

文章编号: 0258-7106(2012)03-0405-12

Si/Ca 界面对铅锌矿床定位的控制作用 及其找矿意义*

张长青¹, 叶天竺^{1,2}, 吴越³, 王成辉¹, 吉海³, 李莉⁴, 张婷婷⁵

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 国土资源部咨询研究中心, 北京 100037; 3 中国地质大学, 北京 100083; 4 中国地质图书馆, 北京 100083; 5 中国地质科学院研究生部, 北京 100037)

摘要 最近几年随着危机矿山深部找矿工作的深入, 中国铅锌矿床找矿工作取得了较大进展, 这不仅归功于深部钻探工作的开展, 也得益于找矿理论的不断深化。总结过去几十年的找矿勘查经验, 人们开始意识到地质-地球化学界面对找矿的指导作用。基于此, Si/Ca 界面控矿逐渐被人们应用于铅锌找矿工作当中。文章通过对国内外一些代表性矿床的对比分析, 认为不同成因的矿床都可具有同一种控矿因素——Si/Ca 界面。Si/Ca 界面控矿既是不同类型岩石物理性质界面, 又具有地球化学意义。文章划分出侵入接触界面、火山沉积接触界面和沉积接触界面 3 种不同的 Si/Ca 界面组合方式, 并分别举实例说明 Si/Ca 界面组合对铅锌矿体定位的控制作用, 从成矿元素地球化学特性、Si/Ca 界面构成异相定位空间和提供地球化学障等角度, 分析了 Si/Ca 界面的控矿机制, 界面控矿有望在找矿勘查过程中起到指导作用。

关键词 地球化学 Si/Ca 界面 地球化学障 控矿作用 铅锌矿

中图分类号: P618.42; P618.43

文献标志码: A

Discussion on controlling role of Si-Ca boundary in locating Pb-Zn deposits and its prospecting significance

ZHANG ChangQing¹, YE TianZhu^{1,2}, WU Yue³, WANG ChengHui¹,
JI Hai³, LI Li⁴ and ZHANG TingTing⁵

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 Consulting & Research Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China; 3 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4 China Geological Library, Beijing 100083, China; 5 Graduate School, CAGS, Beijing 100037, China)

Abstract

The geneses and ore control are always the important aspects in the study of Pb-Zn deposits. There are different metallotectonic conditions for different genetic type deposits. Statistics show that the interface between silica and calcareous bed is an important ore-control factor for every types of Pb-Zn deposits. This conclusion was reached on the basis of summing up a lot of classic Pb-Zn deposits in China. The interface between silica and calcareous bed is the boundary not only of rock geophysics but also of geochemistry. Three different combined types of interfaces are distinguished. They are interface between intrusion and host rock, volcanic rock and sedimenta-

* 本文得到国家自然科学基金(40902029)全国危机矿山接替资源找矿项目之“桂东-粤西地区铅锌金等矿床成矿规律总结研究”(20089946)公益性科研专项(K0904, 200911007)中国地质大调查“我国重要矿产和区域成矿规律研究”(1212010633903)国家深部探测技术与实验研究专项“南岭成矿带地壳岩浆系统结构探测实验研究”(201011046, SinoProbe-03-01)的联合资助

第一作者简介 张长青, 男, 1975年生, 副研究员, 主要从事岩石、矿物、矿床学研究。Email: zcqcchangqing@163.com

收稿日期 2011-12-21; 改回日期 2012-04-09。许德煊编辑。

ry rock, different sedimentary rocks. For each type of interface, there are examples showing the control action on the ore body. Obviously, the interface between silica and calcareous bed has an important guiding significance for ore prospecting.

Key words: geochemistry, Si-Ca boundary, geochemical shield, ore control, Zn-Pb deposit

20世纪中叶以来,世界上发现了一批重要的铅锌矿床,如美国的维博纳姆带(Viburnum Trend)(1955)、红狗(Red Dog)(1975)、澳大利亚的世纪(Century)(1990)、麦克阿瑟河(Mcarthur River)(1955)、爱尔兰的纳凡(Navan)(1971)、加拿大的松点(也译为派因波因特, Pine Point)(1962)、伊朗的迈赫迪耶巴德(Medhdiabad)(90年代)、南非的甘斯堡(Gamsberg)(1973)以及中国的金顶(1959)、西成矿田(1958)、凡口(1956)、蔡家营(1959)等(戴自希等 2004)。这一系列矿床的发现与多年来的经验总结及分析成矿规律和勘查模式的工作是密不可分的。国内外的找矿经验表明,许多新矿床类型的发现和识别,曾大大推动了中国同类矿床的找矿勘查工作,使之有了新的突破和不断发现,如MVT铅锌矿、VMS型铅锌矿、SEDEX型铅锌矿等成矿类型的发现都具有明显的阶段性(《中国矿床发现史·综合卷》编委会 2001)。在找矿勘查过程中,对各种实际资料图件不断进行综合研究也是指导找矿不可或缺的方面,例如20世纪50年代,随着MVT矿床研究的不断深入,推动了50~60年代一系列同类型矿床的发现;60年代中期VMS矿床模式的提出也带动了60~70年代火山成因矿床的发现;70年代,多个SEDEX矿床的发现,与多年来对SEDEX矿床成矿规律的总结和模式研究是分不开的。

在矿床成矿规律和控矿因素研究中,对于“相带”及“相带”交界面的特殊地质现象,早在20世纪80年代程裕淇等(1979;1983)就给予了关注,认为“相带”及“相带”界面对研究矿床的形成、探讨成矿规律和指导找矿预测有着重要作用;赵鹏大等(1991)提出,地质体的不连续界面或不同地质体的分界面(如断裂、不整合、侵入接触面等)表现为地质体连续性的突然中断,同时伴有物质成分的更换及其物理和化学属性的变化,是有利的成矿部位,吴淦国等(1999)认为,成矿界面包括地质构造界面、岩石物理界面、元素聚散物理化学界面,是物理化学条件突变的空间和场所,是成矿流体停积而发生矿石沉淀、富集成矿之所在。朱裕生(2006)认为,矿床成矿作用定位型式几乎囊括了矿床学领域内各类矿床的

控矿条件和找矿标志。“界面成矿”是矿床成矿作用定位的地质位置的概括,而Si/Ca界面作为一类地质体转换分界面,标定了四维空间内成矿作用形成的矿体的空间位置,可作为指导深部勘查的依据。最近,随着危机矿山深部找矿工作成效的不断显现,通过铅锌矿床的勘查规律总结,发现许多铅锌矿床的形成具有“界面成矿”的特征。通过对国内外典型铅锌矿床矿体定位空间的初步分析,本文以Si/Ca“界面成矿”为出发点,阐述了Si/Ca界面控制矿体定位的地质、物理和元素地球化学机制,以期对铅锌矿床的找矿勘查工作提供帮助。

1 Si/Ca(硅/钙)界面含义及其控矿

Si/Ca界面是指含硅酸盐类岩石(Si)与含碳酸盐类岩石(Ca)之间形成的岩性界面。它既是岩石物理条件变化的界面,又是地球化学条件变化的界面。在岩石学上体现为岩性变化,即碳酸盐岩与硅酸盐岩的物理界面;在地球化学上,反映了环境的骤然变化,既涉及到元素组成、温度、压力条件的变化,又涉及到酸碱度、氧化还原环境等的变化。

作为一种地质体的不连续界面或者不同地质体的分界面, Si/Ca界面是一种物理化学条件的界面,在影响铅锌矿体定位方面起着一定的作用。虽然Si/Ca界面并非在所有的铅锌矿床中发育,但在不同成因类型的铅锌矿床中,都能找到发育Si/Ca界面的实例。例如,对于火山岩型(VMS和陆相火山岩型)矿床,火山喷气是导致矿床形成的主导因素,火山碎屑岩往往构成矿体的直接围岩,火山岩的岩性、岩相接触带,以及酸性或基性火山岩与上覆沉积岩的界面,往往是矿体产出的有利部位(戴自希, 2005);其中,火山岩与沉积岩之间多构成Si/Ca界面,矿体往往定位于Si/Ca界面之下的火山岩系中,如四川岷村等铅锌矿床。对于与盆地流体有关的铅锌矿床,含矿流体在沉积盆地中的运移、沉淀是矿床形成的关键因素,容矿岩石多以碳酸盐岩为主,矿体定位明显受到岩性(碳酸盐岩)和岩相(不整合面、岩性界面、断层面等)界面的控制(张长青等 2009);其

中,碳酸盐岩与上覆细碎屑岩之间形成了 Si/Ca 界面,矿体往往定位于界面之下的碳酸盐岩岩系中,如广东凡口、云南金顶、四川大梁子、赤普等铅锌矿床。对于沉积变质型(SEDEX)矿床,海底热液喷流是成矿的主因,控制矿体形成的关键因素包括盆地的存在及导致流体上升的同生断层的存在(戴自希等, 2005),矿体往往定位于碳酸盐岩与砂页岩形成的 Si/Ca 界面附近,如西秦岭西成矿集区、内蒙古渣尔泰-狼山矿集区、新疆彩霞山、河北高板河、辽宁青城子等。对于与岩浆作用有关的(斑岩、矽卡岩、热液)矿床,岩浆活动是矿床形成的主因,中-酸性岩体的内外接触带是矿体产出的有利部位,而岩体与围岩之间的接触界面,尤其是岩体与碳酸盐岩之间形成的 Si/Ca 界面,是矽卡岩型矿体定位的场所,如辽宁桓仁、云南都龙、白牛厂、澜沧老厂、湖南桃林、水口山、黄沙坪、吉林放牛沟、内蒙古白音诺尔、浩布高、广西拉么、西藏亚贵拉、蒙亚啊、洞中拉等矿床。

2 Si/Ca 界面的不同组合方式

根据矿床形成机制的不同,结合具体岩性条件的变化,将 Si/Ca 界面划分为 3 种表现形式,共 4 类(表 1):

(1) 侵入接触界面(I) 即碳酸盐岩与中-酸性岩的界面。与成矿有关的中-酸性岩主要包括花岗岩和闪长岩类,由于中-酸性侵入岩的热液蚀变作用,在界面处往往发生矽卡岩化,相应地形成了与岩浆作用有关的矽卡岩型、斑岩型铅锌矿床。这类界面定位的矿床在中国广泛发育,如辽宁桓仁、广西新华、湖南水口山、黄沙坪、山东香奂、云南姚安、西藏亚贵拉、蒙亚啊等矿床;

(2) 火山-沉积界面(II) 即碳酸盐岩与火山岩的界面。火山岩包括陆相和海相 2 种,有时可见浅成、超浅成岩,岩性多以中-酸性为主。火山岩活动带来的含矿物质多在火山岩与上覆/下伏沉积地层(碳酸盐岩或硫酸盐岩)的界面附近,尤其是靠近火山岩一侧沉淀,形成了与火山岩作用有关的铅锌矿床。这类界面(包括变质火山岩(片麻岩、变粒岩等)与碳酸盐岩(多为大理岩)之间的界面)定位的矿床多分布在中国的中西部地区,如四川呷村、青海锡铁山等;

(3) 沉积界面 即碳酸盐岩与硅质沉积岩(碎屑岩)及其变质岩(片岩、板岩、千枚岩、石英岩等)的

界面。根据碎屑岩的物理性质又可分为 2 个亚类: ① 碳酸盐岩与细碎屑岩的界面(III),细碎屑岩包括粉砂岩、泥岩、细砂岩等,粒度细小,孔隙度及渗透率相对低,成为含铅锌流体运移的隔挡层,在靠近碳酸盐岩的界面一侧形成了铅锌矿体。这类矿床在中国分布较广,西秦岭地区的西成矿田、川滇黔地区的赤普、大渡河、大梁子等铅锌矿床均有这类特征。② 碳酸盐岩与粗碎屑岩的界面(IV),粗碎屑岩主要为角砾岩、粗砂岩、生物碎屑岩等,孔隙度大、渗透性好,可形成有利的容矿空间,矿床在界面两侧均有产出,如云南金顶、新疆乌拉根等。

3 Si/Ca 界面控矿实例分析

3.1 侵入接触界面(碳酸盐岩与中-酸性岩的界面)

是岩体与碳酸盐岩之间的界面,通常表现为热接触交代作用下形成的矽卡岩化带。此类界面对矽卡岩型铅锌矿床的发育起着十分关键的作用。

实例一:辽宁桓仁铅锌矿床

桓仁矿床是地台相沉积岩与燕山早期陆相火山岩发生接触交代所形成的矽卡岩型矿床。区内二棚甸子闪长岩体与该矿床有关,岩体侵入寒武系碳酸盐岩层及上侏罗统火山岩系内。沿闪长岩与寒武系碳酸盐岩的接触带发育有矽卡岩带,铜铅锌铁矿体多产在蚀变闪长岩与碳酸盐岩之间的矽卡岩带内,而铅锌矿体则主要产在靠近大理岩的矽卡岩一侧(图 1)。该矿床内的矿体受大理岩与闪长岩之间 Si/Ca 界面的控制。

实例二:湖南水口山铅锌矿田

水口山铅锌矿床是赋存于花岗闪长岩与围岩接触变质带中的矽卡岩型矿床。岩体内部有钾长石化、绿泥石化、黄铁矿化及放射性异常,外接触带为矽卡岩化或角岩化带。金属硫化物分布在矽卡岩带外侧的大理岩带内和矽卡岩与大理岩之间的过渡带内。如老鸦巢矿段的矿体产于 F1 推覆滑脱断层上盘的老鸦巢碳酸盐岩块与 4 号花岗闪长岩北缘超覆于该岩块的接触破碎带中(图 2)(李能强等, 1996)。

3.2 火山-沉积界面(碳酸盐岩与火山岩的界面)

通常表现为火山岩与围岩沉积地层之间的界面,在 VMS 或 VHMS 矿床中较为普遍。矿体通常定位于界面之下的火山岩地层中。Si/Ca 界面对矿体定位的影响较矽卡岩型铅锌矿床小一些,矿体与

表 1 典型铅锌矿床 Si/Ca 界面控制矿体定位情况统计表
Table 1 Si-Ca boundaries controlling locations of orebodies in typical Pb-Zn deposits

序号及矿床名称	含矿层位	地层	岩性	矿体顶板	矿体底板	Si/Ca 界面类型	矿床类型
1 金顶	$K_{1j}^1; E_{y^b}$	景星组	石英砂岩和角砾灰岩、砂岩、角砾砂岩	紫红色泥质粉砂岩、石膏岩、泥砾岩	砖红色粉砂岩	Ⅳ	砂砾岩型
2 凡口	$D_2d;$ D_3t^{a-b}	东岗岭组;天 子岭组	石灰岩为主,偶夹粉砂岩、泥灰岩	东岗岭组顶部纹层状粉砂岩,其上为砂砾岩、石英砂岩夹粉砂岩	条带状粉砂岩、粉砂质页岩、细砂岩夹薄层白云岩	Ⅲ、Ⅳ	碳酸盐型
3 厂坝	D_2aj	安家岔组	大理岩、结晶灰岩和黑云母石英片岩	板岩或砂页岩	片岩、硅质岩、碳质岩	Ⅲ	SEDEX 型
4 会泽	D_2b	摆佐组	中-粗晶白云岩	砂砾屑灰岩	细-中晶灰岩	否	碳酸盐型
5 锡铁山	O_3tj	滩间山群	大理岩夹沉凝灰岩	千枚岩、板岩	千枚岩、板岩	Ⅱ	火山岩型
6 李家沟	D_2aj	安家岔组	大理岩、结晶灰岩和黑云母石英片岩	板岩或砂页岩	片岩、硅质岩、碳质岩	Ⅲ	SEDEX 型
7 白音诺尔	P_1h	黄岗梁组	大理岩或结晶灰岩	粉砂质板岩、黑云母长英质角岩,含凝灰碎屑	泥质板岩	Ⅰ	砂卡岩型
8 甲生盘	Pt_2ag^2	阿古鲁组	泥砂质白云岩及白云质灰岩薄层、夹钙质板岩	碳质粉砂质绢云母板岩	砂质白云岩	Ⅲ	SEDEX 型
9 冷水坑	$J_3d; J_3e$	打鼓顶组;鹤 湖岭组	花岗斑岩体内带及接触带附近	安山岩、沉凝灰岩、熔结凝灰岩	砂岩、粉砂岩	Ⅰ	斑岩型
10 水口山	$P_1q; P_1d$	栖霞组;当冲组	碳质灰岩、含燧石灰岩	碳质砂页岩	岩体	Ⅰ、Ⅲ	砂卡岩型
11 大厂铜坑	$D_3l^{1-2}; D_3tw$	榴江组;五指 山组	条带状灰岩、硅质岩	黑色页岩	似层状泥页岩、泥灰岩	Ⅰ、Ⅲ	砂卡岩型
12 都龙	E_2t	田蓬组	片岩、大理岩夹似层状砂卡岩	云母石英片岩	片岩、片麻岩	Ⅲ	热液型
13 呷村	P_3g	呷村组	下矿带为安安流纹质角砾熔岩;上矿带为白云质灰岩和流纹质角砾凝灰熔岩;两者间有枕状砾岩和硅质壳存在	黑色页岩,下为黄铁矿和重晶石带	绿泥石化英安岩,其上为硅矿带	Ⅱ	火山岩型
14 白牛厂	E_2t	田蓬组	细碎屑岩	灰岩夹碎屑岩薄层		Ⅲ	热液型
15 甲乌拉	P_2l	老龙头组	砂岩、板岩、安山岩			不明	热液型
16 亚贵拉	$C_2-P_1l^2$	来姑组	变凝灰质石英砂岩、大理岩及砂卡岩等。以细粒变凝灰质石英砂岩为主,大理岩(砂卡岩化)作为夹层分布于变凝灰质石英砂岩中	砂质板岩、变石英砂岩	砂质板岩夹变石英砂岩	Ⅰ、Ⅲ	砂卡岩型
17 黄沙坪	$C_1sh;$ C_1c	石碇子组;测 水组	灰岩、白云岩	砂页岩	岩体	Ⅰ、Ⅲ	砂卡岩型
18 大厂巴力-龙 头山	D_2	纳标组;罗富 组	礁灰岩、灰岩、白云岩、大理岩	硅质岩	岩体	Ⅰ	砂卡岩型
19 拜仁达坝	Pt_1b	宝音图群	石英闪长岩、片麻岩、辉绿辉长岩和花岗岩脉			不明	热液型
20 霍各乞	Pt_2l^2	狼山群	板岩、石英岩、二透岩	片岩、石英岩	玄武岩	Ⅱ、Ⅲ	SEDEX 型
21 大梁子	Z_2dn	灯影组	白云岩	砂页岩	白云岩	Ⅲ	碳酸盐型
22 桃林	$Z_2d;$ Z_2dn	陡山沱组;灯 影组	板岩、硅质岩	冷家溪群千枚岩、板岩	石英岩或硅质岩	Ⅲ	热液型

续表 1-1
Cont. Table 1-1

序号有及矿床名称	含矿层位	地层	岩性	矿体顶板	矿体底板	Si/Ca 界面类型	矿床类型
23 东升庙	P ₂ ls	狼山群	白云岩、大理岩类, 夹有千枚岩(原岩为白云岩夹碎屑岩)	片岩、石英岩, 夹千枚岩类(原岩为碎屑岩)	片岩、石英岩(原岩为碎屑岩)	Ⅲ	SEDEX 型
24 栖霞山	C ₂ h	黄龙铺组	白云岩、白云质灰岩、粗晶灰岩及富造礁生物灰岩	灰岩	粘土岩、粉砂岩、细砂岩互层	Ⅲ	热液型
25 浩布高	P ₁ d	大石寨组	海相火山碎屑岩和少量大理岩	酸性碎屑、火山碎屑熔岩类	安山岩	Ⅱ	砂卡岩型
26 李梅	∈ ₁ q	清虚洞组	礁灰岩	纹层状细晶白云岩		否	碳酸盐型
27 荒田	P ₁ m	茅口组	灰岩、白云岩	纹层状黄铁矿硅质岩	纹层状黄铁矿硅质岩	Ⅱ	火山岩型
28 高板河	P _{t3} g	高于庄组	白云岩、粉砂质页岩	粉砂质泥质条带白云岩	硅质白云岩	Ⅲ	SEDEX 型
29 五部	K ₁		流纹岩、凝灰岩			不明	火山岩型
30 白秧坪	K _{1j} ; K _{1h}	景星组、花开左组	砂岩、灰岩、石膏层	石膏, 砂岩、粉砂岩和泥岩	砂岩、粉砂岩和泥岩、灰岩、泥灰岩	Ⅳ	砂砾岩型
31 后江桥	D ₃ yj ; D ₃ h	易家湾组; 黄公塘组	白云岩	灰岩	灰岩	否	SEDEX 型
32 马元	Z ₂ dn ³	灯影组	角砾状白云岩	硅质白云岩, 含碳、泥质白云岩, 微晶灰岩	石英砂岩, 硅质白云岩	否	碳酸盐型
33 天宝山	Z ₂ dn	灯影组	白云岩夹硅质白云岩、砂质白云岩	硅质白云岩, 硅质岩	石英岩夹紫红色泥岩	Ⅲ	碳酸盐型
34 青城子	P _{t3} ls	辽河群浪子山组和大石桥组	大理岩、云母条带大理岩	片岩	片岩、变粒岩	Ⅲ	SEDEX 型
35 个旧老厂	T ₂ g	个旧组	灰岩、白云岩			否	砂卡岩型
36 北山	D ₂ d ; D ₃ r	东岗岭组、融县组	中-粗粒白云岩	泥灰岩、泥质灰岩	礁灰岩	否	碳酸盐型
37 炭窑口	P _{t2} ls	狼山群第二段	细晶白云石大理岩类、碳质千枚岩与云母石英片岩类、浅粒岩和变粒岩	碎屑岩	碎屑岩	Ⅲ	SEDEX 型
38 放牛沟	O ₃ s ; 74	石缝组	条带状大理岩, 变质安山岩	绿泥片岩、绢云片岩		Ⅲ	热液型
39 小铁山	∈ ₂		石英角斑凝灰岩夹石英角斑岩	硅质千枚岩	石英钠长斑岩	I、II	火山岩型
40 毕家山	D ₂ aj	安家岔组	结晶灰岩和千枚岩	碳质千枚岩	生物结晶灰岩和角砾状、碎裂状结晶灰岩及碳质灰岩	Ⅲ	SEDEX 型
41 铅洞山	D ₂ x ; D ₂ g	红星铺组; 古道岭组	粉砂质千枚岩, 灰岩	粉砂质千枚岩	灰岩	Ⅲ	SEDEX 型
42 邓家山	D ₂ x ²	西汉水组	中厚层灰岩	碎屑岩(钙质板岩、千枚岩)	生物骨架灰岩、含生物屑鲕粒灰岩、亮晶生物灰岩	Ⅲ	SEDEX 型
43 德兴银山	P _{t2} sh ; J ₃ e	中元古界双桥山群, 侏罗系鹤湖岭组	英安斑岩体外接触带千枚岩裂隙系统中、局部产于爆破角砾岩中和火山碎屑岩与千枚质砾岩的接触间隙中			不明	火山岩型

续表 1-2
 Cont. Table 1-2

序号及矿床名称	含矿层位	地层	岩性	矿体顶板	矿体底板	Si/Ca 界面类型	矿床类型
44 禾青	D ₂ q ²	棋梓桥组	白云质有孔虫礁灰岩	颗粒灰岩、泥晶灰岩	页岩	否	碳酸盐型
45 可可塔勒	D ₁ k ₂ ²	下泥盆统康布铁堡组	不纯大理岩	不纯大理岩、石英片岩、变粒岩	黑云母石英片岩	Ⅲ	火山岩型
46 大宝山	D ₂ d	东岗岭组	碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩	粉砂岩、页岩、沉凝灰岩	粉砂岩夹页岩(桂头群)	Ⅱ	火山岩型
47 大湾	Pt ₃ g; Pt ₃ m	迷雾山组、高于庄组	白云岩、流纹斑岩			不明	砂卡岩型
48 蔡家营	Pt ₁ d _t ; J ₃ z _h	古元古界红旗营子群大同营子组;上侏罗统张家口组	砂线石、石榴子石、黑云母、绿泥石角闪斜长变粒岩,酸性火山岩			不明	砂卡岩型
49 广西老厂	Є _q ;Є _b ;D ₁	寒武系清溪组、边溪组;下泥盆统	砂岩和白云岩,砾岩	以碎屑岩为主,夹白云岩透镜体	碳酸盐岩为主夹砂岩、板岩	Ⅲ、Ⅳ	碳酸盐型
50 红透山	Ar	太古代红透山组	石英片麻岩、黑云母片麻岩,原岩为火山沉积建造	变粒岩、斜长片麻岩	黑云母斜长片麻岩、浅粒岩	Ⅱ、Ⅲ	火山岩型
51 勐兴	S ₂ sr	上仁和桥组	生物碎屑灰岩及生物礁灰岩	千枚岩、凝灰岩	含碳千枚岩	Ⅲ	碳酸盐型
52 澜沧老厂	C ₁₋₃	下石炭统杨柳组;中-上石炭统	安山岩、碳质凝灰岩夹硅化凝灰岩	泥晶灰岩夹硅质条带,局部为燧石灰岩	硅质、碳质角砾凝灰岩	Ⅱ	热液型
53 乌斯河	Z ₂ dn	震旦系灯影组	黑色硅质岩及角砾状白云岩	碎屑岩	含硅质条带白云岩	Ⅲ	碳酸盐型
54 拉么	D ₃ l	罗富组	灰岩	硅质灰岩	页岩、砂岩	Ⅲ	砂卡岩型
55 赤普	Z ₂ dn	灯影组	砾屑白云岩,硅质条带白云岩	砂质泥页岩	硅质条带白云岩	Ⅲ	碳酸盐型
56 柴河	Pt ₃ g	长城系高于庄组	条带状白云岩	块状白云岩		否	碳酸盐型
57 泗顶	D ₂ d; D ₃ r	融县组、东岗岭组	生物碎屑灰岩、白云岩		浅变质碎屑岩	Ⅲ	碳酸盐型
58 冰洞山	Z ₁ d ⁴	震旦系陡山沱组	白云岩、角砾状白云岩	含碳砂泥岩	含碳砂泥岩	Ⅲ	碳酸盐型
59 阿舍勒	D ₂₋₃ a	上-中泥盆统阿舍勒组	角斑岩和角斑质凝灰岩	细碧岩	角斑岩和角斑质凝灰岩	不明	海相火山岩型
60 蒙亚阿	C ₂ -P ₁ l; P ₂ l	来姑组,洛巴堆组	砂卡岩	浆屑凝灰岩	砂泥质板岩	Ⅰ	砂卡岩型
61 甲玛	J ₃ d; K ₁ l	多底沟组;林布宗组	多底沟组碳酸盐岩与林布宗组砂板岩之间的似层状砂卡岩	砂板岩		Ⅲ	砂卡岩型
62 姚家岭	P ₁ q	栖霞组	灰岩及隐爆斑岩体			Ⅰ	砂卡岩型
63 小石房	Pt _{tn} ²	会理群天宝山组	变质石英砂岩	层状铁锰矿化带或变质石英砂岩	变质石英砂岩	Ⅲ	SEDEX型
64 彩霞山	Qbkn ¹	青白口系卡瓦布拉克组	白云石大理岩	变质石英砂岩、变质粉砂岩	变质粉砂岩、板岩	Ⅲ	SEDEX型
65 Pine Point	Pine Point 群	白云岩化灰岩	阿姆科页岩	泥质条带白云岩、石膏、砂泥质岩		Ⅲ	碳酸盐型
66 Mas de la mina	K ₁ a	Aptian 阶	台地灰岩	台地灰岩	砂岩、砾岩	Ⅳ	碳酸盐型
67 Valldinanes	K ₁ a	Aptian 阶	台地灰岩	富石英砂岩	泥灰质沉积岩	Ⅲ、Ⅳ	碳酸盐型
68 Red dog	C ₁₋₂ k	Kuna 组	页岩、燧石岩和碳酸岩浊积岩	页岩、燧石层	钙质页岩、钙质砂屑岩	Ⅲ	SEDEX型

注:参考文献略。

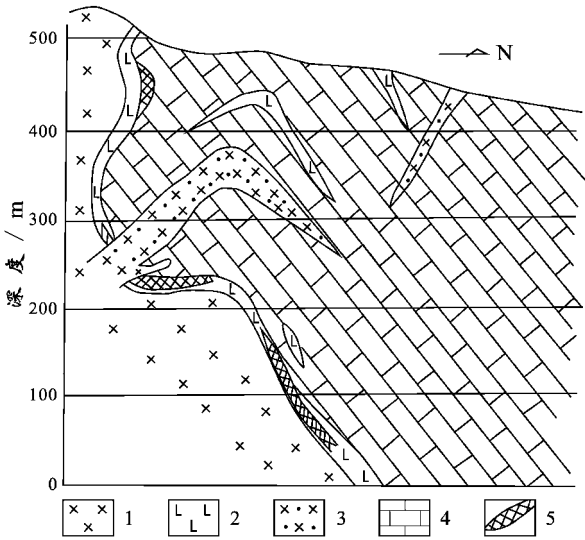


图 1 桓仁矿床松兰区 4 线地质剖面图
(据《中国矿床》编委会, 1989)

1—闪长岩; 2—砂卡岩; 3—闪长斑岩; 4—寒武系碳酸盐岩;
5—铅锌铜铁矿体

Fig. 1 Geological section along No. 4 exploration line in the Songlan ore block of the Huanren deposit (after Editorial Board of "Mineral deposits of China", 1989)

1—Diorite; 2—Skarn; 3—Diorite porphyry; 4—Cambrian carbonate rocks; 5—Pb-Zn-Cu-Fe ore body

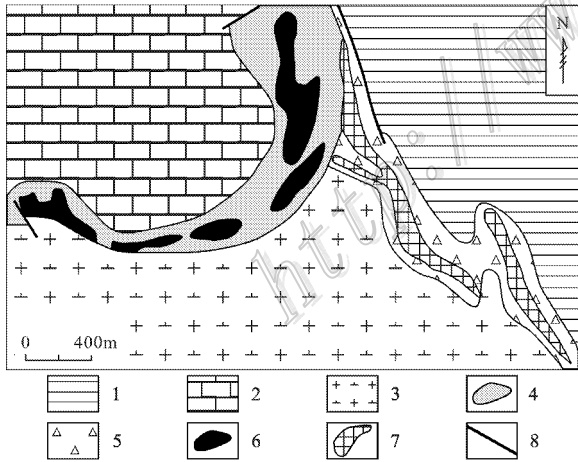


图 2 水口山矿床老鸦巢矿段Ⅷ中段矿体分布平面图
(据李能强等, 1996)

1—上二叠统斗岭组页岩; 2—大理岩; 3—花岗闪长岩; 4—破碎带; 5—隐爆角砾岩; 6—Pb-Zn 矿体; 7—金矿体; 8—断裂

Fig. 2 Geological plan view of VIII level of Laoyachao ore blok in the Shuikoushan ore district (after Li et al., 1996)

1—Upper Permian Douling Formation shale; 2—Marble; 3—Granitic porphyry; 4—Fracture zone; 5—Cryptoexplosive breccia; 6—Pb-Zn ore body; 7—Au ore body; 8—Fault

界面之间的距离视不同矿床而定。

实例：四川呷村银铅锌矿床

呷村银铅锌矿床产于西南三江义敦古火山弧带的昌台火山-沉积盆地中。含矿岩系由长英质火山岩、火山碎屑岩构成。矿体主要产于 Si/Ca 界面之下的凝灰角砾岩和凝灰岩中, 从上至下具有沉积岩(板岩、灰岩)→重晶石层→多金属矿层→流纹质火山岩的分带变化。矿体顶板为呷村组第三段(T_3g^3)钙质千枚岩、碳酸盐岩和重晶石层(图 3), 碳酸盐岩和重晶石与赋矿火山岩之间形成的 Si/Ca 界面构成了矿体的顶界。

3.3 沉积界面(碳酸盐岩与碎屑岩的界面)

据碎屑岩类型可细分为 2 个亚类: 碳酸盐岩与细碎屑岩的界面, 碳酸盐岩与粗碎屑岩的界面。

3.3.1 碳酸盐岩与细碎屑岩的界面

该类界面体现为浅海(湖)相碳酸盐岩与深海(湖)相或河漫滩相的泥页岩、砂岩之间的岩性界面, 在 SEDEX 型矿床中比较普遍。矿体主要产于 Si/Ca

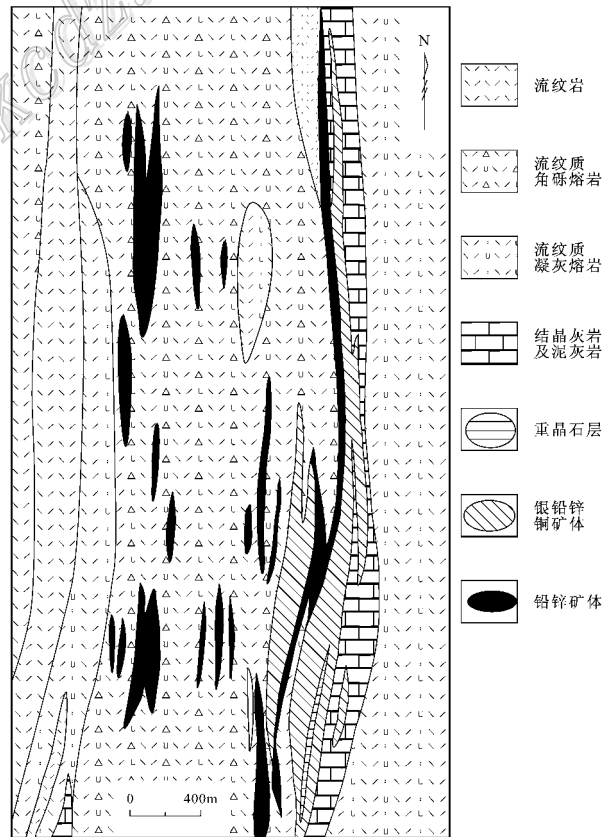


图 3 呷村矿床平面地质图(据李舒, 1996)

Fig. 3 Geological plan view of the Gacun deposit (after Li Shu et al., 1996)

界面附近靠近碎屑岩的一侧,碳酸盐岩中也可出现少量矿体。部分碳酸盐岩型矿床有时也受到此类界面的控制,矿体主要产于 Si/Ca 界面附近靠近碳酸盐岩的一侧,碎屑岩中可出现少量矿化。本次研究统计的 12 个火山岩型 SEDEX 型铅锌矿床均受 Si/Ca 界面的控制,15 个碳酸盐岩型矿床中,有 9 个矿床不同程度地受 Si/Ca 界面的控制。

实例一:内蒙古炭窑口锌铜矿床

炭窑口矿区共有 6 个主要矿体,均分布于狼山群第二岩组上部白云质灰岩与碳质板岩的互层带内。第二岩组的下部为石英岩和云母石英片岩互层,第三岩组以厚层石英岩为主夹薄层千枚状片岩。6 个矿体中以Ⅲ号矿体为主要矿段,所划分的 5 个含矿层内的锌矿体多产于白云岩或白云质灰岩与碳质板岩的界面附近(图 4),碳酸盐岩和板岩中均有矿化发育。

实例二:四川赤普铅锌矿床

赤普铅锌矿床是碳酸盐岩型铅锌矿床的代表,具有铅锌矿体产于碳酸盐岩地层中的特点。铅锌矿化沿灯影组顶部多层层间滑动剥离破碎带分布,从上到下有 3 个矿化层,第 I 矿化层为主矿体,围岩是角砾竹叶状白云岩,顶板为褐色页岩,第 II、III 矿化层所含工业矿体很少,围岩分别为微晶白云岩和硅质微晶白云岩(杨应选等,1994,图 5)。龙训荣(1995)在以上 3 个矿化层的基础上划分出了另外 2 个薄的次要矿化层,第 IV 矿化层的围岩为细晶白云岩,第 V 矿化层的围岩为微晶白云岩夹数层黏土质粉砂岩,矿化层的顶板为下寒武统筇竹寺组底部的黑色薄层砂岩层。总之,赤普铅锌矿床的矿化体位于震旦系碳酸盐岩与寒武系碎屑岩之间的 Si/Ca 界面之下的碳酸盐岩中。

3.3.2 碳酸盐岩与粗碎屑岩的界面

体现为浅海(湖)相碳酸盐岩与滨浅海或河流相砂岩、砾岩之间的岩性界面。矿体既可产于界面之间,也可产于界面一侧的某一岩系中。此类界面主要存在于砂、砾岩型或顶、底板为砂、砾岩的铅锌矿床中,最具代表性的是云南金顶和新疆乌拉根铅锌矿床。

实例一:云南金顶铅锌矿床

金顶铅锌矿床是世界上产于砂岩类粗碎屑岩系中最大的铅锌矿床之一,其基底主要为前寒武系结晶岩系,盖层是以中-新生界为主的陆相碎屑夹蒸发岩沉积(王登红等,2005)。该矿区内的北厂、架崖

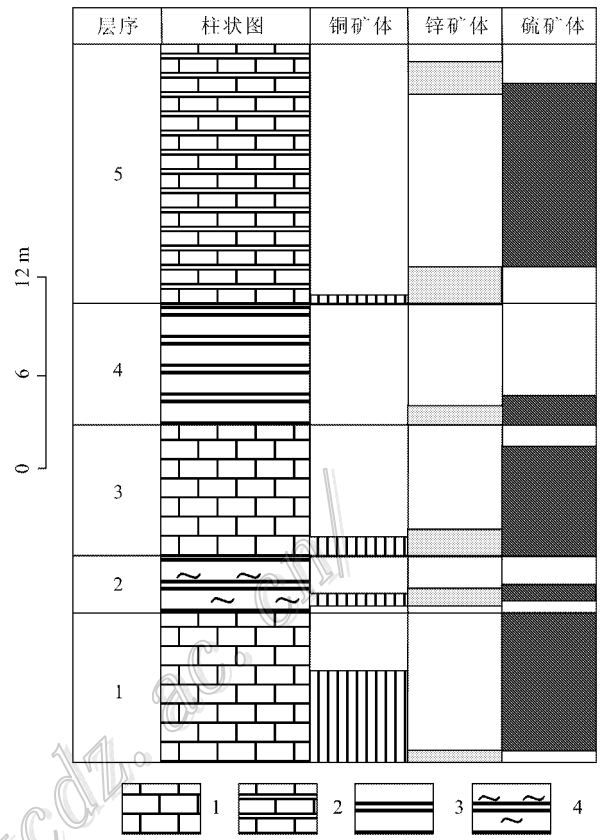


图 4 炭窑口矿床含矿层位柱状图(据黄崇轲等,2001)

1—白云岩或白云质灰岩;2—白云质灰岩(或白云岩)与碳质板岩互层;3—碳质板岩;4—碳质板岩与千枚岩互层

Fig. 4 Stratigraphic column of ore-bearing layer in the Tanyaokou deposit (after Huang et al., 2001)

1—Dolomite or dolomitic limestone; 2—Interbedded dolomitic limestone (or dolomitic) and carbonaceous slate; 3—Carbonaceous slate; 4—Interbedded carbonaceous slate and phyllite

山、西坡、白草坪等矿段的矿体均产于三合洞组灰岩与云龙组粉砂岩、泥岩接触带内形成的景星组灰岩和灰岩角砾岩带内,云龙组为含膏盐的碎屑沉积岩(图 6)。石膏往往代表氧化条件下的酸性环境,与其上覆的硫化矿体的中性、还原条件有着明显的区别。矿体下伏的膏盐层不仅为矿体定位提供了地球化学障,同时也不能排除其为铅锌矿的形成提供硫源的可能;矿体上覆的泥岩、泥质粉砂岩层为矿体的定位提供了很好的盖层条件。因此,金顶铅锌矿区内的矿体明显受 Si/Ca 界面的控制,多定位于碳酸盐岩与砂岩的接触带附近。

实例二 新疆乌拉根铅锌矿床

乌拉根铅锌矿床的矿体赋存于上白垩统英吉沙群的顶部(K_2^3)和古近系古新统的底部(E_1)。下部矿

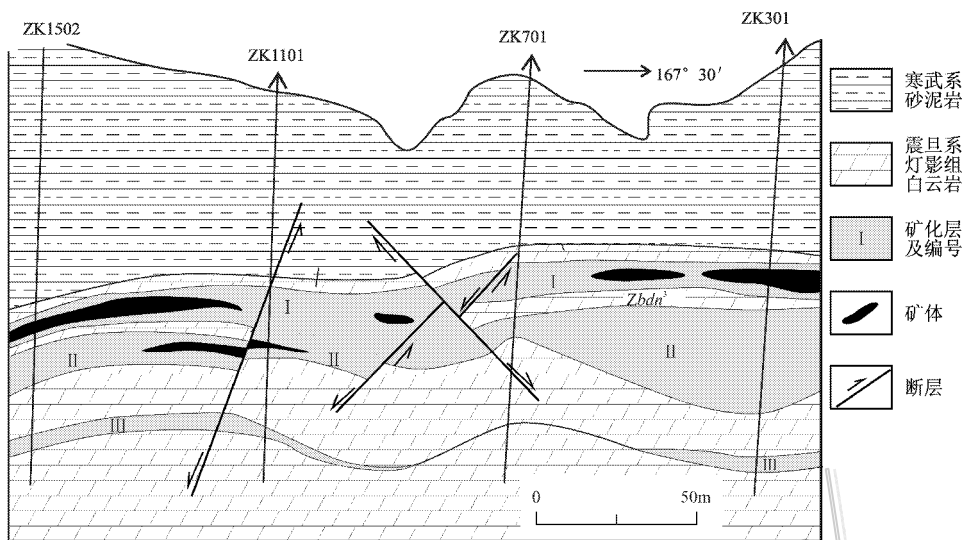


图 5 赤普铅锌矿床剖面图(据杨应选等,1994 修改)

Fig. 5 Geological section of the Chipu Pb-Zn deposit(modified after Yang et al. ,1999)

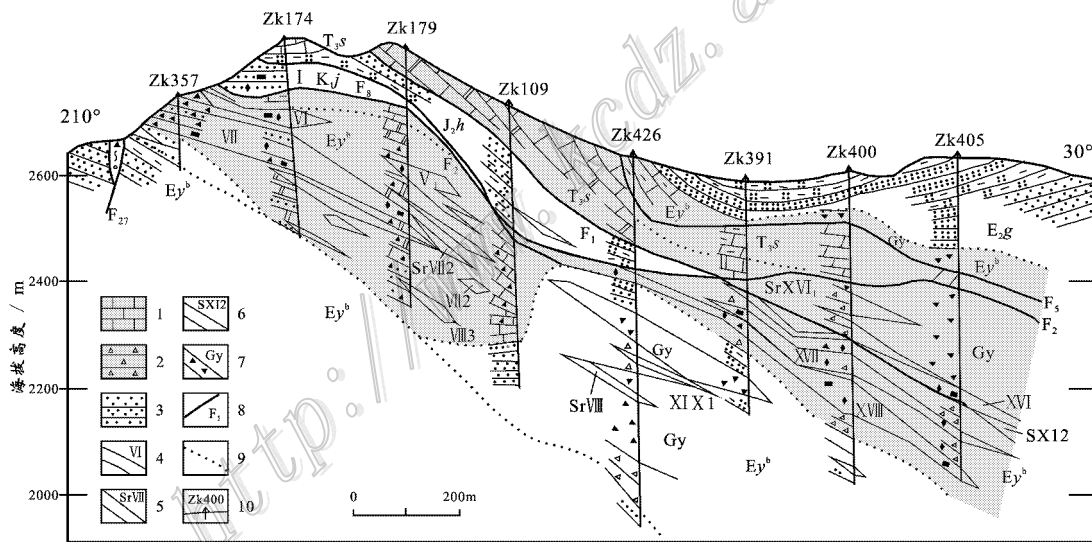


图 6 金顶铅锌矿床北厂-跑马矿段地质剖面图(据李永强 2006 修改)

1—灰岩;2—灰岩角砾岩;3—粉砂岩;4—铅锌矿体及编号;5—天青石矿体及编号;6—硫铁矿体及编号;7—石膏矿体及编号;8—断层及编号;9—地层分界线;10—钻孔及编号

Fig. 6 Geological section of Beichang-Paoma ore block of the Jinding Pb-Zn deposit(modified after Li ,2006)

1—Limestone ;2—Limestone breccia ;3—Siltstone ;4—Pb-Zn ore body and its serial number ;5—Celestite ore body and its serial number ;6—Pyrite ore body and its serial number ;7—Gypsun ore body and its serial number ;8—Fault and its serial number ;9—Stratigraphic boundary ;10—Drill hole and its serial number

层的赋矿层为英吉沙群顶部吐依洛克组,以灰白色砂岩为主,局部过渡为细砾岩,矿体以锌为主,产于灰白色砂岩中;上部矿层的赋矿层为古近系古新统底部阿尔塔什组,其岩性包括天青石化灰岩、角砾状灰岩(含石膏)和(或)多孔状灰岩,矿体为铅锌矿体。赋矿层的上部为泥灰岩、含石膏透镜体或结核

的黏土岩、石膏层和介壳灰岩(图7)。可见,赋矿层为碎屑岩与碳酸盐岩的过渡层,其下部碎屑岩内的矿化以锌为主,上部碳酸盐岩中铅锌矿化发育。

以上3种类型 Si/Ca 界面主要是根据界面两侧岩石的岩性及物理性质所做的初步划分。实际上,这3类不同界面之间并非截然不同的组合类型,可

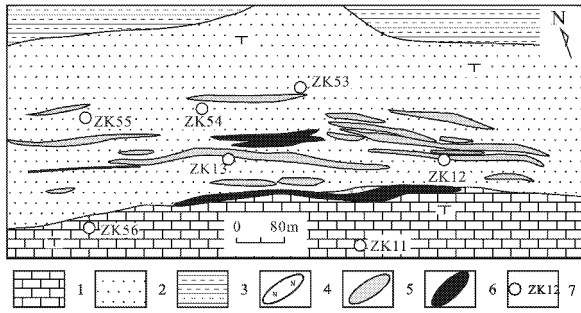


图7 乌拉根铅锌矿北矿带地质简图

(据蔡宏渊等 2002)

- 1—古近系阿尔塔什组灰岩；2—上白垩统灰白色砂岩夹黏土岩；
3—上白垩统黏土岩；4—天青石灰岩；5—铅锌矿体；6—锌矿体；
7—钻孔及编号

Fig. 7 Geological sketch map of northern ore zone of the Wulagen Pb-Zn deposit (after Cai et al., 2002)

- 1—Limestone of Palaeogene Aertashi Formation; 2—Upper Cretaceous grayish white sandstone intercalated with claystone; 3—Upper Cretaceous claystone; 4—Celestite-bearing limestone; 5—Pb-Zn ore body; 6—Zn ore body; 7—Drill hole and its serial number

将其看作一个统一的整体,总体上存在两个端员,一个是沉积接触界面,另一个是侵入接触界面,两者之间存在中间过渡类型的界面。沉积接触界面主要对应于沉积成因或喷流沉积的层状铅锌矿床,侵入接触界面主要对应于与岩浆作用有关的铅锌矿床,介于两者之间的则包括与火山作用有关的矿床、与岩浆热液有关的矿床。当地层内发生岩浆侵入作用时,多发育由侵入接触界面构成的碳酸盐岩与中-酸性岩的界面;当岩浆喷出地表或者接近地表时,既可发育侵入接触界面,也可发育沉积接触界面,往往形成碳酸盐岩与火山岩的界面、碳酸盐岩与细碎屑岩的界面;当岩浆或火山热液影响范围较远时,既可形成顺层的沉积界面,又可形成切层的热液接触界面,表现形式多为碳酸盐岩与硅化带的界面;当区域内缺少岩浆活动时,多形成顺层交代或沉积接触界面,也可形成少量的热液接触界面,表现形式为碳酸盐岩与碎屑岩的界面。因此,同一类型界面可在多类成矿作用中出现,而同一成矿作用也可形成多种类型的界面。Si/Ca界面将岩浆岩型、火山岩型、沉积岩型3大成因类型的铅锌矿床均涵盖其中,Si/Ca界面对所有类型铅锌矿的成矿均具有重要意义,对铅锌矿成因类型的划分起到了一定的辅助作用。

4 Si/Ca界面控矿机制探讨

4.1 元素地球化学

Si/Ca界面是含Si的硅酸盐岩类与含Ca的碳酸盐岩类之间的界面。

Si为亲氧元素,与O有极强的亲和力,在自然界中主要以 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 四面体形式形成各种硅酸盐矿物。

Ca为金属元素,它与强负电性的元素O、F结合,可形成以离子键为主的化合物,Ca在矿物中的类质同象多以Ca-Na和Ca-Mg以及Ca-稀土元素形式存在。

Pb和Zn元素的离子最外层电子数均为18,属铜型离子,为亲硫元素,具有形成硫化物及其类似化合物的强烈倾向,较难呈离子状态存在,常成为原子晶格或金属晶格,是构成金属矿床的主要成矿元素。Pb元素在自然界中以 Pb^{2+} 为主,其氧化物只有在极强的氧化环境中才可能存在,除亲硫性外,Pb也具有亲氧性,在含钾和钙的造岩矿物中,Pb能以类质同象取代其中的K或Ca,火成岩中的Pb就主要以类质同象形式存在于造岩矿物中,只有少量Pb能以方铅矿显微包体或自然铅的形式存在于硅酸盐矿物中。Zn在自然界中以 Zn^{2+} 为主,具有一定程度的亲氧性,但比亲硫性差,Zn可与 Mg^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 以及一些微量元素(Ge、Ga、In、Cd)等以类质同象相替代,Zn比一般造岩元素的电负性高得多,因此,较难进入一般造岩矿物,它的离子电位又中等偏低,趋向于在岩浆结晶作用的后期集中(牟堡磊,1999)。由于铅、锌元素的离子半径较大,能量系数和晶格能较小,在岩浆结晶的早期,Pb、Zn元素往往以类质同象的形式存在于造岩矿物中,很难以方铅矿或闪锌矿的形式“独立”出来形成工业矿体(王育民,1984),只有当硅酸盐热液中的气相组分 S^{2-} 或 HS^- 聚集时,铅、锌才可能发生大规模的沉淀成矿。碳酸盐岩的化学性质十分活泼,易于溶解,灰岩经白云岩化,岩石的孔隙度及渗透率都大为增加,为活化转移的成矿物质的富集沉淀提供了有利环境(王文斌,1983)。此外,由Pb、Zn元素组成的硫化物为低温矿物,在构造活动不太强烈的情况下即可发生迁移变化(李浩鸣,1983),产生次生富集作用,因此,铅锌矿多沉淀于碳酸盐岩地层中。

4.2 Si/Ca 界面构成异相定位空间

岩石的物理性质对于成矿作用方式、矿化强度、矿体产状及矿床类型等均有明显的控制作用。例如,可塑性大的岩石不易产生裂隙,往往成为矿液运移的隔挡层;当脆性岩石与塑性岩石共存时,在脆性岩石中易成矿;当发生褶皱作用时,由于物性差异往往导致在界面附近形成层间滑脱面或褶皱虚脱部位,构成有利的成矿空间;化学性质活泼的碳酸盐岩可与矿液发生交代作用,形成砂卡岩型或热液交代型矿体。对铅锌矿床定位起着关键作用的 Si/Ca 界面是一类典型的岩石物理性质发生明显变化的岩性界面,它与其他类型的控矿因素(如断裂、褶皱、不整合面、层间滑动面等)有时相互关联,共同构成了控制矿床产出的关键要素。

钙质岩石物理性质的特征是硬度小、性脆、遇酸易溶解;硅质岩石的特征则是硬度大、可塑性大、化学性质稳定。这两者之间存在着明显的物性差异。由于钙质层的易碎、易溶等特点,当含矿的热液流体进入到碳酸盐岩地层时,较易在地层内产生破碎、溶解、扩容等现象,从而为矿质的沉淀提供空间,如大梁子、天宝山、凡口、会泽、栖霞山和 Maestrat 等铅锌矿床(区)多具有这种破碎带、断裂、溶洞的容矿特征(Grandia et al., 2003; 张长青等, 2009)。同时,碳酸盐岩中灰岩的白云岩化也是铅锌矿体定位的重要因素之一,白云岩化作用本身对孔隙有直接影响,既可造成储集空间的增大,也可使其减小,当 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子等摩尔交代时,由于 Mg^{2+} 的半径较小,白云石的摩尔体积比方解石或文石的都要小(张学丰等, 2010),白云岩化后晶体体积减小,孔隙度升高,储集空间将会增大。对于硅质岩石而言,由于其硬度、耐酸性和孔渗性较钙质岩石弱,当与含矿热液相遇时,很难发生像钙质岩石那样的溶解、破碎、扩容的作用。若岩性为砂岩、角砾岩等孔渗性较好的硅质岩石时,岩石的孔隙可作为容矿的空间,往往形成浸染状或角砾状矿石(如金顶、乌拉根铅锌矿床)(蔡宏渊等, 2002; 李永强, 2006);若岩性为孔渗性较差的泥岩、页岩时,它们对含矿热液的流通起到“阻隔”作用,通常成为矿化热液流动的“屏障”,为矿体定位提供了“盖层”条件,从而导致矿体聚集于盖层界面之下(如赤普、彩霞山等铅锌矿床),或者,在碳酸盐岩与细碎屑岩互层的部位发育铅锌矿体(如炭窑口、Red Dog 等矿床)(黄崇轲等, 2001; Moore et al., 1986)。当发生岩浆侵入作用时,在岩体内部形成浸

染状、脉状斑岩型矿体(如冷水坑、新华、香乔等铅锌矿床)(《中国矿床》编委会, 1989; 张乾, 1990; 孟祥金等, 2009);岩体作用于细碎屑岩地层时,通常难以发生交代蚀变作用,只有当能量足够强时,会相应地发生角岩化作用,但角岩化过程中伴随的矿化作用往往较砂卡岩类矿化作用弱得多(如甲玛多金属矿床)(唐菊兴等, 2010)。因此,对铅锌矿床而言,碳酸盐岩往往成为矿体定位的有利岩性,而砂泥岩、岩浆岩、火山岩类通常构成次要的含矿岩性。

4.3 Si/Ca 界面提供地球化学障

地球化学障是指,在元素迁移过程中,如果环境的物理化学条件发生了急剧变化,导致介质中原来稳定迁移的元素迁移能力下降,元素形成大量化合物而沉淀,那么,这些引起元素沉淀的条件或因素就称之为地球化学障。

Si/Ca 界面与其他各种物理化学交换界面一样,也是地球化学障,属于一种地球化学动力学界面(叶天竺等, 2007)。Si/Ca 界面往往反映了外界条件的改变,物理变化包括岩性、岩石能干性(脆性或韧性)、岩石成分、岩石渗透率、压力、温度等,化学变化包括氧化还原电位、酸碱环境等,这些构成了地质体之间的转化界面。从物理条件来说, Si/Ca 界面本身既是岩性界面,又反映了岩石成分、能干性和渗透率的变化。界面物理性质的变化影响着铅锌矿体的定位,例如,界面两侧岩石能干性的差异,往往导致界面处发育层间破碎或褶皱核部的虚脱空间,因此,界面与层间破碎或褶皱变形共同控制了“背斜核部”和“层间破碎带”型矿体的产出;由于界面两侧岩石渗透率存在差异,渗透性差的硅质岩层,通常起到隔绝流体运移的作用,导致成矿物质在硅质岩对侧富集、成矿,形成了沿层交代成因的似层状矿体;由于界面两侧岩层温度、压力的变化,当岩体侵入时,或遇到断裂、裂隙系统时,则形成“接触交代型”或“脉状型”矿体。从化学条件来说,酸碱度变化、氧化还原条件变化往往控制了沉积矿床和热液矿床的定位。Cooke 等(2000)研究认为,当 pH 值 < 4 时, Pb、Zn 元素可在盆地卤水中与还原硫一起进行迁移,当 pH 值升高时, Pb、Zn 以硫化物的形式在碳酸盐岩地层中发生沉淀,而在硅质碎屑岩中则可稳定存在。由于铅锌多以硫化物形式形成矿床,因此,还原条件控制矿体定位则更是不言而喻了。碳酸盐沉积主要分布在低纬度带无河流注入的清澈而温暖的浅海陆棚环境以及滨岸地区,往往具有氧化、弱碱性条件,既可

形成于封闭的高盐度环境,又可形成于开放的低盐度环境。而泥页岩往往形成于深海或半深海、深湖或半深湖的环境,往往具备还原、封闭、低盐度等条件。两者之间的环境差异造就了化学条件的变化,构成了地球化学动力学界面,从而为铅锌矿化体沉淀成矿提供了条件。

5 结论

Si/Ca 界面是指含硅酸盐的岩石与含碳酸盐的岩石之间形成的岩性界面。它既是岩石物理条件变化界面,又是地球化学条件变化界面,往往直接控制着铅锌矿体的定位。

Si/Ca 界面可划分为侵入接触界面、火山-沉积界面、沉积界面等 3 种型式。Si/Ca 界面对所有类型铅锌矿的成矿均具有重要意义,又对铅锌矿成因类型的划分起到了一定的辅助作用。

Si/Ca 界面既体现为地球物理界面,又是一种地球化学界面,为铅锌矿体的定位提供了物理化学条件。元素地球化学分析表明,还原性的碳酸盐岩环境易于铅锌矿化的形成,硅质界面往往构成铅锌元素进一步发生迁移的隔挡层。

参考文献/References

蔡宏渊,邓贵安,郑跃鹏. 2002. 新疆乌拉根铅锌矿床成因探讨[J]. 矿产与地质, 16(1): 1-5.

程裕淇,陈毓川,赵一鸣. 1979. 初论矿床成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 1(1): 32-58.

程裕淇,陈毓川,赵一鸣. 1983. 再论矿床成矿系列问题[J]. 中国地质科学院院报, 6(2): 1-63.

戴自希,王家枢, 编著. 2004. 矿产勘查百年[M]. 北京:地震出版社. 241页.

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

戴自希,盛继福,白冶, 等编著. 2005. 世界铅锌资源的分布与潜力[M]. 北京:地震出版社. 387页.

黄崇轲,白冶,朱裕生,王惠章,尚修志, 编著. 2001. 中国铜矿床[M]. 北京:地质出版社. 579-581.

李浩鸣. 1983. 碳酸盐岩层控铅锌矿活化富集机理初探[J]. 大地构造与成矿学, 7(2): 126-135.

李能强,彭超, 编著. 1996. 湖南水口山铅锌金银矿床[M]. 北京:地震出版社. 107页.

李舒, 编著. 1996. 中国银矿床主要类型及矿床特征[M]. 北京:地震出版社. 8-17.

李永强. 2006. 兰坪金顶超大型铅锌矿床与硫酸盐矿床共存共生关系研究[D]. 导师:薛春纪. 西安:长安大学. 52页.

龙训荣. 1995. 四川赤普铅锌矿床含矿岩系的研究及在找矿评价中的意义[J]. 四川地质学报, 15(2): 123-128.

孟祥金,侯增谦,董光裕,刘建光,左力艳,杨竹森,肖茂章. 2009. 江西冷水坑斑岩型铅锌银矿床地质特征、热液蚀变与成矿时限[J]. 地质学报, 83(2): 1951-1967.

牟保磊. 1999. 元素地球化学[M]. 北京:北京大学出版社. 227页.

唐菊兴,王登红,汪雄武,钟康惠,应立娟,郑文宝,黎枫,郭娜,秦志鹏,姚晓峰,李磊,王友,唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495-506.

王登红,陈毓川,徐珏,邹天人,薛春纪,罗君烈,骆耀南,伍广宇,李志伟,余金杰,闫升好,杨建民,傅旭杰,付小方,傅德明,楚莹石,魏琳,李晓焰. 2005. 中国新生生成矿作用[M]. 北京:地质出版社. 853页.

王文斌. 1983. 白云岩与层控铅锌矿床关系的剖析[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 4(1): 59-72.

王育民. 1984. 中国铅锌矿床地质勘探问题研究[M]. 长沙:湖南省地质矿产局. 522页.

吴淦国,邓军. 1999. 金属矿床矿田构造的研究现状[A]. 见:陈毓川,王保良,王安建, 等编著. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法[C]. 北京:地震出版社. 142-149.

杨应选,柯成熙,林方成,李忠雄,管士平. 1994. 康滇地轴东缘铅锌矿床成因及成矿规律[M]. 成都:四川科技大学出版社. 175页.

叶天竺,薛建玲. 2007. 金属矿床深部找矿中的地质研究[J]. 中国地质, 34(5): 855-869.

张长青,余金杰,毛景文,芮宗瑶. 2009. 密西西比型(MVT)铅锌矿床研究进展[J]. 矿床地质, 28(02): 195-210.

张乾. 1990. 山东香芥斑岩型铅锌矿床的地球化学特征及成因探讨[J]. 地质找矿论丛, 5(2): 12-19.

张学丰,刘波,蔡忠贤,胡文瑾. 2010. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性[J]. 地质科技情报, 29(3): 79-85.

赵鹏都,池顺都. 1991. 初论地质异常[J]. 地球科学, 16(3): 241-248.

《中国矿床》编委会. 1989. 中国矿床(上册)[M]. 北京:地质出版社. 538页.

《中国矿床发现史·综合卷》编委会. 2001. 中国矿床发现史·综合卷[M]. 北京:地质出版社. 801页.

朱裕生. 2006. 矿产预测理论——区域成矿学向矿产勘查延伸的理论体系[J]. 地质学报, 80(10): 1518-1527.

Cooke, D R, Bull S W, Large R R and McGoldrick P J. 2000. The importance of oxidized brines for the formation of Australian Proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (Sedex) deposits[J]. Econ. Geol., 95: 1-18.

Grandia F, Cardellach E, Canals A and Banks D A. 2003. Geochemistry of the fluids related to epigenetic carbonate-hosted Zn-Pb deposits in the Maestrat basin, Eastern Spain: Fluid inclusion and isotope (Cl, C, O, S, Sr) evidences[J]. Econ. Geol., 98: 933-954.

Moore D W, Young L E, Modene J S and Plahuta J T. 1986. Geologic setting and genesis of the Red Dog zinc-lead-silver deposit, western Brooks Range, Alaska[J]. Econ. Geol., 81: 1696-1727.