

中国南方碳酸盐岩系层滑断裂控矿和成矿研究

钱建平, 吴正鹏, 唐专武, 徐磊, 贾玉衡

QIAN Jianping, WU Zhengpeng, TANG Zhuanwu, XU Lei, JIA Yuheng

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541004

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China

摘要:碳酸盐岩系层滑断裂在中国南方古生代地层中广泛分布,是一种重要的控矿和成矿构造。厘定碳酸盐岩系层滑断裂的基本类型、形成机理和控矿作用对相关矿床的找矿具有重要意义。基于层滑断裂所属含矿岩系的岩性组合、构造样式及其与主干断裂的相互关系,初步将层滑断裂划分为4种基本类型,即碳酸盐岩与泥页岩界面+层滑断裂复合型,平行不整合面+层滑断裂复合型,逆冲推覆构造台阶式断层断坡+断坪复合型和陡倾斜主干断层+旁侧缓倾斜层滑断裂复合型,分别总结了不同类型层滑断裂的控矿特征,并列举其典型的矿床实例,讨论了层滑断裂的控矿作用和成矿作用,将层滑断裂的形成过程归纳为层间滑动、层滑断层、叠加断层3个阶段。

关键词:碳酸盐岩;层滑断裂;基本类型;控矿作用;成矿作用

中图分类号:P588.24⁺4;P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)11-1850-08

Qian J P, Wu Z P, Tang Z W, Xu L, Jia Y H. Ore-controlling and metallogenic role of interlayer-slide fault in the carbonate formation, southern China. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1850-1857

Abstract: The interlayer-slide faults in the carbonate series are widely distributed in the Paleozoic strata in southern China. These faults constitute an important ore-controlling and forming structure. Determining the basic types, formation mechanism, and ore-controlling effects of the interlayer-slide faults is of great significance in the search for related deposits. Based on the lithological combination of the ore-bearing rock series, structural style and the relationship with the main fault, the authors divided the interlayer-slide faults into four basic types: the compound type of carbonate and shale boundary with interlayer-slide fault, the unconformities boundary with interlayer-slide fault, the thrusting nappe structure with stepped ramp and flat, and steeper slope master fault with gently inclined secondary interlayer-slide faults. The ore-controlling characteristics of different types of interlayer faults and typical examples were introduced and the roles of interlayer faults in ore-controlling and metallogenic process was discussed. Three stages of the formation of the interlayer-slide fault were summarized, which are slide fault in interlayer, interlayer-slide fault and superimposed fault.

Key words: carbonate; interlayer-slide fault; basic type; ore-controlling functions; metallogenesis

对大陆地壳结构的地质和地球物理研究表明,岩石圈由一系列不同级次的圈层组成,表现在结构上具有明显的垂向不均一性,当受到地应力作用时,相邻的圈层之间发生滑动、脱离的现象,形成各种滑脱构造。滑脱面的类型多种多样,规模大小不

一,如地壳与上地幔界面、盖层与基底界面、不整合界面、不同岩系界面、不同岩性界面、高塑性层、低密度低速层等。其共同的特点是,这些界面强度较低,剪应变较高。一旦在这些界面上发生滑脱作用,这些滑脱界面的性质将与断层面类似,因此滑

收稿日期:2020-03-10;修订日期:2020-06-05

资助项目:国家自然科学基金项目《桂林地区碳酸盐岩层滑断裂构造地球化学系统的特征和动力分异机制》(批准号:41263003)和中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室开放基金项目《山东焦家金矿带构造控矿规律研究和构造地球化学找矿》(编号:200913)

作者简介:钱建平(1953-),男,教授,博士生导师,从事成矿构造和构造地球化学研究。E-mail:jqpqian@163.com

脱界面也可称为层滑断裂。尤其是在上地壳,滑脱变形十分普遍,形成深浅不一、长短各异和断续延伸的层滑断裂系。依其性质可分为狭义上局限于层间的拉张型和挤压型层滑断裂,以及广义上包括顺层、切层结合的伸展,以及重力作用形成的铲式断层和挤压逆掩推覆断层^[1]。

中国南方古生代以来发育一套近万米的以碳酸盐岩为主、兼有砂岩与泥质岩夹层或互层的沉积岩系,不同层位岩性软硬相间,区域上层滑断裂广泛发育。通过物理模拟实验可以再现多层推滑构造系的形成和演化过程。在挤压应力背景下,岩石发生逆冲推覆,能干性层在非能干性层上滑脱、变形,形成断坪—断坡逆冲推覆变形构造^[2]。

碳酸盐岩系层滑断裂是一种基本的和重要的控矿构造类型,区域性多层次的滑脱界面控制了中国不少重要的金银多金属矿床的产出和定位。其典型矿床如:产于广西泗顶泥盆系与寒武系不整合面之上的中—上泥盆统碳酸盐岩层间滑动带中的层状、似层状铅锌矿体^[3],产于长江中下游一带上泥盆统五通组—中三叠统碎屑岩—碳酸盐岩系中的层间砂卡岩型铁铜矿^[4-10],产于广东凡口上泥盆统天子岭组顶部—中上石炭统壶天群底部不纯碳酸盐岩界面及层滑断裂中的铅锌矿体^[11-12],产于黔西南二叠系茅口组碳酸盐岩与龙潭煤系之间的不整合界面及层间断裂中的微细浸染型金矿^[13-15],产于桂

西北高龙石炭系—二叠系碳酸盐岩与中三叠统百逢组细碎屑岩层滑断裂面之上的透镜状金矿体等,不胜枚举。因此,研究和总结此类断层的控矿和成矿作用具有重要的理论和现实意义。

1 层滑断裂的类型及控矿特征

按层滑断裂典型的剖面结构,初步可分为 4 种主要类型(表 1)。

(1)碳酸盐岩与泥页岩界面+层滑断裂复合型。如长江中下游一带的铁铜矿^[4-10],广西大厂矿田黑水沟—大树脚砂卡岩型锌铜矿等^[16]。该类型层滑断裂及相关矿床分布最普遍。由于在地层剖面上不同岩性界面具多层次性,层滑断裂及矿化亦具多层次性。矿体产状和形态与层滑断裂一致,矿体厚度在层滑断裂虚脱部位明显增大(图 1)^[7]。

(2)平行不整合面+层滑断裂复合型。如贵州戈塘金矿、板其金矿等矿床。在滇黔桂地区,该类型金矿化分布具有一定的区域性。矿体的产出受层滑断裂和古岩溶不整合面双重控制,层滑断裂既是导矿构造亦是容矿构造。矿体形态呈似层状、透镜状或漏斗状。由于底板茅口组灰岩古喀斯特风化面呈波状起伏变化,构造蚀变带和矿体的形态及厚度变化亦较大。一般在古喀斯特风化面凸起的位置矿体及蚀变带厚度较薄,在古喀斯特风化面凹陷位置,矿体及蚀变带厚度增大,富矿体形态受下

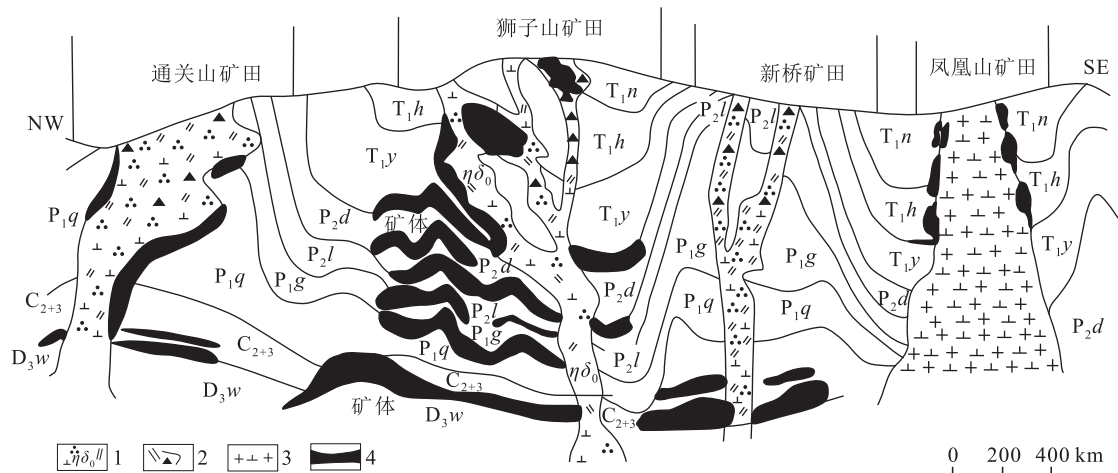


图 1 铜陵矿集区重要矿田构造分层成矿特征示意图

Fig. 1 Diagram of structural layered ore-forming characteristics of the major orefields in the Tongling ore concentration area

T_{1n}—南陵湖组灰岩;T_{1h}—和龙山组条带状灰岩;T_{1y}—殷坑组钙质泥页岩;P_{2d}—大隆组硅质岩;P_{2l}—龙潭组长石石英砂岩;

P_{1g}—孤峰组灰岩、硅质岩;P_{1q}—栖霞组硅质灰岩;C₂₊₃—中上石炭统白云质灰岩、生屑微晶灰岩;

D_{3w}—五通组页岩、泥岩石英砂岩;1—石英二长闪长岩;2—角砾岩;3—花岗闪长岩;4—矿层

表 1 碳酸盐岩系层滑断裂矿床实例
Table 1 Example of the deposit of the interlayer-slide fault in the carbonate formation

矿床名称	赋矿地层	岩性组合	控矿构造	矿体特征	矿物组合	矿石结构构造	蚀变特征	构造控矿作用	构造-变形序列
铜陵狮子山砂卡岩型铜矿床	上泥盆统五通组一下三叠统南陵湖组共6个层位,其中中石炭统黄龙组矿化最集中	砂岩、页岩、碳酸盐岩、硅质岩等	多层次层滑断裂系	多呈层状、似层状	金属矿物为磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、银金矿、自然金等; 非金属矿物为石榴子石、透辉石、石英及方解石等	块状、浸染状、脉状、条带状与条纹状构造;自形晶粒状、交代结构等 形-他形粒状、交代结构等	砂卡岩化、钾化、硅化、绿泥石化、绿帘石化和绢云母化	多层次楼控矿模式:多重多层滑脱构造控制多层状矿体,2期滑脱构造叠加部位控制了花树坡、老岭岭矿床是上泥盆统和中上石炭统含碳酸盐黄铁矿、菱铁矿、石膏层的特殊岩性层提供了铜金溶液沉淀有利的地球化学障壁	矿区主体构造演化表现为:印支期北东向褶皱→燕山早期东西向褶皱,不同方位、性质的构造变形复合叠加促进多方向多层次滑脱 ^[8] ,表现在北东向褶皱枢纽的波状起伏和褶皱面上的多向擦痕 ^[9]
贵州戈塘金矿床	下二叠统茅口组、上二叠统龙潭组	粉砂岩、粉砂质粘土岩、炭质粘土岩、硅化灰岩、硅化角砾岩	平行不整合面与层滑断裂组合	矿体产状平缓,呈层状、似层状	金属矿物以黄铁矿、辉钨矿、褐铁矿为主,毒砂、雄黄、雌黄、铜蓝次之; 非金属矿物以萤石、石英、石膏、方解石为主	角砾状、块状、浸染状、晶洞状、网脉状、土状构造等;胶状环带、泥质、土状、假象结构	硅化、黄铁矿化、褐铁矿化、辉钨矿化、萤石化为主,高岭土化、碳酸盐化、雄黄化等次之	层滑+岩溶不整合面双重控矿模式:矿体产出部位受层滑断裂和古岩溶不整合面双重控制,下二叠统灰岩之上岩溶不整合面为主滑面。层滑断裂既是导矿构造亦是容矿构造,富矿体形态受下二叠统茅口组岩溶凹陷控制。上二叠统龙潭组富碳质层提供了含金溶液沉淀有利的地球化学障壁	矿区印支晚期北东向挤压→燕山早期北西向挤压,2期构造叠加形成戈塘穹窿构造 ^[14] ,表现在层滑断裂带出现一系列北西向叠瓦式断裂和面理 ^[15] 。燕山晚期北西向正滑层滑断裂张开为含金溶液充填提供了有利的空间,表现在矿体产状变陡处厚度显著增大 ^[21] ,矿体内部广泛发育的角砾状 ^[22] 、晶洞状和网脉状构造
贵州紫木岗金矿床	上二叠统龙潭组、下三叠统夜郎组	砂岩、粉砂岩、泥岩、灰岩和白岩	逆冲推覆式断坡+断坪复合型	似层状、层状、透层状、透镜状	金属矿物主要有黄铁矿、毒砂、白铁矿、雄黄、雌黄、闪锌矿、辉钨矿等; 非金属矿物主要有石英、方解石、白云石、白云母、萤石、玉髓、粘土矿物等	星散浸染状、脉状、网脉状、晶洞状、生物遗迹、角砾状、条纹状构造等; 他形、假象、胶状、交代残余、环带状、重结晶、包含、压碎、草莓状结构等	硅化、白云石化、黄铁矿化为主,毒砂化、雄(雌)黄化、萤粘土化、萤石化等次之	台阶式逆冲推覆断层面成矿模式:由上部上二叠统龙潭煤系地层顺层滑动形成的层滑断裂——断坪控矿(层控)和上部上二叠统大隆组长兴组灰岩穿层形成的逆冲断层面——断坡控矿(断控)。兼具导矿和容矿作用,但断层面不同部位产状不同,控矿特征差异较大。煤系地层提供富硫富碳的有利环境和矿液运移的屏蔽盖层	矿区印支晚期北东向挤压形成灰家堡短轴背斜及伴生的北西向逆冲推覆构造系统;燕山早期北西向挤压,使北西向断裂张开为含金溶液充填
广东凡口铅锌矿床	中泥盆统桂头组、梓潼组、泥盆统余田桥组、石炭统山组	变质碎屑岩、灰岩、碳酸盐岩	主断裂之旁侧层滑断裂系	似层状、透层状、楔状、脉状、不规则块状等	金属矿物主要有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿等; 非金属矿物:石英、绢云母、方解石、白云石等	浸染状、层纹状、变形层纹状、条带状、不规则脉状、细脉网脉状、块状、斑点状、复杂环带状、角砾状; 自形晶粒状、半自形晶粒状、他形晶粒状、显微球粒、定向乳滴状、定向叶片状、包含、交代溶蚀、交代残余、细脉网脉交代、骸晶、斑状变晶、变胶状结构	方解石化、白云石化、菱铁矿化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化	陡倾斜主断裂与缓倾斜层滑断裂交错组合控矿模式:以F ₃ 为代表的北东陡倾斜断裂作为主要的导矿构造控制了矿带的展布,其两侧的层间滑动构造控制了矿体的定位,与陡倾斜断裂交接部位形成富厚矿体,远离则变薄以致失火。早期沉积的硫铁矿层为铅锌矿液沉淀提供了富硫富铁的矿源层条件	海西—印支期北东向挤压形成矿区北西向一组倾伏褶皱及伴生层间滑动构造系统;燕山期北东陡倾斜向挤压形成一组北东陡倾斜断裂,含铅锌热液沿F ₃ 、F ₄ 、F ₅ 、F ₆ 等北东向断裂上侵,在断裂邻侧的层间断裂和虚脱部位交代充填成矿 ^[2,3,1]

二叠统茅口组岩溶凹陷控制(图 2)^[15]。

(3) 台阶式逆冲推覆断层断坡+断坪复合型。如皖南台阶式逆冲断层控矿^[17-18], 贵州紫木函金矿床的断坡、断坪控矿^[19-20]等(图 3)。台阶式逆冲推覆构造由长而平的断坪与连结其间的短而陡的断坡交替构成。台阶式断层实质是逆冲断层位移过程中在遭遇不同物性层时作顺层和切层运动的表现。台阶式逆冲推覆断层兼具导矿和容矿作用, 其中断坡和断坪均可控矿(如紫木函金矿和水银洞金

矿), 或者仅表现为断坪控矿(如泥堡金矿)或断坡控矿(如烂泥沟金矿)。由于控矿主构造规模大且直接控制矿体, 通常矿化和蚀变带规模较大。但由于断层不同构造部位产状不同, 在成矿期构造应力场作用下扩容程度不同, 控矿特征差异亦较大。

(4) 陡倾斜主干断层+旁侧层滑断裂复合型。如广东凡口铅锌矿等(图 4)。铅锌矿化位于主断裂附近, 以 F_3 为代表的一组北北东向陡倾斜断裂作为主要的导矿构造控制了矿带的展布, 其旁侧早期的

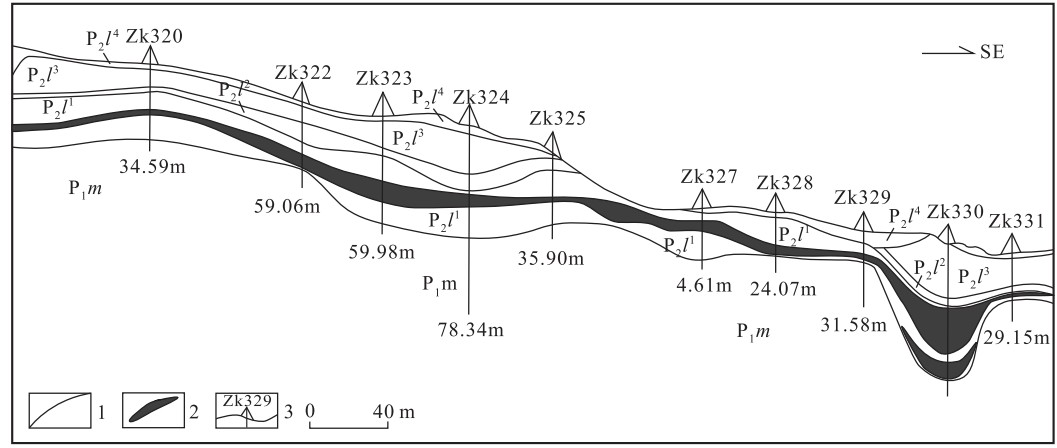


图 2 戈塘金矿矿体产出特征

Fig. 2 The occurrence characteristics of orebody of the Getang gold deposit

P_2l^4 、 P_2l^3 、 P_2l^2 、 P_2l^1 —龙潭组第四、三、二、一段; P_1m —茅口组; 1—地层界线; 2—金矿体; 3—钻孔及编号

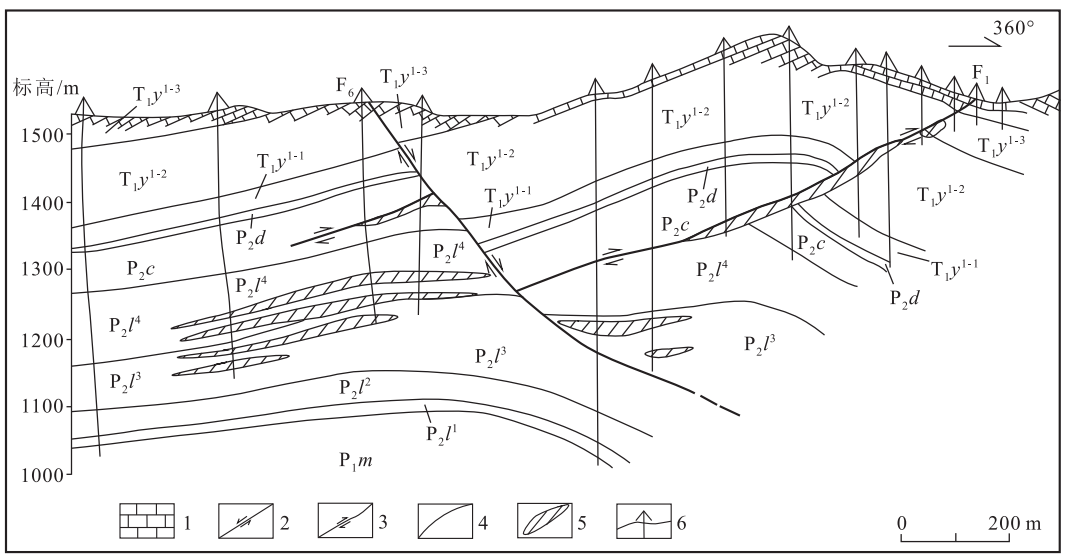


图 3 紫木函金矿区 32 线勘探剖面(据参考文献[19]修改)

Fig. 3 Geological section along No. 32 exploration line in the Zimudang gold deposit

T_1y^{1-3} 、 T_1y^{1-2} 、 T_1y^{1-1} —夜郎组第一段第三、第二、第一层; P_2d —大隆组; P_2c —长兴组; P_2l^4 、 P_2l^3 、 P_2l^2 、 P_2l^1 —龙潭组第四、第三、第二、第一段; P_1m —茅口组; 1—灰岩; 2—正断层; 3—逆冲断层; 4—地层界线; 5—金矿体; 6—勘探线

层间滑动构造作为容矿构造,控制了矿体的定位。矿体数量多,单个矿体规模小,但其中不乏有较大矿体出现^[11-12]。层滑(断裂)构造与陡倾斜断裂交接部位矿体密集,往往形成富厚矿体,随远离陡倾斜断裂矿体稀疏,厚度变薄以致尖灭。

2 层滑断裂的控矿作用和成矿作用

层滑断裂控矿实际是层滑断裂构造-岩石系统

控矿,其控矿作用的表现亦是多方面的。

层滑断裂作为岩性界面,其中碳酸盐岩和砂岩为强岩层,以脆性破裂变形为主,常形成顺层破碎带,故渗透性强,一方面为成矿溶液提供了运输通道,另一方面有利于成矿溶液与断层破碎带岩石的水-岩相互作用,形成构造蚀变带,如高龙金矿、戈塘金矿的层状硅化岩,长江中下游铁铜矿的层状砂卡岩;泥灰岩、泥页岩为弱岩层,以塑性变形为特

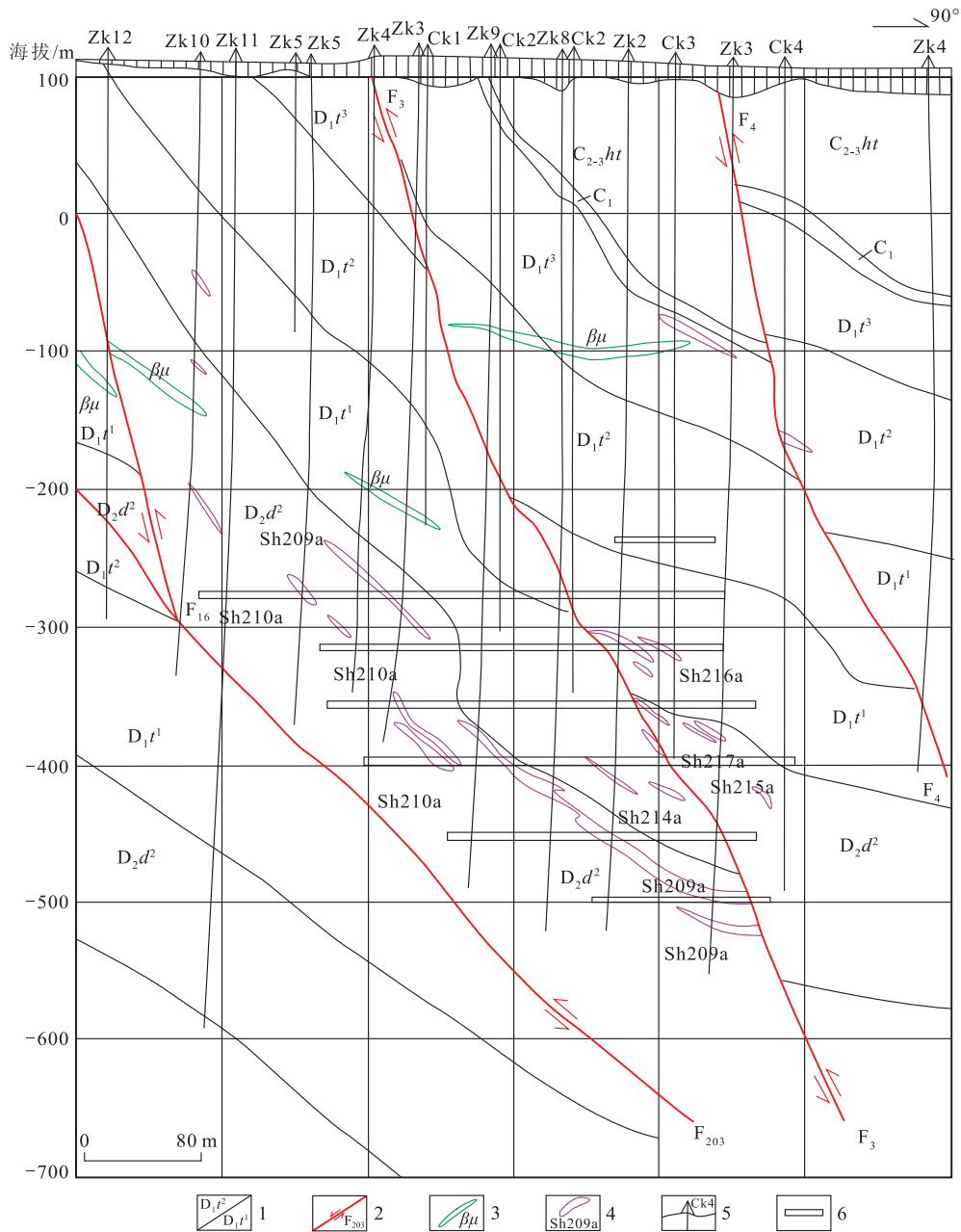


图4 凡口矿区208号勘探线地质剖面^[12]

Fig. 4 Geological section along No. 208 exploration line in the Fankou gold deposit

1—天子岭组中亚组与下亚组分界线;2—断层及编号;3—辉绿岩脉;4—矿体及编号;5—钻孔及编号;6—探矿穿脉

征,通常出现劈理和揉皱,使岩石渗透性差,为成矿溶液运移提供了良好的屏蔽盖层,避免矿液的逸散。多层次滑动还容易形成多层虚脱扩容空间,为矿质沉淀提供良好的储存场所。

当上覆弱岩层为煤系地层时,煤岩和炭质层就不仅仅限于顶板的屏蔽作用,可以提供富硫富碳的还原环境,作为地球化学障壁,非常有利于金和硫化物的沉淀。如广西高龙金矿体中的黄铁矿($\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 5.695‰)与上覆中三叠统百逢组炭质泥岩中的黄铁矿结核($\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 8.98‰)具有近似的硫同位素组成^[24];贵州水城青山铅锌矿体中的黄铁矿($\delta^{34}\text{S}=10.57\text{‰}\sim 19.574\text{‰}$)与上覆梁山组煤系地层中的黄铁矿结核($\delta^{34}\text{S}=10.9\text{‰}\sim 19.574\text{‰}$)具有非常相近的硫同位素组成^[25]。炭质泥页岩往往也是金银多金属成矿元素良好的捕集岩石,在某些情况下,可以为这些元素的成矿提供部分成矿物质来源。

当层滑断裂作为旁侧次级构造时,与陡倾斜的主干断层交切或相伴产出,由于主干断裂下切深,规模大,沟通了深部含矿流体向上运移的通道,伴随一次次构造运动,深部成矿流体通过地震泵吸作用和断层阀作用,向上运移至旁侧的缓倾斜层滑构造系统中沉淀成矿,如凡口铅锌矿^[11]。

在强烈的区域性构造运动和层间剪切过程中,断裂带中碳酸盐岩易发生塑性变形和成分分异作用。当岩石中含一定量的水时,岩石塑性变形和成分分异作用更显著^[26-31]。为了更好地说明单纯构造应力作用下层滑断裂带物质组成的变化,笔者选择广西灌阳地区泥盆系碳酸盐岩层滑断裂系统进行了深入的研究。这是因为该区地层时代较新,无变质作用和火成活动影响,但褶皱变形强,层滑断裂作用非常显著。

研究结果显示,碳酸盐岩层滑断裂带具有典型的结构层带性、变形双重性和成分互补性(表 2)。层滑断裂带下部,其中心为劈理揉皱带,边部为同构造重结晶方解石带;层滑断裂带上部为裂隙充填方解石脉带。下部表现为脆韧性变形(压剪区),上部表现为脆性变形(张剪区)。劈理揉皱带作为活动组分的源区,旁侧同构造重结晶方解石带兼为源区和输运通道,上部裂隙充填方解石脉带作为沉淀区,构成一个完整的构造地球化学系统(表 2)。层滑断裂元素稳定性递减的序列为 $\text{Cu}\rightarrow\text{Fe}^{3+}\rightarrow\text{V}\rightarrow$

$\text{Si}\rightarrow\text{Al}\rightarrow\text{Mn}\rightarrow\text{Ba}\rightarrow\text{Ni}\rightarrow\text{Sr}\rightarrow\text{Ag}\rightarrow\text{Bi}\rightarrow\text{Ga}\rightarrow\text{In}\rightarrow\text{Pb}\rightarrow\text{Fe}^{2+}\rightarrow\text{Cr}\rightarrow\text{Co}\rightarrow\text{Zn}\rightarrow\text{Mg}\rightarrow\text{Ca}\rightarrow\text{CO}_3^{2-}$ 。元素在序列中位置取决于其重力性质、溶解性质、负电性等因素的综合影响。了解上述元素稳定性序列,有助于阐明某些层控铁、铜、铅、锌矿床的形成机制。Sr 是高应力环境同构造重结晶方解石带的特征元素,Zn 是低应力环境裂隙充填型方解石脉的特征元素。碳的物相分析和稳定同位素研究证实:有机碳的氧化是本区劈理域和缝合域中炭质大量富集的主要因素,层滑断裂带并非还原环境。本区层滑断裂系统中存在 3 种重要的构造地球化学作用,即动力分异作用、压溶作用和氧化还原作用,造成层滑断裂的不同分带和元素的构造地球化学分异^[32]。

当层滑断裂叠加在碳酸盐岩含矿岩系的矿源层之上时,可以通过塑性流动、动力分异、压溶分异、动力热液作用等方式对矿源层进行改造,其中活泼性强成矿元素 Pb、Zn、As、Sb、Hg、U 等,易随动力热液活化迁移,在低应力区的扩容空间中沉淀富集成矿;稳定性强的成矿元素 Fe、Cu 等,易在高应力区的构造挤压带或剪切带中残留富集成矿。如白嘉芬^[33]等和张乾^[34]对金顶铅锌矿床研究认为,其为沉积-改造型层控矿床。据杨开庆等^[35]对石碌铁矿的研究,铁矿品位的变化与形变程度相关。铜、钴矿体主要受层间滑动带的制约,构造动力分异作用的后期叠加是其成矿的关键因素。杨兴科等^[36]对铅铜山铅锌矿床构造变形及其地质地球化学特征研究认为,该矿床受层滑断裂破碎带控制、以海底喷溢沉积作用形成的含矿铁白云石硅质岩作为矿源层,经动力热液改造的动力热液矿床。

3 层滑断裂的形成过程

大区域深层次的层滑断裂涉及全球性的大尺度的构造运动,对地区性层滑断裂而言,其形成与区域性构造运动和褶皱作用有关。但层滑断裂的形成经历了层间滑动(层间劈理)-层滑断层-叠加断层多个阶段。层间滑动与层滑断裂并无截然的界线,当层间滑动达到一定规模时便形成层滑断层。如广西灌阳碳酸盐岩层滑断裂经历了层间滑动(层间劈理)-逆断层滑动(层间劈理带之边缘断层)-正断层滑动(叠加断层)多个阶段。孙岩等^[5]亦将苏皖南部层滑断裂的形成分为层滑阶段、逆冲阶段和再活动阶段。钱建平^[37]对广西高龙金矿的研究

表 2 灌阳地区泥盆系碳酸盐岩层滑断裂不同分带元素平均含量、离差和变化系数

Table 2 Average content, deviation and variation coefficients of elements in different zones of the interlayer-slide fault in the carbonate formation in Guanyang area

分带	统计 参数	元 素 及 氧 化 物																			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	CO ₂	Ba	Cr	V	Sr	Mn	CO	Ni	Cu	Pb	Zn	Ag	Bi	Ga
原岩(泥 晶灰岩) <i>n</i> =10	X	0.91	0.81	52.53	1.25	0.098	0.075	41.62	12.50	20.90	13.8	488	37.1	28.35	19.2	5.05	9.1	26.8	0.151	1.55	5.06
	σ_{n-1}	0.67	0.19	0.65	1.53	0.053	0.083	0.58	2.12	4.53	6.23	179.5	14.4	6.44	9.69	6.59	5.20	18.0	0.096	0.30	1.98
	S	0.74	0.24	0.012	1.23	0.54	1.116	0.014	0.17	0.22	0.45	0.37	0.39	0.23	0.51	1.31	0.57	0.70	0.63	0.19	0.39
同构造重 结晶方解 石 <i>n</i> =8	X	1.96	1.38	51.74	0.46	0.100	0.19	40.34	12.60	22.40	19.40	592.	45.4	28.20	22.60	14.4	9.40	23.20	0.16	1.78	5.04
	σ_{n-1}	1.79	0.70	1.41	0.29	0.035	0.20	1.21	2.79	1.67	5.32	138	10.1	2.12	0.23	11.40	1.34	13.72	0.33	0.38	1.53
	S	0.96	0.50	0.027	0.62	0.35	1.05	0.030	0.22	0.075	0.27	0.23	0.22	0.075	0.28	0.79	0.14	0.59	0.21	0.22	0.30
劈理带 <i>n</i> =4	X	1.65	1.29	50.27	0.43	0.133	0.227	40.55	16	25	26.67	716	41.7	31.97	31.33	21.67	15.33	30.7	0.237	1.94	6.83
	σ_{n-1}	0.09	0.31	1.37	0.42	0.029	0.111	1.47	0	4	1.53	74.9	17.9	2.41	7.02	12.06	6.66	11.6	0.038	0.41	2.48
	S	0.054	0.24	0.027	0.97	0.217	0.49	0.036	0	0.16	0.057	0.11	0.43	0.075	0.22	0.56	0.41	0.38	0.16	0.21	0.36
裂隙充填 方解石脉 <i>n</i> =7	X	0.29	0.79	52.93	0.36	0.094	0.173	41.72	9.93	14.86	10.86	146	33.7	26.46	15.29	4.36	7.00	31.14	0.094	1.21	3.47
	σ_{n-1}	0.38	0.22	0.57	0.44	0.044	0.196	0.98	4.17	6.12	2.27	79	9.3	5.53	7.97	3.92	1.29	17.43	0.033	0.39	0.90
	S	1.30	0.28	0.011	1.24	0.17	1.14	0.023	0.42	0.41	0.21	0.54	0.28	0.21	0.52	0.99	0.18	0.56	0.35	0.32	0.26

注:氧化物含量单位为 $\times 10^{-2}$;元素含量单位为 $\times 10^{-6}$; *n* 为样数;X 为平均值; σ_{n-1} 为均方差;S 为变化系数;分析单位:主量元素为桂林理工大学;微量元素为桂林矿产研究院

表明,该区金矿化的形成先后经历了北东向挤压(区域性北西向褶皱隆起)、北西向挤压(叠加褶皱即高龙穹窿及周缘层滑断裂形成)、近东西向拉张(穹窿周缘剥离断层、滑脱褶皱、南北向矿段和矿体充填)3 个阶段。沈远超等^[38]提出,大庄子金矿体形成期经历了先张后压再剪切的过程。拉张阶段形成碎裂-角砾状矿石和张性断裂,挤压期形成石墨化矿石和透镜状构造,剪切期主要表现为形成斜切矿体的断层和基性脉岩的侵入。

4 层滑断裂的研究意义

(1)层滑断裂是一种基本的和重要的断裂构造类型,但由于此类断层无岩层被错开的断层效应,如无明确标志有时很难判断其存在。因此有必要深入研究其基本特征、识别标志和形成机制。

(2)强烈的褶皱变形和层滑作用可以使岩层产生显著的构造地球化学分异,对两极元素(稳定元素如 Fe, TR 等;活泼元素如 Pb, Zn, As, Sb, Hg, Au, U 等)更具有特殊意义^[39],认识各种元素在层滑作用过程中的活化、迁移和富集规律,有助于深入认识某些层控铁、铜、铅、锌矿床的成矿作用和形成机理。

(3)通过总结层滑断裂的控矿和成矿规律,可以有效地指导矿区深部和外围找矿。凡口铅锌矿矿床历经几十年的开采,目前保有地质储量仍与建

矿初期相当,主要得益于在原矿区近围找到了 Sh209a、Sh210a 等受层间滑动构造控制的似层状矿体^[11]。

(4)由于煤岩具有很大的流变性,层滑断裂作为一种后期改造因素,对煤层变形具有特别重要的影响。层滑作用可以破坏煤层的连续性,使煤层减薄或加厚^[40]。层滑断裂对煤层的结构、构造和质量也有很大影响,层滑作用形成碎裂煤、粉煤、泥煤,出现各种显微构造现象^[41];使顶底板岩石卷入煤层,灰分增加,煤质变差^[42]。

5 结 论

(1)碳酸盐岩系层滑断裂在中国南方古生代地层中广泛分布,是一种重要的控矿和成矿构造。阐明其基本类型、形成机理和控矿作用对相关矿床的找矿具有重要意义。

(2)基于层滑断裂所属含矿岩系的岩性组合、构造样式及其与主干断裂的相互关系,层滑断裂可分为碳酸盐岩与泥页岩界面+层滑断裂复合型,平行不整合面+层滑断裂复合型,逆冲推覆构造台阶式断层断坡+断坪复合型和陡倾斜主干断层+旁侧缓倾斜层滑断裂复合型 4 种类型。

(3)层滑断裂的形成过程一般可概括为层间滑动、层滑断层、叠加断层 3 个阶段。

(4)层滑断裂控矿实际是层滑断裂构造-岩石系统控矿。其控矿和成矿作用主要表现在构造-岩性界面赋矿、富硫富碳特殊成分层的障壁控矿、主干断裂旁侧次级层间断裂容矿、层滑断裂构造动力分异作用成矿。

致谢:感谢审稿专家对本文提出的中肯修改意见。

参考文献

- [1] 马杏垣,索书田.论滑覆及岩石圈内多层次滑脱构造[J].地质学报,1984,19(3): 205-213.
- [2] 彭美丽,易金,姚蓉,等.华南多层推滑构造系的物理模拟实验[J].大地构造与成矿学,2011,35(2): 198-206.
- [3] 王步清,彭恩生,唐诗佳,等.广西泗顶铅锌矿层间滑动带地质特征及控矿作用[J].广西地质,2000,13(2): 35-38.
- [4] 常印佛,刘学圭.关于层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子拗陷中一些矿床为例[J].矿床地质,1983,2(1): 11-20.
- [5] 孙岩,沈修志,黄钟瑾.层滑断裂与层控矿床——以苏皖南部上古生界的地层为例[J].地质评论,1984,30(5): 430-436.
- [6] 凌其聪,周贵斌,黄许陈,等.“层控式”矽卡岩床特征及成矿机制[J].贵金属地质,1998,7(2): 91-95.
- [7] 吴淦国,张达,臧文控.铜陵矿集区构造滑脱与分层成矿特征研究[J].中国科学,2003,33(4): 300-308.
- [8] 黄许陈,储国正.铜陵狮子山矿田多位一体(多层楼)模式[J].矿床地质,1993,12(3): 221-252.
- [9] 储国正.铜陵狮子山矿田构造及其控岩控矿作用的研究[J].安徽地质,1992,2(2): 1-14.
- [10] 刘经华,李卉,徐兆文,等.冬瓜山层状铜矿成矿地质背景及成因[J].地质学刊,2009,33(2): 133-137.
- [11] 杨汉壮,陈尚周.广东凡口铅锌矿层间滑动构造及其控矿作用[J].地质与勘探,2006,42(2): 44-48.
- [12] 原桂强,贾会业,宋玉伟,等.凡口铅锌矿狮岭南深部矿床地质特征及找矿方向[J].地质学刊,2019,43(1): 1-7.
- [13] 毛健全,杜定全,潘年勋,等.滑脱构造与黔西南地区金矿浅析[J].贵州工学院学报,1990,19(3): 44-49.
- [14] 钱建平.黔西南微细浸染型金矿基本特征和几点认识[J].桂林工学院学报,2001,21(1): 27-34.
- [15] 何丰胜,毛健全,杜定全.戈塘矿区层滑构造研究[J].贵州工业大学学报,1997,26(2): 10-16.
- [16] 袁远,董从芳,刘伯胜.广西黑水沟-大树脚锌多金属矿地质特征及外围找矿远景分析[J].2012,3(3): 330-333.
- [17] 张开均,李扬.皖南台阶式逆冲断层控矿[J].地质与勘探,1994,30(3): 14.
- [18] 张开均,施央申.长江中下游多金属成矿带逆冲推覆构造的控矿作用初探[J].江苏地质,1996,20(3): 172-176.
- [19] 郭振春.黔西南灰家堡金矿田“两层楼”模式及找矿意义[J].黄金地质,2002,8(4): 18-23.
- [20] 张蕾,杜定全,张晗彬,等.黔西南灰家堡金矿田的构造控矿模式研究——“两层楼”模式的构造意义[J].黄金,2012,33(9): 13-18.
- [21] 吴松洋,丁俊,陈明,等.贵州戈塘金矿滑脱构造及其与成矿的关系[J].金属矿山,2014,(7): 106-109.
- [22] 刘帅,张培兴,熊灿娟,等.贵州戈塘金矿 SBT 地球化学研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2013,30(5): 43-48.
- [23] 黎应书,柴大博,贺磊.广东省仁化县凡口铅锌矿田构造体系[J].有色金属(矿山部分),2018,70(1): 46-49.
- [24] 李存有.高龙金矿同位素地球化学特征及其地质意义[J].贵金属地质,1994,3(2): 123-130.
- [25] 钱建平.黔西北威宁-水城铅锌矿带动力成矿作用研究[J].地质地球化学,2001,29(3): 134-139.
- [26] 刘俊来,俞保祥,Weber K. 浅成断层带的低温脆-韧性破裂共生机制[J].科学通报,1999,44(8): 864-869.
- [27] 刘俊来,岛田彦彦.实验变形岩石低温破裂作用的微观机制[J].地质科学,1999,34(2): 242-250.
- [28] Griggs D T, Blacic J D. Quartz: Anomalous weakness of synthetic crystals[J].Science,1965,147(3655): 292-295.
- [29] Griggs D T. A model of hydrolytic weakening in quartz [J]. J. Geophys. Res.,1974,79(11): 1653-1611.
- [30] Kekulawala K, Paterson M S, Boland J N. Hydrolytic weakening in quartz[J].Tectonophysics,1978,46(1/2): T1-T6.
- [31] Kronenberg A K, Tullis J. Flow strengths of quartz aggregates: grain size and pressure effects due to hydrolytic weakening[J]. Journal of Geophysical Research,1984,89(B6): 4281-4297.
- [32] 钱建平.广西灌阳地区碳酸盐岩层滑断裂构造地球化学系统[J].矿物学报,1994,14(4): 348-356.
- [33] 白嘉芬,王长怀,纳荣仙.云南金顶铅锌矿床地质特征及成因初探[J].矿床地质,1985,4(1): 1-10.
- [34] 张乾.云南金顶铅锌矿床成因研究[J].地质找矿论丛,1991,6(2): 47-58.
- [35] 杨开庆,董法先,王建平,等.海南石碌矿区铁、金、铜、钴矿构造动力成矿作用的研究[J].中国地质科学院地质力学研究所刊,1988,第11号: 83-152.
- [36] 杨兴科,宫同伦.铅山铅锌矿床动力热液成矿特征[J].西安地质学院学报,1992,14(1): 35-42.
- [37] 钱建平.伸展作用与高龙金矿成矿作用研究[C]//全国矿床资源发展战略及隐伏矿床寻找学术研讨会.2001.
- [38] 沈远超,刘铁兵,杨金中.层间滑动角砾岩型金矿床的地质特征及成矿远景[J].矿物岩石地球化学通报,2000,19(4): 271-272.
- [39] 钱建平.构造动力成矿理论若干问题的探讨[J].地质地球化学,2002,30(4): 1-6.
- [40] 夏玉成,王生全,樊怀仁.显德汪井田构造薄煤带形成机理及预测[J].河北煤炭,1997,(2): 27-29.
- [41] 据宜文,姜波,王桂梁,等.层滑构造煤岩体微观特征及其应力应变分析[J].地质科学,2004,39(1): 50-62.
- [42] 靳尊秀.层间滑动构造探讨[J].河北煤炭,1988,(3): 50-53.