探, 40: 7–12

侯增谦, 潘桂堂, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 丁林, 王二七, 高永丰, 谢玉玲, 曾普胜, 秦克章, 许继峰, 曲晓明, 杨志明, 杨竹森, 费红彩, 孟祥金, 李振清. 2006. 青藏高原碰撞造山带: 带原碰晚碰撞转换成矿作用. 矿床地质, 25: 521–543

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: 420–441

胡加昆, 邹进超, 解康, 倪尔建, 李贵祥, 李星. 2019. 云南省江城县岩脚-牛倮河铅锌矿矿床成因及找矿方向. 金属矿山, 515: 93–106

胡明安. 1989. 试论岩溶型铅锌矿床的成矿作用及其特点——以云南兰坪金顶矿床为例. 地球科学——中国地质大学学报, 14: 531–538

黄世强. 2019. 金顶超大型铅锌矿床有机流体与围岩/蒸发岩的相互作用及其对成矿的意义. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1–105

季建清, 钟大赉, 张连生. 2000. 滇西南新生代走滑断裂运动学、年代学及对青藏高原东南部块体运动的意义. 地质科学, 35: 336–

349

江彪. 2014. 三江南段兰坪-思茅盆地沉积岩容矿型铅锌成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 1–195

江小均, 王忠强, 李超, 郭忠林, 柴建华, 邱文龙, 王加昇. 2018. 滇东北会泽超大型铅锌矿Re-Os同位素特征及喜山期成矿作用动力学背景探讨. 岩矿测试, 37: 448–461

李建国. 1999. 山毛榉科植物的起源和地理分布. 见: 路安民, 主编. 种子植物科属地理. 北京: 科学出版社. 218–235

李爽, 宋楠, 胡永兴, 杨新强, 王小虎. 2013. 普洱宁洱厂硐-曼旭铅锌多金属矿矿床地质. 云南地质, 32: 247–249

李元美. 1988. 化石孢粉样品的化学溶解. 云南地质, 3: 99–103

李育, 王乃昂, 许清海, 李月丛, 阳小兰, 张振卿, 温锐林. 2007. 中国北方第四纪孢粉提取方法研究. 沉积学报, 25: 124–130

林尤兴. 2000. 水龙骨科(瓦韦亚科、石伟亚科). 见: 中国科学院昆明植物研究所, 主编. 中国植物志第六卷(第二分册). 北京: 科学出版社. 35–151

刘善印, 钟大赉, 吴根耀. 1998. 滇西南景谷-镇沅地区早第三纪陆-陆碰撞期走滑挤压盆地. 地质科学, 33: 1–8

刘英超, 杨竹森, 于玉帅, 马旺, 岳龙龙, 唐波浪. 2019. 西藏昌都赵发勇溶洞控矿MVT铅锌矿床地质特征与矿床成因. 地球学报, 40: 853–870

陆树刚. 2000. 水龙骨科(水龙骨亚科). 见: 中国科学院昆明植物研究所, 主编. 中国植物志第六卷(第二分册). 北京: 科学出版社. 13–26

卢映祥, 刘洪光, 黄静宁, 张宏远, 陈永清. 2009. 东南亚中南半岛成矿带初步划分与区域成矿特征. 地质通报, 28: 314–325

施加辛, 易凤煌, 文启錞. 1983. 兰坪金顶铅锌矿床的岩矿特征及成因. 云南地质, 2: 179–194, 276–280

宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 张洪瑞, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 王晓虎, 刘燕学, 薛传东, 王光辉, 李政. 2011. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型. 岩石矿物学杂志, 30: 355–380

宋之琛, 李曼英. 1976. 云南一些地区中生代及早第三纪早期的孢粉组合——云南禄丰、牟定晚白垩世早期及勐腊晚白垩世晚期至早第三纪早期孢粉组合. 见: 中国科学院南京地质古生物所, 主编. 云南中生代化石(上册). 北京: 科学出版社. 9–56

宋之琛, 钟碧珍. 1984. 云南景谷第三纪孢粉组合. 见: 中国科学院南京地质古生物研究所, 主编. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊第8号. 南京: 江苏科学技术出版社. 1–41

宋之琛. 1999. 晚白垩世和第三纪孢粉. 见: 宋之琛, 等, 编著. 中国孢粉化石第一卷. 北京: 科学出版社. 1–828

孙湘君. 1979. 中国晚白垩世-古新世孢粉区系的研究. 植物分类学报, 17: 8–21

唐永永, 毕献武, 武丽艳, 王雷, 邹志超, 和利平. 2013. 金顶铅锌矿黄铁矿Re-Os定年及其地质意义. 矿物学报, 33: 287–294

王伟铭. 2009. 中国孢粉学的研究进展与展望. 古生物学报, 48: 338–346

魏中林, 李波, 罗开, 杨恩祈, 王连磊, 赵春生. 2015. 云南普洱萝卜山铅锌矿床成矿流体中硫的来源与形成机制. 矿物学报, 35: 453–456

谢宇龙, 吴福莉, 方小敏. 2019. 云南新生代孢粉组合与气候环境演变. 海洋地质与第四纪地质, 39: 164–176

徐景先. 2002. 云南中西部地区晚第三纪孢粉植物群及其古植被和古气候研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院植物研究所. 1–168

徐永椿, 任宪威. 1979. 种子植物. 见: 中国科学院昆明植物研究所, 主编. 云南植物志(第二卷). 北京: 科学出版社. 1–889

杨振京, 许清海, 孟令尧, 阳小兰, 王开发. 2003. 燕山地区表土花粉与植被间的数量关系. 植物生态学报, 27: 804–809

张权, 郭世钊, 杨金彪, 王道会. 2019. 云南岩脚铅锌矿床地质特征及区域成矿作用对比. 有色金属(矿山部分), 71: 77–83

张绪敏. 1996. 滇西高原隆升及环境变迁. 硕士学位论文, 武汉: 中国地质大学(武汉)

周山富. 2000. 古孢粉学研究和应用. 杭州: 浙江大学出版社. 1–153

Basuki N I, Spooner E. 2004. A review of fluid inclusion temperatures and salinities in Mississippi Valley-type Zn-Pb deposits: Identifying thresholds for metal transport. Explor Min Geol, 11: 1–17

Bechstadt T. 1978. The lead-zinc deposit of Bleiberg-Kreuth (Carinthia, Austria): Palinspastic situation, paleogeography and ore mineralization. Verh Geol B-A, 3: 221–235

Bouabdellah M, Brown A C, Sangster D. 1996. Mechanisms of formation of internal sediments at the Beddiane lead-zinc deposit, Touissit mining district, northeastern Morocco. In: Sangster D F, ed. Carbonate-Hosted Lead-Zinc Deposit. Society of Economic Geologists, Special Publication No, 4: 356–363

Bouabdellah M, Sangster D F, Leach D L, Brown A C, Johnson C A, Emsbo P. 2012. Genesis of the Touissit-Bou Beker Mississippi Valley-type district (Morocco-Algeria) and its relationship to the Africa-Europe collision. Econ Geol, 107: 117–146

Bradley D C, Leach D L. 2003. Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands. Miner Depos, 38: 652–667

Brannon J C, Cole S C, Podosek F A, Ragan V M, Coveney Raymond M J, Wallace M W, Bradley A J. 1996a. Th-Pb and U-Pb dating of ore-stage calcite and Paleozoic fluid flow. Science, 271: 491–493

Brannon J C, Podosek F A, Cole S C. 1996b. Radiometric dating of Mississippi Valley-type ore deposits. In: Sangster D F, ed. Carbonate-Hosted Lead-Zinc Deposit. Society of Economic Geologists, Special Publication No, 4: 536–545

Brannon J C, Podosek F A, McLimans R K. 1992. Alleghenian age of the Upper Mississippi Valley zinc-lead deposit determined by Rb-Sr

dating of sphalerite. Nature, 356: 509–511
Chesley J T, Halliday A N, Kyser T K, Spry P G. 1994. Direct dating of Mississippi Valley-type mineralization: Use of Sm-Nd in fluorite. Econ Geol, 89: 1192–1199
Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, Fan J X. 2013. The ICS international chronostratigraphic chart. Episodes, 36: 199–204
Cooke D R, Bull S W, Large R R, McGoldrick P J. 2000. The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits. Econ Geol, 95: 1–18
Deng J, Wang Q, Li G, Santosh M. 2014. Cenozoic tectono-magmatic and metallogenic processes in the Sanjiang region, southwestern China. Earth-Sci Rev, 138: 268–299
Diehl P, Kern H. 1981. Geology, mineralogy, and geochemistry of some carbonate-hosted lead-zinc deposits in Kanchanaburi Province, western Thailand. Econ Geol, 76: 2128–2146
Dublyansky Y. 2013. Karstification by geothermal waters. In: Shroder J, Frumkin A, eds. Treatise on Geomorphology. San Diego, CA: Academic Press. 57–71
Dżułyński S, Kubicz A. 1971. Recrystallized and disaggregated limestones in the Triassic of Silesia. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego, 41: 521–530
Emsbo P. 2000. Gold in sedex deposits. Rev Econ Geol, 13: 427–437
Ford D. 1988. Characteristics of dissolutional cave systems in carbonate rocks. In: James N P, Choquette P W, eds. Paleokarst. New York: Springer. 25–57
Grandia F, Asmerom Y, Getty S, Cardellach E, Canals À. 2000. U-Pb dating of MVT ore-stage calcite: Implications for fluid flow in a Mesozoic extensional basin from Iberian Peninsula. J Geochem Explor, 69-70: 377–380
Hagni R D. 1986. A summary of the geology of the ore deposits of the Tri-State district, Missouri, Kansas, and Oklahoma. In: Hagni R D, ed. Guidebook to the Geology and Environmental Concerns in the Tri-State Lead-Zinc District, Missouri, Kansas, and Oklahoma. Joplin, Missori: Association of Missouri Geologists. 30–46
He L Q, Song Y C, Chen K X, Hou Z Q, Yu F M, Yang Z S, Wei J Q, Li Z, Liu Y C. 2009. Thrust-controlled, sediment-hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag deposits in the Lanping foreland fold belt, eastern margin of Tibetan Plateau. Ore Geol Rev, 36: 106–132
Hnatyshin D, Creaser R A, Wilkinson J J, Gleeson S A. 2015. Re-Os dating of pyrite confirms an early diagenetic onset and extended duration of mineralization in the Irish Zn-Pb ore field. Geology, 43: 143–146
Hou Z Q, Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue. Ore Geol Rev, 36: 2–24
Hou Z, Zaw K, Pan G, Mo X, Xu Q, Hu Y, Li X. 2007. Sanjiang Tethyan metallogenesis in S.W. China: Tectonic setting, metallogenic epochs and deposit types. Ore Geol Rev, 31: 48–87
Jiang S Y, Slack J F, Palmer M R. 2000. Sm-Nd dating of the giant Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia. Geology, 28: 751–754
Kelley K D, Selby D, Falck H, Slack J F. 2017. Re-Os systematics and age of pyrite associated with stratiform Zn-Pb mineralization in the Howards Pass district, Yukon and Northwest Territories, Canada. Miner Depos, 52: 317–335
Kendall D L. 1960. Ore deposits and sedimentary features, Jefferson City Mine, Tennessee. Econ Geol, 55: 985–1003
Le Guen M, Orgeval J J, Lancelot J. 1991. Lead isotope behaviour in a polyphased Pb-Zn ore deposit: Les Malines (Cévennes, France). Mineral Depos, 26: 180–188
Leach D L, Bradley D, Lewchuk M T, Symons D T, de Marsily G, Brannon J. 2001. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits through geological time: Implications from recent age-dating research. Miner Depos, 36: 711–740
Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, Large R R, Garven G, Allen C R, Gutzmer J, Walters S. 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: A global perspective. Econ Geol, 100: 561–607
Leach D L, Song Y C, Hou Z Q. 2017. The world-class Jinding Zn-Pb deposit: Ore formation in an evaporite dome, Lanping Basin, Yunnan, China. Miner Depos, 52: 281–296
Leach D L, Song Y C. 2020. Sediment-hosted zinc-lead and copper deposits in China. Soc Econ Geol Spec Publ, 22: 325–409
Li H, Xu X W, Borg G, Albert Gilg H, Dong L H, Fan T B, Zhou G, Liu R L, Hong T, Ke Q, Wu C, Zhang G, Li H. 2019. Geology and Geochemistry of the giant Huoshaoyun zinc-lead deposit, Karakorum Range, northwestern Tibet. Ore Geol Rev, 106: 251–272
Li W B, Huang Z L, Yin M D. 2007. Dating of the giant huize Zn-Pb ore field of Yunnan Province, Southwest China: Constraints from the Sm-Nd system in hydrothermal calcite. Resour Geol, 57: 90–97
Liebke U, Appel E, Ding L, Zhang Q. 2013. Age constraints on the India-Asia collision derived from secondary remanences of Tethyan Himalayan sediments from the Tingri area. J Asian Earth Sci, 62: 329–340
Liu H G. 2017. Research progress in metallogenic chronology of Mississippi Valley-type (MVT) Pb-Zn deposits. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Abstract
Liu Y C, Hou Z Q, Yang Z S, Tian S H, Song Y C, Yu Y S, Ma W. 2016. Geology and chronology of the Zhaofayong carbonate-hosted Pb-Zn ore cluster: Implication for regional Pb-Zn metallogenesis in the Sanjiang belt, Tibet. Gondwana Res, 35: 15–26
Liu Y C, Hou Z Q, Yang Z S, Tian S H, Yang T N, Song Y C, Zhang H

R, Carranza E J M. 2011. Formation of the Dongmozhazhua Pb-Zn deposit in the thrust-fold setting of the Tibetan plateau, China: Evidence from fluid inclusion and stable isotope data. Resour Geol, 61: 384–406

Liu Y C, Kendrick M A, Hou Z Q, Yang Z S, Tian S H, Song Y C, Honda M. 2017. Hydrothermal fluid origins of carbonate-hosted Pb-Zn deposits of the Sanjiang Thrust Belt, Tibet: Indications from noble gases and halogens. Econ Geol, 112: 1247–1268

Liu Y C, Song Y C, Fard M, Zhou L M, Hou Z Q, Kendrick M A. 2019. Pyrite Re-Os age constraints on the Irankuh Zn-Pb deposit, Iran, and regional implications. Ore Geol Rev, 104: 148–159

Liu Y C, Yang Z S, Tian S H, Song Y C, Zhang H R. 2015. Fluid origin of fluorite-rich carbonate-hosted Pb-Zn mineralization of the Himalayan-Zagros collisional orogenic system: A case study of the Mohailaheng deposit, Tibetan Plateau, China. Ore Geol Rev, 70: 546–561

Liu Y C, Yang Z S, Yue L L, Yu Y S, Ma W, Tang B L. 2020. The geological characteristics and genesis of the Jiamoshan MVT Pb-Zn Deposit, Sanjiang belt, Tibetan Plateau. Acta Geol Sin-Engl Ed, 94: 1238–1255

Machel H G. 2001. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings—Old and new insights. Sediment Geol, 140: 143–175

Mo X, Niu Y, Dong G, Zhao Z, Hou Z, Zhou S, Ke S. 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet. Chem Geol, 250: 49–67

Nakai S, Halliday A N, Kesler S E, Jones H D. 1990. Rb-Sr dating of sphalerites from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley type ore deposits. Nature, 346: 354–357

Ohle E L. 1985. Breccias in Mississippi Valley-type deposits. Econ Geol, 80: 1736–1752

Ostendorf J, Henjes-Kunst F, Mondillo N, Boni M, Schneider J, Gutzmer J. 2015. Formation of Mississippi Valley-type deposits linked to hydrocarbon generation in extensional tectonic settings: Evidence from the Jabali Zn-Pb-(Ag) deposit (Yemen). Geology, 43: 1055–1058

Richards J P. 2015. Tectonic, magmatic, and metallogenic evolution of the Tethyan orogen: From subduction to collision. Ore Geol Rev, 70: 323–345

Rieger P, Magnall J M, Gleeson S, Rocholl A, Lilly R. 2019. The importance of biological productivity for the formation of the George Fisher Zn-Pb-Ag deposit, Queensland, Australia. 15th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits Abstract

Rowan E L, de Marsily G. 2001. Infiltration of Late Palaeozoic evaporative brines in the Reelfoot rift: A possible salt source for Illinois basin formation waters and MVT mineralizing fluids. Pet Geosci, 7: 269–279

Rybicki M, Marynowski L, Stukins S, Nejbert K. 2017. Age and origin of the well-preserved organic matter in internal sediments from the Silesian-Cracow Lead-Zinc deposits, Southern Poland. Econ Geol, 112: 775–798

Sangster D F. 1988. Breccia-Hosted Lead-Zinc Deposits in Carbonate Rocks. In: James N P, Choquette P W, eds. Paleokarst. New York: Springer. 102–116

Sass-Gustkiewicz M, Dzulynski S, Ridge J D. 1982. The emplacement of zinc-lead sulfide ores in the Upper Silesian District; a contribution to the understanding of Mississippi Valley-type deposits. Econ Geol, 77: 392–412

Sato K, Liu Y, Wang Y, Yokoyama M, Yoshioka S, Yang Z, Otofuji Y. 2007. Paleomagnetic study of Cretaceous rocks from Pu'er, western Yunnan, China: Evidence of internal deformation of the Indochina block. Earth Planet Sci Lett, 258: 1–15

Shaw R B, Volman K C, Smeins F E. 1982. Modern pollen rain and vegetation on the Edwards plateau, Texas. Palynology, 4: 205–213

Song Y C, Liu Y C, Hou Z Q, Fard M, Zhang H R, Zhuang L L. 2019. Sediment-hosted Pb-Zn deposits in the Tethyan domain from China to Iran: Characteristics, tectonic setting, and ore controls. Gondwana Res, 75: 249–281

Song Y C, Yang T N, Zhang H R, Liu Y C, Hao H D, Li Z. 2015. The Chaqupacha Mississippi Valley-type Pb-Zn deposit, central Tibet: Ore formation in a fold and thrust belt of the India-Asia continental collision zone. Ore Geol Rev, 70: 533–545

Spurlin M S, Yin A, Horton B K, Zhou J, Wang J. 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syncollisional igneous activity, east-central Tibet. Geol Soc Am Bull, 117: 1293–1317

Symons D T A, Arne D C. 2003. Paleomagnetic dating of mineralization in the Kapok MVT deposit, Lennard Shelf, Western Australia. J Geochem Explor, 78-79: 267–272

Symons D T A, Lewchuk M T, Kawasaki K, Velasco F, Leach D L. 2009. The Reocín zinc-lead deposit, Spain: Paleomagnetic dating of a late Tertiary ore body. Miner Depos, 44: 867–880

Tian S H, Gong Y L, Yang Z S, Hou Z Q, Liu Y C, Song Y C, Xue W W, Lu H F, Wang F C, Zhang Y B. 2014. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of the Dongmozhazhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in the Yushu area, southern Qinghai and their geological implications. Acta Geol Sin-Engl Ed, 88: 558–569

Velasco F, Herrero J M, Yusta I, Alonso J A, Seebold I, Leach D. 2003. Geology and geochemistry of the Reocín zinc-lead deposit, Basque-Cantabrian basin, Northern Spain. Econ Geol, 98: 1371–1396

Wilkinson J J. 2014. Sediment-Hosted Zinc-Lead Mineralization: Processes and Perspectives. In: Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry, Second Edition. Oxford: Elsevier. 219–249

Xu J X, Ferguson D K, Li C S, Wang Y F. 2008. Late Miocene vegetation and climate of the Lühe region in Yunnan, southwestern China. Rev Palaeobot Palynol, 148: 36–59

Xue C J, Zeng R, Liu S W, Chi G X, Qing H R, Chen Y C, Yang J M, Wang D H. 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, South China: A review. Ore Geol Rev, 31: 337–359

Yang T N, Liang M J, Fan J W, Shi P L, Zhang H R, Hou Z H. 2014. Paleogene sedimentation, volcanism, and deformation in eastern Tibet: Evidence from structures, geochemistry, and zircon U-Pb dating in the Jianchuan Basin, SW China. Gondwana Res, 26: 521–535

Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. Annu Rev Earth Planet Sci, 28: 211–280

Zhang B, Zhang J, Zhong D. 2010. Structure, kinematics and ages of transpression during strain-partitioning in the Chongshan shear zone, western Yunnan, China. J Struct Geol, 32: 445–463

Zhang H R, Yang T N, Hou Z Q, Song Y C, Liu Y C, Yang Z S, Tian S H. 2017. Structural controls on carbonate-hosted Pb-Zn mineralization in the Dongmozhazhua deposit, central Tibet. Ore Geol Rev, 90: 863–876

Zhang Q Q, Ferguson D K, Mosbrugger V, Wang Y F, Li C S. 2012. Vegetation and climatic changes of SW China in response to the uplift of Tibetan Plateau. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 363-364: 23–36

(责任编委: 李建威)