

doi: 10.12029/gc20170403

宋玉财, 侯增谦, 刘英超, 张洪瑞. 2017. 特提斯域的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床[J]. 中国地质, 44(4): 664–689.

Song Yucai, Hou Zengqian, Liu Yingchao, Zhang Hongrui. 2017. Mississippi Valley-Type (MVT) Pb–Zn deposits in the Tethyan domain: A review[J]. *Geology in China*, 44(4): 664–689(in Chinese with English abstract).

特提斯域的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床

宋玉财 侯增谦 刘英超 张洪瑞

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要:特提斯域是全球最重要的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床富集区,矿床广泛地分布在陆–陆碰撞造山带两侧的陆块上,就位于碰撞形成的褶皱–逆冲带和前陆带内,成矿通常发生在碰撞挤压作用晚期或之后、区域处于走滑或伸展的阶段。矿床、矿体的就位与张性断裂密切相关,主要控矿因素有蒸发盐底辟构造、碳酸盐岩溶蚀垮塌构造、蒸发盐溶蚀垮塌构造、高孔隙度白云岩、含重晶石地层等。油气流体在许多矿床和矿集区出现,其主要通过与硫酸盐发生反应为铅锌成矿提供还原硫。陆–陆碰撞的大地构造环境、大量的蒸发盐、丰富的油气流体是特提斯域富集MVT矿床的重要原因,域内寻找MVT矿床的潜力巨大。

关键词:密西西比河谷型矿床; 陆–陆碰撞; 蒸发盐; 油气流体; 张性断裂; 特提斯

中图分类号: P618.42–43 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2017)04–0664–26

Mississippi Valley–Type (MVT) Pb–Zn deposits in the Tethyan domain: A review

SONG Yucai, HOU Zengqian, LIU Yingchao, ZHANG Hongrui

(*Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China*)

Abstract: The Tethyan domain hosts the world’s most abundant Mississippi Valley–Type (MVT) Pb–Zn deposits, which occur in fold–thrust belts and forelands on both sides of the continent–continent collisional zone through the whole Tethyan domain. Mineralization commonly took place when the ore districts were experiencing strike–slip or extensional deformation, which occurred after regional compression or during the late stage of a compressional deformation event. The main ore–controlling factors include extensional faults, evaporite diapir, carbonate dissolution and collapse, evaporite dissolution and collapse, porous dolostone, and barite–bearing strata. Records of hydrocarbon fluids are present in many Pb–Zn deposits and ore districts of the Tethyan domain. They reacted with (dissolved) sulfate to provide reduced sulfur for the ore formation. The generation of such abundant MVT Pb–Zn deposits in the Tethyan domain can be attributed to the continent–continent collisional tectonic setting, large amounts of evaporites, and plentiful hydrocarbon fluids. This study raises the exploration potential for MV TPb–Zn deposits in the Tethyan domain.

收稿日期: 2017–08–06; 改回日期: 2017–08–20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0600306)、国家自然科学基金项目(41773043、41320104004、41773042、41772088)、国土资源大调查项目(DD20160024–02)资助。

作者简介: 宋玉财, 男, 1978年生, 博士, 研究员, 主要从事沉积岩容矿贱金属矿床研究; E-mail: song_yucai@aliyun.com

Key words: Mississippi Valley–Type lead–zinc deposit; continent–continent collision; evaporite; hydrocarbon fluids; extensional fault; Tethys

About the first Author: SONG Yucai, male, born in 1978, doctor, senior researcher, engages in the study of sediments–hosted base metal deposits; E–mail: song_yucai@aliyun.com.

Fund support: Supported by National Key R&D Plan (No. 2016YFC0600306), National Natural Science Foundation of China (No. 41773043, 41320104004, 41773042, 41772088), and the Geological Survey Project of China (No. DD20160024–02).

1 引言

密西西比河谷型(MVT)矿床是世界最重要的铅锌矿床类型之一,其铅锌资源量约占全球铅锌资源总量的16%左右(Singer, 1995; Wilkinson, 2014)。这类矿床通常与岩浆活动无直接成因关系,容矿岩石以碳酸盐岩为主,成矿流体具有低温(70~250 °C)和中—高盐度(>~10wt%)的盆地卤水特征,后生成矿(周朝宪, 1997; Leach et al., 2005, 2010; 刘英超等, 2008; 张长青等, 2009)。

横跨欧亚大陆南部的特提斯域,堪称是世界上MVT铅锌矿床最为富集的地域(图1)。在世界范围,目前铅锌金属总量排名在前30位的MVT矿床中,有一半来自特提斯域(图2a),其中,伊朗的Mehdiabad、中国的金顶和火烧云矿床以其超大规模的铅锌金属量,排在前3名(图2a);欧洲的Upper Silesia矿集区,铅锌金属量总计达40.8 Mt,是世界上最大的MVT铅锌矿集区(表1);域内有5个矿床单个矿床铅锌金属量超过5 Mt(图2b)。巨量的铅

锌金属富集,反映特提斯域具有得天独厚的形成MVT矿床的地质条件。尽管如此,对特提斯域的总体的勘查程度并不高,特别是从伊朗至中国青藏高原再至东南亚地区,仍有大量勘查程度低的地区和找矿的“空白区”,寻找MVT矿床的潜力巨大。

本文主要依据发表的文献和笔者自己的研究,对特提斯域MVT铅锌矿床进行综述,重点介绍地质背景、矿床的空间分布、成矿构造环境、主要控矿因素等,最后分析为何特提斯域富集MVT铅锌矿床,以期对理解区域成矿及开展区域找矿有所启示。

2 矿床类型

表1列出了特提斯成矿域内的重要MVT矿床,其单个矿床的铅锌金属量合计均在0.1 Mt之上(以公开发表的数据为准)。由于我们对一些未公开发表的资料掌握有限,难免疏漏掉一些矿床,但不影响对特提斯域MVT矿床总体特征的把握。本文将不讨论沉积岩或变质岩内的脉状矿床,如中国兰坪的富隆厂、白秧坪等脉状Pb–Zn矿床,中伊朗地块



图1 特提斯域的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床分布
(底图来自 <http://www.maps-for-free.com/>)

Fig.1 Distribution of Mississippi Valley–type (MVT) lead – zinc deposits in the Tethyan domain (background map after <http://www.maps-for-free.com/>)

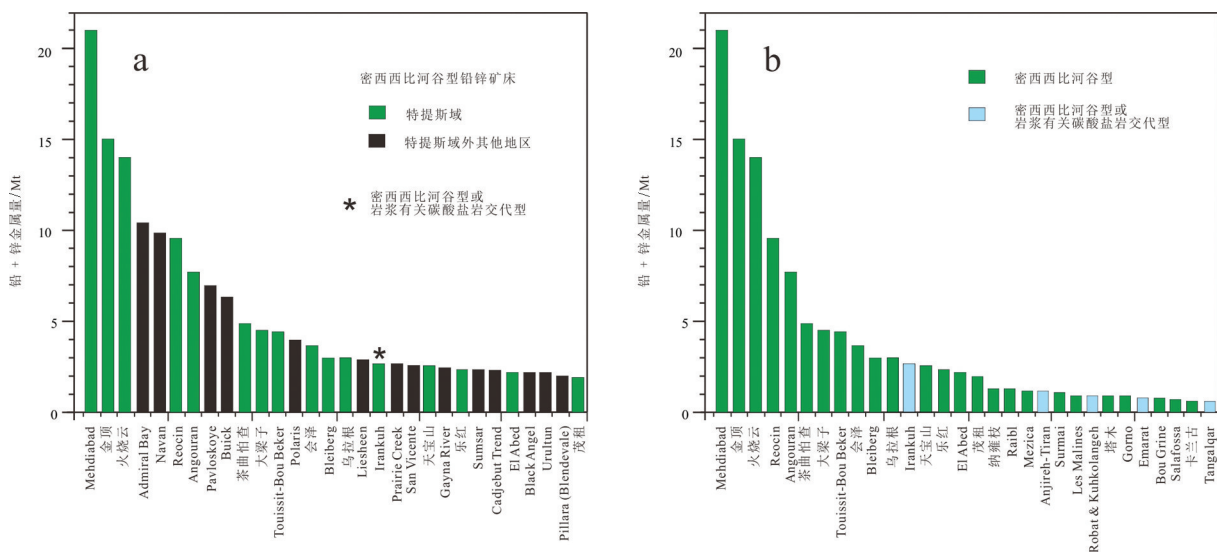


图2 a—全球金属量排名前30位的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床(根据表1数据和Taylor et al., 2009统计,排名未区分储量和资源量的差别);b—特提斯域内金属量排名前30位的密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床(根据表1统计数据,排名未区分储量和资源量的差别)

Fig. 2 a—Top 30 Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits in the world (based on data from Table 1 and Taylor et al., 2009; this ranking is regardless of category of resources); b—Top 30 Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits in the Tethyan domain (based on data from Table 1; this ranking is regardless of category of resources)

Behabad带和伊朗东北Kopeh Dag-Hindu Kush带内的(F-Ba-)Pb-Zn矿床(Jankovic, 1984; Rajabi et al., 2012),这些矿床往往规模小或可能与岩浆或变质作用有关,因此不纳入MVT矿床类型(Leach et al., 2005)。

对于在中国青藏高原新发现的超大型非硫化物铅锌矿床——火烧云矿床的成因,前人提出是“与岩浆有关的喷流沉积型”矿床(董连慧等, 2015),但笔者认为其为发生表生氧化的MVT矿床,原因如下:观察发现,火烧云矿床的赋矿围岩——中侏罗世龙山组碳酸盐岩含生物碎屑灰岩,普遍发育鸟眼构造,并发育大套沉积石膏(矿床东北约1 km处),故赋矿围岩是沉积在蒸发和浅水环境的,在如此浅的水深条件下,是不可能发生海底热液喷流作用的(刘继顺, 1996)。事实上,喷流沉积型(SEDEX)矿床往往形成于斜坡至深海环境,赋矿围岩以碎屑岩(夹少量碳酸盐岩)为主,而不是以碳酸盐岩为主,相反,以碳酸盐岩为主的地层是MVT矿床的典型赋矿围岩(Leach et al., 2005, 2010)。通过钻孔编录发现,多数钻孔或多或少见方铅矿残留,镜下观察中常见细小方铅矿,并被白铅矿“交代”,清楚地显示出先存的硫化物发生了次生氧

化。在火烧云矿床,之所以方铅矿而非闪锌矿被大量保留,是因为表生环境下,锌在流体中的迁移能力远比铅强,故在表生氧化过程中,闪锌矿先于方铅矿被完全氧化,所以原生的方铅矿要比闪锌矿更容易被保留下来(Hitzman et al., 2003)。已发表的数据表明(董连慧等, 2015),火烧云白铅矿比围岩和菱锌矿具有更低 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值,显示在低温($<50^\circ\text{C}$)流体(大气降水)条件下白铅矿、菱锌矿和方解石发生了同位素的分馏(Gilg et al., 2008),系表生作用结果。此外,热动力学模拟研究表明,菱锌矿在相对高温的热液($>100^\circ\text{C}$)环境下溶解度高,Brugger et al.(2003)指出“热液菱锌矿是不可能的”。由于火烧云矿区内缺乏岩浆活动,也缺乏与岩浆活动相关的热液蚀变,如硅化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、矽卡岩化等,矿床具有简单的铅锌金属组合,碳酸盐岩容矿,原生硫化物赋存在灰岩角砾岩中,呈交代或开放空间充填的矿化特征等,这些均显示原生的铅锌硫化物矿化和MVT矿床矿化特征一致,原生矿床应为MVT矿床。原生矿床在形成后发生强烈的表生氧化,从而形成目前的、以非硫化物铅锌为主的矿石。事实上,世界上以菱锌矿为主的非硫化物型铅锌矿床,多数是由MVT

表1 特提斯域密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床、矿集区的基本信息
Table 1 General features of Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits in the Tethyan domain

位置	矿床/矿集区	坐标		金属量/Mt (Pb+Zn)	平均品位/%		赋矿围岩	赋矿围岩时代	主要控矿因素	成矿时代 (定年方法)	重要参考文献
		北纬	东经		Pb	Zn					
中国	青藏高原中、东部	34°04'36"	91°53'30"	4.8	2.2	0.3	灰岩	晚二叠世	碳酸盐岩溶蚀 垮塌构造	<23~16 Ma(最年轻 矿化地层时代)	宋玉财等, 2011; Song et al., 2015
		厂洞	22°59'36"	>0.1	-	-	灰岩	早二叠世	碳酸盐岩溶蚀 垮塌构造	-	-
		东莫扎抓	33°07'46"	95°42'39"	0.8	-	白云岩	晚三叠世	高孔隙度白云 岩	-	Liu et al., 2011
		火烧云	34°36'14"	79°08'20"	14.00	5.63	灰岩	中侏罗世	蒸发盐溶蚀跨 塌构造	-	董连慧等, 2015
		金顶	26°24'30"	99°25'40"	15.00	1.29	砂岩、 灰岩	古新世	蒸发盐底辟构 造	26~20 Ma (古地磁)	Xue et al., 2007; Leach et al., 2017
		拉拢拉	31°14'53"	96°41'10"	>0.1	-	灰岩	晚三叠世	?	-	刘英超等, 2013
		墨海拉亨	32°53'10"	95°45'53"	>1.0	-	灰岩	早石炭世	碳酸盐岩溶蚀 垮塌构造	-	Liu et al., 2015
		卡兰占	38°00'00"	76°24'00"	0.63	2.88	白云岩、 灰岩	早石炭世	碳酸盐岩溶蚀 垮塌构造	-	祝新友等, 1998, 2000
		塔木	38°25'12"	76°10'48"	0.89	2.94	白云岩、 灰岩	早石炭世	碳酸盐岩溶蚀 垮塌构造	-	祝新友等, 1998, 2000
		乌拉根	39°40'12"	75°04'48"	3.00	0.45	砂岩、 砾岩、灰岩	早白垩、 古新世	碳酸盐岩溶蚀 垮塌构造 砂岩、砾岩脊 矿	<65 Ma (最年轻 矿化地层时代)	祝新友等, 2010; Xue et al., 2014
		赤普	28°58'12"	102°48'00"	0.46	9.70	白云岩	新元古代	蒸发盐溶蚀跨 塌构造	-	吴越, 2013
		大渡河谷	29°01'12"	102°54'00"	0.40	1.96	白云岩	新元古代	蒸发盐溶蚀跨 塌构造	-	林方成, 2005
		大梁子	26°36'00"	102°50'24"	4.50	0.75	白云岩	新元古代	蒸发盐底辟构 造	-	王则江和汪岸儒, 1985; Zheng and Wang, 1991; 袁波等, 2014
		富乐厂	25°21'36"	104°23'24"	-	-	白云岩	早二叠世	高孔隙度白云 岩	-	李连廷, 2014
		会泽	26°38'24"	103°43'48"	3.80	5.20	白云岩	早石炭世	高孔隙度白云 岩	-	Han et al., 2007

续表1

位置	矿床/矿集区	坐标	金属量/Mt (Pb+Zn)	平均品位/%		赋矿围岩	赋矿围岩 时代	主要找矿因素	成矿时代 (定年方法)	重要参考文献	
				Pb	Zn						
泰国	金沙厂	27°42'00"	103°29'24"	0.42	4.07	5.03	白云岩	新元古代— 早寒武世	蒸发盐溶蚀 垮塌构造	-	郭欣, 2007; Zhou et al., 2015
	乐红	27°10'12"	103°16'12"	2.40	1.20	10.83	白云岩	新元古代	蒸发盐底辟 构造?	-	张自洋, 2003
	麻栗坪	26°12'00"	103°15'00"	0.21	3.64	12.25	白云岩	新元古代— 早寒武世	蒸发盐溶蚀 垮塌构造	-	贺胜辉等, 2014
	猫猫厂-榨子厂	26°58'12"	104°19'48"	0.1~0.5	-	-	白云岩、 灰岩	早石炭世	蒸发盐底辟 构造?	-	曾道国等, 2007
	毛坪	27°30'00"	104°00'00"	0.54	5.01	12.54	白云岩	晚泥盆世、 中石炭世	高孔隙度白 云岩	-	Wei et al., 2015
	茂租	27°00'00"	102°55'12"	2.00	4.15	7.25	白云岩	新元古代	蒸发盐溶蚀 垮塌构造	-	Zhou et al., 2013b
	纳雍枝	26°24'36"	105°38'24"	1.30	0.70	5.10	白云岩	早寒武世	高孔隙度白 云岩	-	彭松等, 2016; 陈伟等, 2017
	跑马	27°12'00"	102°48'00"	-	-	-	白云岩	早寒武世	蒸发盐溶蚀 垮塌构造	-	贺光兴等, 2006; 晏子贵等, 2006
	青山	26°31'48"	104°52'48"	0.30	9.90	22.30	白云岩	石炭纪	高孔隙度白 云岩	-	Zhou et al., 2013c
	杉树林	26°29'24"	105°01'12"	>0.5	-	-	白云岩、 灰岩	晚石炭世	高孔隙度白 云岩	-	Zhou et al., 2014
	筒箕湾	27°28'12"	103°56'24"	0.50	0.71~10.56	2.09~30.27	白云岩、 灰岩	中泥盆世、 早二叠世	蒸发盐底辟 构造?	-	Zhou et al., 2013d
	天宝山	26°58'12"	102°13'48"	2.60	0.81	9.84	白云岩	新元古代	蒸发盐底辟 构造	-	王则江和江岸儒, 1985; Zhou et al., 2013e
	天桥	27°03'36"	104°33'36"	0.38	Pb + Zn > 15	-	白云岩	早石炭世、 晚石炭世	高孔隙度白 云岩	-	Zhou et al., 2013a
	暹都	26°59'24"	104°42'36"	>0.5	-	-	白云岩	早二叠世	蒸发盐底辟 构造?	-	Zhou et al., 2013d
	Padang	16°40'56"	98°44'28"	0.62	0	12.0	白云岩	中侏罗世	?	-	Reynolds et al., 2003

巴基斯坦

续表1

位置	矿床/矿区	坐标	金属量/Mt (Pb+Zn)	平均品位/% Pb Zn	赋矿围岩	赋矿围岩 时代	主要控矿因素	成矿时代 (定年方法)	重要参考文献
Lasbla-Khuzdar构造带 伊朗	Surmai	27°43'17" 66°31'27"	1.12	0.66 3.00	灰岩	侏罗纪	早期重晶石?	-	Ahsan and Quraishi, 1997
	Kuit-e-Surmeh	28°30'00" 52°31'01"	0.17	5.40 12.10	灰岩	二叠纪	蒸发盐溶蚀垮塌构造	-	Liaghat et al., 2000
SSZ带	Angouran	36°35'28" 47°14'13"	7.62	3.95 30.30	大理岩、 片岩	新元古代 或寒武纪	蒸发盐底辟构造	<20 Ma (⁴⁰ Ar/ ³⁹ K同位素年龄)	Daliran et al., 2013
	Anjireh-Tiran*	28°30'00" 52°31'01"	1.20	- -	灰岩	早白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
	Chahalkh*	36°35'28" 47°14'13"	0.25	- -	白云岩	早白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
	Dushkharat*	32°43'31" 51°09'55"	0.16	7.50 13.50	白云岩	早白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
	Emarat*	- -	0.83	2.26 6.00	灰岩	早白垩世	裂隙	-	Ehya et al., 2010
	Haftsavarant*	- -	0.60	3.00 2.00	白云岩	早白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
	Irankeh*	33°51'04" 49°36'04"	2.70	2.50 11.00	白云岩	早白垩世	断裂	-	Ghazban et al., 1994
	Klshsh*	- -	0.33	- -	白云岩、 灰岩	晚白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
	Lakan*	32°31'01" 51°37'12"	0.38	4.50 3.00	灰岩	早白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
	Muchan*	- -	0.30	1.74 7.12	白云岩	早白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
中伊朗地块	Ravanj*	33°41'44" 49°43'30"	0.40	8.00 6.00	白云岩、 灰岩	早白垩世	断裂	-	Rajabi et al., 2012
	Robat & Kuhkolangeh*	- -	0.90	8.60 -	白云岩、 灰岩	早白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
	Vejin-e-Bala, Vejin-e-Paein*	34°10'09" 50°44'02"	0.38	2.20 2.1	灰岩	早白垩世	裂隙	-	Rajabi et al., 2012
	Chahsorb*	33°45'02" 49°46'48"	0.15	- -	白云岩	中三叠世	-	-	Rajabi et al., 2012
	Darreh-Zanjir, Darrehlaraz, Gharपालang*	- -	0.36	6.70 15.00	白云岩	早白垩世	高孔隙度白云岩	-	Rajabi et al., 2012
	Khan Jar*	34°03'15" 56°39'02"	0.24	20.00 4.00	白云岩、 灰岩	白垩纪	-	-	Mirnejad et al., 2015
	Kuigerd*	- -	0.20	- 15.00	白云岩	中三叠世	-	-	Rajabi et al., 2013
	Mansurabad, Farehabad*	31°22'01" 54°33'29"	0.50	4.00 14.00	白云岩、 灰岩	早白垩世	-	-	Rajabi et al., 2012
	Mehdiabad	- -	20.70	2.30 7.20	白云岩	早白垩世	早期重晶石	-	Reichert, 2007
	Nakhlak	- -	0.42	6.00 -	灰岩	晚白垩世	裂隙	-	Jazi et al., 2017

续表1

位置	矿床/矿集区	坐标	金质量/Mt (Pb+Zn)	平均品位/% Pb Zn	赋矿围岩	赋矿围岩 时代	主要控矿因素	成矿时代 (定年方法)	重要参考文献
	Ozbak-Kuh	31°29'00"	0.28	4.00 10.00	白云岩	中泥盆世	蒸发盐岩溶蚀垮塌构造	-	Ehya, 2014
	Qalehmadan*	33°33'50"	0.40	1.80 10.80	白云岩	石炭纪	-	-	Rajabi et al., 2013
	Tangalqar*	34°40'01"	0.63	1.00 17.00	白云岩	中三叠世	-	-	Rajabi et al., 2013
Alborz Mountain带	Duna*	-	0.39	5.00 1.00	白云岩	二叠纪	裂隙	-	Mimejad et al., 2015
	Kelardash*	-	0.10	4.20 1.84	白云岩	中三叠世	裂隙	-	Rajabi et al., 2013
土耳其	Yahyalizamanti distirct	38°19'48"	0.4	0.0 20.0	白云岩	泥盆纪	?	-	Koptagel et al., 2007; Yigit, 2009
奥地利	Bleiberg	46°40'12"	3.0	1.1 5.9	白云岩	中一晚三叠世	碳酸盐岩溶蚀垮塌构造	-	Dzulynski and Sass-Gustkiewicz, 1977; Schroll and Rantitsch, 2005
Alps造山带南侧	Lafatsch	47°21'36"	0.1	1.0 6.0	灰岩	晚三叠世	碳酸盐岩溶蚀垮塌构造?	-	Bechtadt, 1978
保加利亚	Sedmochislenitsi	43°09'00"	0.4	1.4 1.1	灰岩	三叠纪	?	-	Mladenova and Valchev, 1998
南Carpathians造山带东侧	Upper Silesia 矿集区	50°24'00"	40.8	1.34 4.24	白云岩	中三叠世	碳酸盐岩溶蚀垮塌构造	(46 ± 20) Ma (古地磁)	Sass-Gustkiewicz et al., 1982; Gorecka, 1993; Symons et al., 1995
波兰	Wieslcon	49°18'47"	>0.1	12.0 1.5	灰岩	中三叠世	富有机质灰岩	约23 Ma (方解石U-Pb)	Pfäff et al., 2010
西Carpathians造山带北侧,	Mezica	46°18'00"	1.2	4.9 2.5	灰岩	晚三叠世	碳酸盐岩溶蚀垮塌构造	-	Spangenberg and Herlec, 2006; Herlec et al., 2010
Upper Silesia	Les Malines	43°53'24"	0.9	1.0 6.2	白云岩	中寒武世	碳酸盐岩溶蚀垮塌构造	始新世早、 中期(古地磁)	Le Guen et al., 1991; Disnar, 1996
德国	Villemagne	44°07'48"	0.1	3.3 6.3	白云岩	早侏罗世	裂隙	-	Brevart et al., 1982
Alps造山带北侧	Gorno	45°31'12"	0.9	2.3 11.5	灰岩	晚三叠世	碳酸盐岩溶蚀垮塌构造	-	Taylor et al., 2009
斯洛文尼亚									
Alps造山带南侧									
法国									
Pyrenees造山带北侧,									
Cevennes									
意大利									
Alps造山带南侧									

续表1

位置	矿床/矿集区	坐标	金属量/Mt (Pb+Zn)	平均品位/% Pb Zn	赋矿围岩	赋矿固岩 时代	主要控矿因素	成矿时代 (定年方法)	重要参考文献
西班牙	Raibl	46°26'24"	1.3	1.2 6.0	灰岩	中-晚三叠世	断裂/裂隙 碳酸盐岩溶 蚀垮塌构造?	-	Brigo and Omenetto, 1979
	Salafossa	46°20'24"	0.7	1.0 5.0	白云岩	晚三叠世		-	Taylor et al., 2009
Pyrenees造山带南翼	Picos de Europa	43°06'00"	0.1	2.0 13.0	白云岩	晚石炭世	碳酸盐岩溶 蚀垮塌构造	-	Fernandez et al., 2000
	Reocin	43°16'48"	7.7	1.4 11.0	白云岩	早白垩世	碳酸盐岩溶 蚀垮塌构造	(15±10) Ma (古地磁)	Velasco et al., 2003; Symons et al., 2009
	Troya	42°46'12"	0.5	1.0 13.1	灰岩	早白垩世	?	-	Fernandez-Martinez and Velasco et al., 1996
	Touissit-Bou Beker	34°18'00"	4.4	13.0 2.3	白云岩	中侏罗世	碳酸盐岩溶 蚀垮塌构造	-	Bouabdellah et al., 1995, 2012, 2015
摩洛哥	Ain Khala	35°25'48"	0.2	1.2 1.9	白云岩	早侏罗世	蒸发盐底辟 构造?	-	Taylor et al., 2009
	Boukdema-Kef Semmah	36°12'36"	1.0	2.1 6.5	灰岩、 泥灰岩	晚侏罗-早白 垩世	蒸发盐底辟 构造?	-	Taylor et al., 2009
Atlas造山带西段	El Abed	34°19'12"	2.2	2.3 3.5	白云岩	中侏罗世	碳酸盐岩溶 蚀垮塌构造	-	Taylor et al., 2009
	Kherzet Youcef	35°27'36"	0.4	3.6 18.4	白云岩	早白垩世	蒸发盐底辟 构造?	-	Taylor et al., 2009
突尼斯	Bou Grine	36°06'36"	0.8	2.5 12.0	灰岩、 页岩	早白垩世	蒸发盐底辟 构造	-	Montacer et al., 1988; Bechtel et al., 1996
	Bou Jaber	35°46'48"	0.3	1.0 2.2	灰岩	白垩纪	蒸发盐底辟 构造	-	Bouhleb et al., 2016
	Djebba	36°28'12"	0.4	4.0 6.0	角砾岩?	新近纪	蒸发盐底辟 构造?	-	Taylor et al., 2009
	Fedj-el Adoum	36°22'12"	0.2	2.0 6.0	灰岩、 页岩	三叠-白垩世	蒸发盐底辟 构造	-	Charef and Sheppard, 1987

注: -表示没有相关信息; ? 表示不确定, 有疑问; 表示矿床类型为密西西比河谷型(MVT)或岩浆有关碳酸盐交代型(CRD), 目前矿床类型尚未明确。茶曲柏查矿床资源量和铅锌品位数据根据 Song et al. (2015) 发表数据, 新的、未正式发表的资源量数据大于本文报道的量; 火烧云矿床的资源量和铅锌品位数据根据董重连等(2015)发表的主矿体的数据, 新的、未正式发表的资源量数据大于本文报道的量。

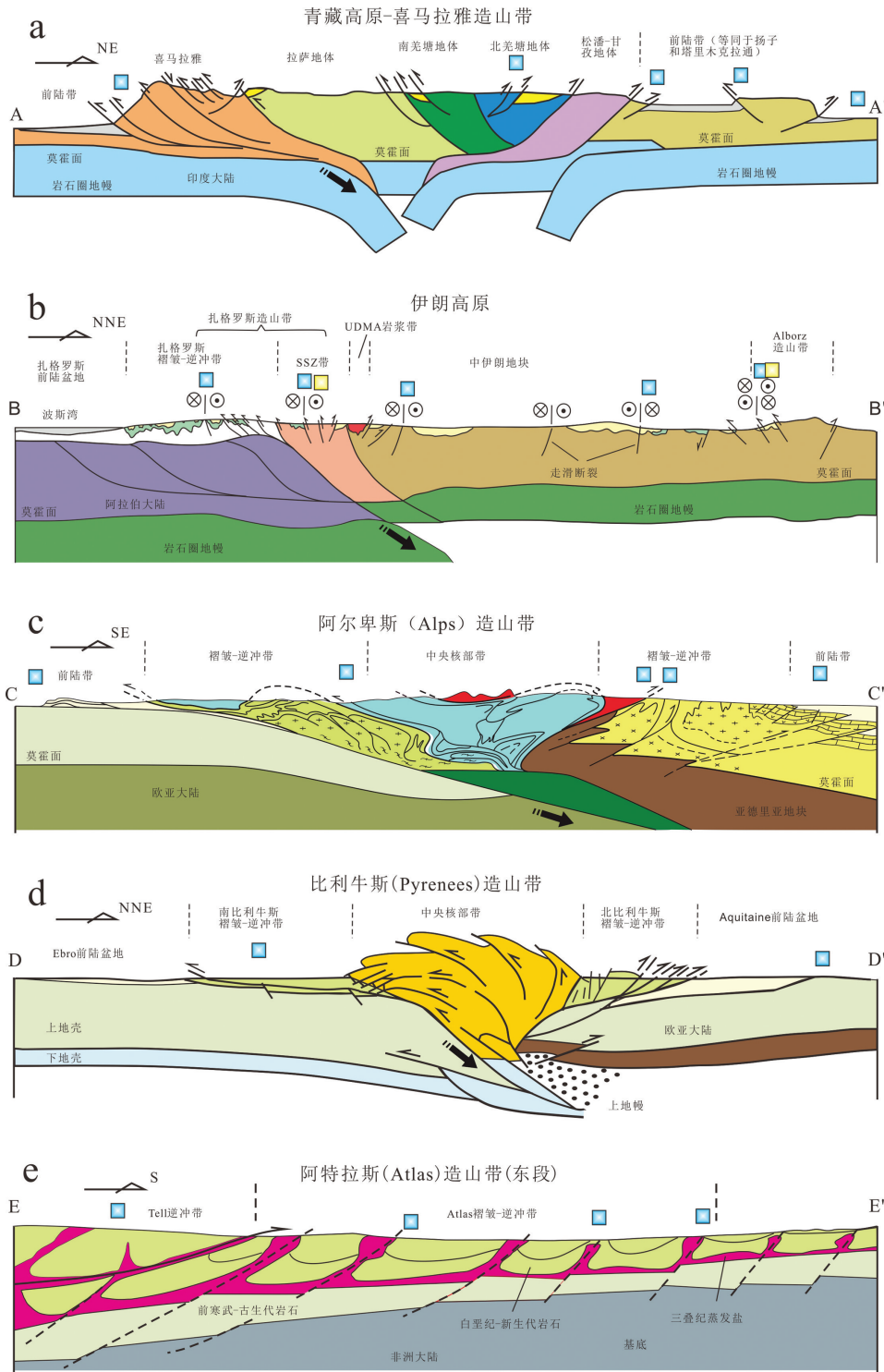


图3 特提斯域重要陆-陆碰撞造山带剖面及密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床位置(a, 据 Li et al., 2015 修改; b, 据 Mouthereau et al., 2012 修改; c, 据张洪瑞和侯增谦(2015)修改自 Dal Piaz et al., 2003; d, 据 Verges et al., 2002 修改; e, 据 Bouhleb et al., 2016. 剖面位置见图 1, 矿床图例同图 1)

Fig. 3 Simplified geological cross-sections through some important collisional orogens in the Tethyan domain and distribution of Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits (a, modified after Li et al., 2015; b, modified after Mouthereau et al., 2012; c, based on Zhang and Hou, 2015 modified after Dal Piaz et al., 2003; d, modified after Verges et al., 2002; e, modified after Bouhleb et al., 2016. See locations of the geological cross-sections legends for deposits in Fig. 1)

矿床经表生氧化作用形成的(Hitzman et al., 2003)。

在伊朗 Sanadaj-Sirjan Zone (SSZ) 的 Malayer-Esfahan 带, 铅锌矿床、矿点众多, 包括 Irankuh、Emarat、Ahangaran、Tiran 等矿床(图1, 表1), 它们多赋存于早白垩世白云岩和灰岩中, 矿体呈脉状, 受断裂或裂隙控制, 多穿切地层发育, 热液脉石矿物富集石英, 铅锌硫化物中含较多的黄铜矿。上述这些特征与典型 MVT 矿床有所不符, 因为 MVT 矿床很少有矿体直接赋存于断裂中并呈脉状穿层发育(Leach et al., 2005), 除美国 Ozark 造山带的 Tri-State 和北阿肯色州内 MVT 矿床富石英外(Plumlee et al., 1994), 世界上其他 MVT 矿床内热液石英含量都很低, 且 MVT 矿床中黄铜矿的含量也很低(Leach et al., 2005)。然而, SSZ 带内这些矿床又是碳酸盐岩容矿, 矿带内也无晚白垩世以来的岩浆侵入体发育, 除石英外, 主要为白云石化, 无其他高温热液蚀变, 所以又难以和岩浆作用联系。因此, 本文将不明确他们到底是 MVT 矿床还是与岩浆有关的碳酸盐岩交代型矿床, 将这些矿床也列入本文的探讨范围。

本文将中国扬子克拉通西缘和塔里木克拉通西缘的 MVT 铅锌矿床纳入特提斯域内的矿床进行探讨, 因为这些矿床的形成明显受到特提斯构造演化的影响。此外, 中国的乌拉根铅锌矿床赋存在砂岩和砾岩中, 金顶矿床主要赋存在砂岩中, 与典型 MVT 矿床特征不符(主要赋存在碳酸盐岩中), 但矿床的成矿流体性质和来源及成矿作用和 MVT 一致(祝新友等, 2010; Xue et al., 2007; 2014; Leach et al., 2017), 故本文也将这 2 个矿床纳入 MVT 矿床考虑。此外, 在伊朗 Alborz Mountain 造山带和中伊朗地块中, 有很多铅锌矿床被认为是 MVT 矿床, 但根据区域上广泛发育岩浆侵入体的情况, 笔者不排除这些矿床与岩浆活动有关。由于资料有限, 笔者还不能明确这些矿床的类型, 也将他们列入本文讨论的范围。

3 地质背景

Suess(1893)提出“特提斯”为“欧亚大陆上曾存在的一个大洋, 沿喜马拉雅至阿尔卑斯山脉走向延伸”, 地理上, 其范围覆盖欧洲南部和东部、非洲北部、土耳其、中东地区、巴基斯坦、阿富汗、印度、中

国青藏高原和华南、东南亚地区。特提斯域的地质演化可追溯到晚古生代, 当时在地球上存在一个潘吉亚超大陆, 其中部存在一个喇叭状向东开口的大洋, 称为特提斯洋, 洋的南侧称冈瓦纳大陆, 北侧称为劳亚大陆(Golonka, 2004; 张洪瑞和侯增谦, 2015 及其参考文献)。在志留纪或泥盆纪至二叠纪期间, 一些小的陆块从冈瓦纳大陆北缘裂离出, 向北漂移, 由此阶段裂离形成的洋称为古特提斯洋(Metcalf, 1996; Stampfli, 2000; Stampfli and Borel, 2002), 中二叠至晚侏罗期间, 一些小的陆块从冈瓦纳大陆裂离, 由此而形成的大洋称为新特提斯洋(Sengör, 1987; Metcalf, 2006; Zhu et al., 2013)。这些裂离出的陆块不断向北漂移, 最终拼贴在劳亚大陆南缘。在特提斯演化最晚阶段(晚白垩世—早新生代), 特提斯大洋消失, 印度大陆、阿拉伯大陆、非洲大陆和欧亚大陆间的一些陆块(如亚德里亚和伊比利亚陆块)与欧亚大陆发生陆-陆碰撞, 造就了目前特提斯域延绵上万千米的碰撞造山带, 自西向东有: 比利牛斯(Pyrenees)、阿特拉斯(Atlas, 北非)、阿尔卑斯(Alps)、喀尔巴阡(Carpathians)、迪纳拉(Dinarides)、土耳其高原、扎格罗斯(Zagros)、阿尔伯兹(Alborz)、帕米尔、青藏高原-喜马拉雅等。

考虑到特提斯域内的 MVT 矿床主要形成于陆-陆碰撞环境(详见后文), 笔者对域内大陆碰撞环境的盆-山演化和构造变形特征进行介绍。印度与亚洲大陆沿雅鲁藏布江缝合带碰撞的初始时间仍有争议, 提出的认识从大约 70 Ma 到 20 Ma, 但主要集中在 60~50 Ma 之间(Yin, 2010; van Hinsbergen et al., 2012; Wu et al., 2014 和其中的参考文献), 近年来的研究将初始碰撞时间限定在 (59 ± 1) Ma(DeCelles et al., 2014; Wu et al., 2014; Hu et al., 2015, 2016a, b; Li et al., 2017)。印-亚大陆碰撞带的正向带和侧向带在碰撞期的构造演化有所差异, 在正向碰撞带, 碰撞早阶段(古新世—渐新世), 包括印度大陆北缘(喜马拉雅带)和欧亚大陆一侧的中部形成了褶皱-逆冲带和前陆盆地(图 3a, DeCelles et al., 2014), 晚阶段(中新世以来), 褶皱-逆冲作用分别向南、向北, 即向青藏高原外围扩展, 在印度大陆一侧和青藏高原北部形成褶皱-逆冲带和前陆盆地, 而在高原中、南部和喜马拉雅带则形成伸展构造, 其中, 在喜马拉雅带上形成近东西走

向的大型拆离断层,在青藏高原南部和中部形成南北走向裂谷(Blisniuk et al., 2001; Williams et al., 2001; Wang et al., 2008; Mitsuishi et al., 2012; Li et al., 2015)。在侧向碰撞带,在青藏高原东部,古新世至大约16 Ma,发育走滑挤压(transpression)构造及相关的盆地,16 Ma之后发育走滑拉分构造(Wang et al., 2001; Spurlin et al., 2005; Zhou et al., 2011);在青藏高原西北缘(接近帕米尔高原),发育新生代的逆冲构造及走滑构造,大规模走滑发生在55~45 Ma和10~9 Ma(安徽省地调局, 2005; Yin, 2010);在青藏高原西缘(巴基斯坦境内的印度大陆西北缘),走滑挤压构造自古新世发育至今,并伴有前陆盆地的形成(Arlegui, 2001; Khan et al., 2002)。

在伊朗,阿拉伯板块和欧亚大陆形成了斜向的碰撞,即阿拉伯板块运移方向与阿拉伯和伊朗块体的交界线呈60°的夹角(Alavi, 2007)。碰撞的初始时间同样存在争议,多数观点认为初始碰撞发生在36~25 Ma,但很多观点也认为初始碰撞发生在晚白垩世至早古新世之间(Hou and Zhang, 2015及其参考文献),甚至可能早至早白垩世(与杨天南私人交流)。阿拉伯大陆北缘的早阶段褶皱-逆冲发生在约90~75 Ma,晚阶段的褶皱-逆冲自从约68 Ma至今,幕次发生,并伴有小规模走滑,此阶段逆冲也发育在欧亚大陆一侧的南缘(图3b, SSZ带上),逆冲总体朝南西方向,并伴有前陆盆地形成(Alavi, 2004, 2007; Sarkarinejad et al., 2008)。在20~15 Ma之后,伊朗大部分地区经历了大规模的右行走滑,走滑断裂切穿早期的逆冲构造(Agard et al., 2011; Allen et al., 2011; Mouthereau et al., 2012)。阿拉伯板块和欧亚大陆的碰撞,同时导致了远离碰撞边界的欧亚大陆内部的变形,在Alborz Mountain带,12 Ma以来经历快速的抬升,并发育了走滑挤压构造,在其南缘的中伊朗地块上形成了相关的前陆盆地(Guest et al. 2006; Ballato et al., 2008)。要指出的是,在伊朗,阿拉伯大陆和欧亚大陆一侧,盐底辟体普遍发育,主要来自新元古代—寒武纪和渐新世—中新世的蒸发盐(Talbot and Aftabi, 2004)。

Carpathians和Alps碰撞造山带由位于非洲大陆和欧亚大陆之间的一些小陆块与欧亚大陆自晚白垩世以来碰撞形成(Burchfiel, 1980)。在西Carpathians造山带,碰撞造山发生在晚白垩世至晚

中新世,其北侧向北逆冲,在欧亚大陆上形成褶皱-逆冲带和前陆盆地,同时,自古新世以来,在挤压背景下,欧亚大陆一侧的前陆带内的基底断裂被激活,形成南北走向和东西走向的陡倾张性断裂(Gorecka, 1993; Oszczytko, 2006; Coppola et al., 2009)。在Alps,普遍认为Adria(亚德里亚)地块与欧亚大陆的碰撞开始于始新世(Handy et al., 2010),碰撞伴随着Adria地块的逆时针旋转,形成逆冲和走滑构造,逆冲呈对称式结构,以中央为核,北部向北逆冲,形成渐新世以来的褶皱-逆冲带和前陆盆地,南部向南逆冲,形成中新世以来的褶皱逆冲带(图3c, Dal Piaz et al., 2003)。

Pyrenees造山带严格意义不称为碰撞造山带,因为其两侧的Iberia(伊比利亚)地块和欧亚大陆并未真正分开,其造山是两个块体在晚白垩世—中新世汇聚导致,伴随着汇聚作用,沿中部核部带向南、北两侧逆冲,形成对称式的褶皱-逆冲带及其前陆盆地(图3d, Puigdefabregas et al., 1992)。在其北侧的前陆带和南侧的褶皱-逆冲带,伴随汇聚挤压,NE和EW走向的早期断裂被活化,形成陡倾的张性断裂,在北侧早期断层活化开始于始新世晚期(Rouchy, 1997),在南侧早期断层活化发生在(28±5) Ma和约(13±3) Ma之间(Velasco et al., 2003; Symons et al., 2009)。

Atlas造山带呈北东东走向展布于北非北部,是一个多期造山事件形成的造山带。最晚的造山事件开始于晚白垩世,非洲大陆与欧亚大陆开始汇聚(Rddad and Bouhlef, 2015),强烈地挤压缩短出现在中一晚始新世和晚中新世—上新世(Frizon de Lamont et al., 2009)。挤压导致NE走向的褶皱-逆冲带的形成,并伴随盐底辟构造的发育(三叠纪时形成的蒸发盐,图3e)。同时,伴随挤压,分别在始新世中期、中新世中期、晚中新世—上新世,NW走向的早期断层发生再活化,形成张性断层及地堑构造,它们切穿了褶皱-逆冲构造(Bouhlef et al., 2016及其参考文献)。

4 矿床的空间分布

MVT矿床广泛分布于特提斯域的碰撞造山带中,从东部的青藏高原—喜马拉雅造山带一直延伸到西部的比利牛斯造山带(图1),矿床既可以出现

在陆-陆碰撞带的俯冲盘上,也可以出现仰冲盘上;从碰撞造山带的结构看,既有发育在褶皱-逆冲带中的矿床,也有发育于前陆带中矿床(图3)。

在青藏高原-喜马拉雅造山带,MVT矿床主要发育在碰撞的仰冲盘一侧,即欧亚大陆一侧,少量矿床发育在俯冲盘上的印度大陆边缘(图3a)。在欧亚大陆一侧,矿床出现在3个成矿带/矿集区,一是分布在青藏高原内部的东部和中部,即昌都-思茅和北美塘陆块上,形成了2000 km的铅锌成矿带,主要矿床包括思茅的厂碛、兰坪的金顶、昌都的拉拢拉、玉树的东莫扎抓和墨海拉亨、沱沱河地区的茶曲怕查、甜水海地区的火烧云等(图1)。受新生代印度-欧亚大陆碰撞的影响,这一地区发育了褶皱-逆冲构造,并相伴有小型的前陆盆地(或称走滑挤压有关的盆地),矿床就位于褶皱-逆冲带中(侯增谦等,2008; He et al., 2009; 宋玉财等, 2011)。二是分布在青藏高原外围的扬子克拉通西缘,这里聚集有大量MVT矿床,如大梁子、会泽、天宝山、茂租等矿床(Zhang et al., 2015),其地层在新生代前发生了变形,但对于印度-欧亚大陆碰撞带而言,他们处于碰撞带的前陆带内(但无前陆盆地发育)。三是分布在青藏高原外围的塔里木克拉通西缘,典型矿床包括乌拉根、塔木、卡兰古矿床(祝新友等, 1998, 2000; Xue et al., 2014),它们出现在塔里木边缘的褶皱-逆冲带内(图3a)。在印度大陆一侧,目前仅在巴基斯坦Lasbla-Khuzdar构造带内有少量MVT矿床发育,该带为印度-欧亚大陆碰撞形成的褶皱-逆冲带,典型矿床是Surmai矿床(图3a)。

在伊朗高原,MVT矿床主要发育在碰撞的仰冲盘的欧亚大陆一侧,少量矿床发育在俯冲盘上的阿拉伯大陆边缘(图3b)。在欧亚大陆一侧,矿床出现在不同的构造单元内,Angouran及Irakuh等矿床出现在SSZ带内,Mehdiabad矿床出现在中伊朗地块中,Duna等矿床出现在Alborz造山带内,其中SSZ和Alborz造山带内的矿床发育于大陆碰撞有关的褶皱-逆冲带中,而中伊朗地块内的矿床发育在前陆带内。在阿拉伯大陆一侧,目前仅发现有Kuh-e-Surmeh矿床,处于扎格罗斯褶皱-逆冲带内。

在Alps-Carpathians造山带,MVT矿床出现在碰撞带的俯冲盘欧亚大陆一侧和仰冲盘的Adria地块一侧。在欧亚大陆一侧,Silesia矿集区发育于

Carpathians造山带北部的前陆带中,Wiesloch矿床位于Alps造山带北侧的前陆带内,Lafatsch矿床发育在Alps造山带北侧的逆冲带内(Eastern Austroalpine逆冲单元);在Adria地块一侧,Gonor、Bleiberg、Sslafossa、Raibl、Mezica等矿床发育于碰撞带的褶皱-逆冲带中(图3c)。

在Pyrenees造山带,MVT矿床出现在造山带两侧的俯冲盘(Iberia地块)和仰冲盘(欧亚大陆)上(图3d)。在北侧的欧亚大陆上,包括Les Malines和Villemagne矿床在内Cevennes矿集区就位于碰撞带的前陆带中,而南侧Iberia地块上的Reocin、Picos de Europa、Troya等矿床出现在碰撞带的褶皱-逆冲带内(图3d)。

在北非,非洲大陆与欧亚大陆的汇聚形成了由北东东走向、从北向南逆冲的逆冲带,在该带的东部(阿尔及利亚和突尼斯境内),逆冲伴随着广泛的盐底辟构造的发育(图3e)。在逆冲带内,发育有诸如Touissit-Bou Beker、El Abed、Ain Khala、Fedj-el Adoum等大量MVT矿床(图1)。

5 成矿构造环境

由于MVT矿床与岩浆活动无关且成矿温度低,因此适合用于直接定年的矿物少。很多学者采用闪锌矿中流体包裹体Rb-Sr和方解石Sm-Nd方法开展矿床定年。然而,由于相关元素含量在有关矿物或流体包裹体中含量低,并且成矿时会出现来自不同源区(流体和围岩等)的同位素体系的混合,从而导致不同成矿部位、不同成矿时间形成矿物的初始同位素组成不均一,因此,理论上,上述方法很难成功(Leach et al., 2001),尽管很多研究获得了等时线年龄,但并未有很好地讨论上述问题,故获得的年龄能否代表成矿年龄有很当大疑问。这里,我们主要采用古地磁方法获得的和通过地质条件限定的成矿年龄数据用于探讨矿床的形成背景。由于MVT成矿流体活动时形成磁性矿物从而重置地层的磁性特征,因此依据古地磁法可获得比较可靠的MVT矿床成矿年龄(Leach et al., 2001; Leach and Bradley, 2003; Bradley et al., 2004)。

目前已有确定成矿时代的矿床表明,特提斯域的MVT矿床主要形成于陆-陆碰撞/汇聚环境,在矿区尺度,成矿通常形成于区域挤压逆冲后的走滑或

伸展阶段,或区域挤压晚期的张性构造发育阶段。

在青藏高原东部,古地磁定年表明,金顶超大型铅锌矿床形成在 (23 ± 3) Ma,与围岩磷灰石裂变径迹获得的28~25 Ma的成矿热液冷却年龄基本一致(李小明等,2000),表明矿床形成在印度-欧亚大陆碰撞的晚碰撞阶段(Hou and Cook, 2009),此时,青藏高原东缘发育大规模的走滑构造,区域处于挤压走滑应力状态(Spurlin et al., 2005; Zhou et al., 2011);在青藏高原中部的北美塘陆块上,茶曲怕查超大型铅锌矿床主体赋存在晚二叠世灰岩中,但不整合于灰岩上的中新世早期地层发生了局部矿化,一同时些中新世早期形成的溶洞垮塌角砾岩也发生了矿化,矿化呈后生交代特征,因此成矿晚于该中新世地层的沉积,即晚于23~16 Ma,表明矿床形成于印度-欧亚大陆碰撞的后碰撞阶段(Hou and Cook, 2009; Song et al., 2015; 宋玉财等, 2015),此时,区域处于挤压逆冲后的伸展环境(南北向裂谷形成时, Li et al., 2015)。

在邻近青藏高原东部的扬子克拉通西缘,由闪锌矿 Rb-Sr 和方解石 Sm-Nd 给出的年龄集中在230~190 Ma(Zhang et al., 2015 及其参考文献),如果此年龄代表成矿年龄,表明成矿与印支地块与扬子克拉通在三叠纪的汇聚有关(Cai and Zhang, 2009)。然而,对会泽和富乐厂开展的黄铁矿 Re-Os 和闪锌矿、方铅矿的 Re-Os 定年,则分别给出 (20.4 ± 3.2) Ma(Liu et al., 2015)和 (32 ± 6) Ma(刘莹莹等, 2013)的年龄,反映矿床形成在印度-欧亚大陆碰撞环境。前文已讨论了 Rb-Sr 和 Sm-Nd 定年方法的局限性,因此笔者更倾向于后者年龄更能反映成矿构造环境,但更多的研究需要开展,来进一步明确这一问题。

在邻近青藏高原西北部的塔里木克拉通西缘,乌拉根矿床赋矿围岩主要为早白垩世的砂岩、砾岩,但其上部有少量矿化出现在古新世碳酸盐岩角砾岩中,直接顶板为古新世石膏岩(祝新友等, 2010),因此成矿应至少晚于古新世的石膏岩,表明矿床形成在新生代,这意味着成矿发生在印度-欧亚大陆碰撞环境。

在伊朗的SSZ带内,Angouran超大型铅锌矿床赋存在大理岩和片岩为围岩的角砾岩筒内,其中,矿化和未矿化片岩的变质年龄均为约20 Ma,由于

铅锌硫化物胶结大理岩和片岩角砾,硫化物未发生变质,因此成矿晚于片岩的形成,即晚于20 Ma左右(Daliran et al., 2013),表明成矿形成在阿拉伯大陆与欧亚大陆碰撞环境,在矿床所在区带,成矿发生在区域逆冲后的大规模走滑阶段(Mouthereau et al., 2012)。

在欧洲的Alps-Carpathians造山带,其北侧前陆带内发育世界上最大MVT矿集区—Upper Silesia矿集区和Wiesloch等一些较小的矿床, Symons et al. (1995)用古地磁方法获得Upper Silesia矿集区成矿发生在 (46 ± 20) Ma,而方解石U-Pb定年推断Wiesloch矿床形成在约23 Ma(Pfaff et al., 2010),表明这些矿集区和矿床形成于Adria地块与欧亚大陆碰撞环境。在陆-陆碰撞的晚阶段,处于前陆带的Upper Silesia矿集区和Wiesloch矿床所在地区发育一系列张性构造(早期断层被活化或碰撞的远程效应所致),矿床受这些张性构造控制(Kibitlewski, 1993; Gorecka, 1993; Pfaff et al., 2010)。

在Pyrenees造山带南侧的Reocin超大型铅锌矿床,古地磁定年反映矿床形成于 (28 ± 5) Ma和约 (13 ± 3) Ma之间,在该区,这2个年龄分别代表该区在Iberia地块与欧亚大陆汇聚环境下的两次主要挤压事件(Symons et al., 2009 及其中的参考文献),因此,成矿年龄一方面反映矿床形成在陆-陆汇聚环境,另一方面也表明成矿发生在区域早期挤压之后的张性构造发育阶段(Velasco et al., 2003; Symons et al., 2009)。在Pyrenees造山带北侧的Cevennes矿集区,古地磁定年显示成矿发生在始新世早、中期,表明成矿于Iberia地块与欧亚大陆汇聚背景,同时,该成矿时代反映成矿发生在区域第一次挤压事件晚期的区域张性构造发育阶段(Rouchy, 1997)。

在北非Atlas造山带内,大量MVT矿床尚未有直接定年获得的成矿年龄,但研究普遍认为矿床受非洲大陆与欧亚大陆汇聚造山背景下早期断裂再活化形成的张性构造控制,成矿发生在约15 Ma以来(Bouabdellah et al., 2012; Bouhleb et al., 2016)。

6 主要控矿因素

控矿因素指控制原生硫化物矿体产出的地质因素。沟通含金属流体上升至成矿位置的断裂是重要的控矿因素,在下一节我们会探讨这一问题,

本节不做讨论。在特提斯域内,MVT矿床的控矿因素有多种,主要包括:蒸发盐底辟构造、碳酸盐岩溶蚀垮塌构造、蒸发盐溶蚀垮塌构造、高孔隙度白云岩、含重晶石地层等。

6.1 蒸发盐底辟构造

蒸发盐由于密度小且在一定压力下具有塑性,故沉积埋藏后,在有合适构造条件下会发生向上的底辟(Warren, 2016)。在过去对MVT矿床研究过程中,盐底辟构造控矿往往不被重视或没有很好地被识别,后者主要由于蒸发盐非常容易溶解消失或转变为其他矿物(方解石、石英/燧石、重晶石等)。在特提斯域内,笔者认为中国金顶、大梁子、天宝山、伊朗 Angouran 和 Kuh-e-Surmeh、北非突尼斯和阿尔及利亚境内(Atlas造山带东段)的许多MVT矿床是受盐底辟构造控制。矿体可以出现在底辟构造内部,其产状与底辟体形态一致,一般穿切围岩地层;矿体也可出现在邻近底辟体地层中,通常顺层发育。

在中国青藏高原东部的金顶矿床,在古新世云龙组沉积期,晚三叠世三合洞组灰岩地层中的蒸发盐在区域挤压背景下,沿逆断层发生了侧向底辟作用,底辟伴随灰岩角砾化,形成了夹有大量石膏的灰岩角砾岩。底辟同时诱发了膏砂底辟作用,形成了一套特殊的砂岩,并在沉积盆地中形成了含灰岩角砾的砂岩沉积,这些岩石及其逆冲在其上部的中生代地层构成了一个穹窿体,矿体赋存在穹窿体内的这些盐底辟构造有关的岩石中,铅锌硫化物交代(含灰岩角砾)砂岩中的方解石胶结物或交代灰岩角砾间的杂基(Leach et al., 2017)。

中国扬子克拉通西缘的大梁子和天宝山矿床赋矿围岩为新元古代震旦纪的白云岩,在该区,这套地层是一套含蒸发盐的地层(郑绵平等, 2006; 王立成等, 2013),非层状矿体就位于呈近直立的筒状角砾体中,角砾体切穿不同地层单元,向下延伸可数百米,宽几米到几十米,长数百米(王则江和汪岸儒, 1985)。我们观察发现,角砾呈棱角状,大小混杂,在手标本尺度可以见来自不同岩性单元的岩石混杂在一起。仅考虑角砾体的规模和形态,无法用溶蚀垮塌、断裂、水压致裂等作用解释,由于无岩浆热液有关蚀变,也无法用岩浆热液爆破作用解释,因此用盐底辟解释更为合理。但要注意的是,目前

角砾筒内的蒸发盐已几乎完全溶蚀消失,这也导致在大梁子矿床,上覆寒武纪地层强烈地向下垮塌,进入角砾岩体中,这种现象在盐底辟角砾岩筒中非常常见(Warren, 2006)。总之,我们认为在大梁子和天宝山矿床,控矿的筒状角砾体由盐底辟作用所致,但经历了后期的蒸发盐溶蚀垮塌。

伊朗 SSZ 带内的 Angouran 超大型铅锌矿床赋矿围岩为新元古代—寒武纪的大理岩、片岩,矿体出现筒状的角砾体内,角砾体向下延伸 200~300 m,宽几十米,长达百余米(Gilg et al., 2006; Boni et al., 2007)。同样,角砾呈棱角状、大小混杂,特别有意义的是,有来自下部的片岩和更深部的火山岩角砾卷入到上部大理岩为围岩的角砾体中,与大理岩角砾混杂在一起,这种特征只能用盐底辟或岩浆热液爆破作用解释,否则无法理解下部岩石如何向上迁移。同样,由于矿区缺乏岩浆岩侵入体和相关热液蚀变,可以排除岩浆热液爆破形成角砾岩的可能,故用盐底辟作用解释更为合理。另外,角砾岩出现大量硫酸盐假晶(硬石膏或重晶石),我们还发现闪锌矿中有硬石膏包裹体,这些都与盐底辟成因的角砾岩相符。因此,我们认为 Angouran 矿床赋存在盐底辟成因的角砾岩体中。

在北非 Atlas 造山带的东段(阿尔及利亚和突尼斯境内),大量研究已经认识到该区很多 MVT 矿床受盐底辟构造控制,如 Fedj el Adoum、Bou Grine、Bou Jaber 等矿床(Rouvier et al., 1985; Bouhlef et al., 2016; Omar et al., 2016)。然而不同于上述谈到的盐底辟构造控制的矿床,这些矿床矿体没有出现在盐底辟形成的岩石内部,而是出现在邻近盐底辟体的地层中,尤其是与盐底辟接触的不整合面和富有机质的碳酸盐岩地层(Bouhlef et al., 2016),表明底辟体控制了成矿流体的活动范围,但不是金属的沉淀部位。

6.2 碳酸盐岩溶蚀垮塌构造

地表水或热液流体在构造/裂隙发育的碳酸盐岩内活动,可以溶蚀碳酸盐岩,形成溶蚀垮塌角砾岩;地表水溶蚀或热液流体溶蚀作用可以单独出现,在一个矿床内也可以同时出现,导致叠加溶蚀。该溶蚀作用通常导致溶洞系统的发育,溶洞总体受控在一套地层内,但切地层内不同岩性单元发育,溶洞内往往形成内沉积(internal sediments)。溶

蚀作用形成溶蚀垮塌角砾岩,角砾可以呈棱角状、次棱角状、磨圆状出现。矿体受溶蚀垮塌构造控制,可以赋存在角砾岩中,也可以交代内沉积,矿体具层控特点(stratabound,不一定顺层出现)。控矿的碳酸盐岩溶蚀垮塌构造主要形成在成矿前,溶蚀垮塌作用在成矿期和成矿后也可发生。在特提斯域,大量的MVT矿床受碳酸盐岩溶蚀垮塌构造控制,包括:中国青藏高原的茶曲怕查、墨海拉亨和厂硐矿床,欧洲造山带内大部分矿床、矿集区,北非Atlas造山带西段的Touissit-Bou Beker和El Abed矿床等。

在中国青藏高原中部的茶曲怕查矿床,矿体主体赋存在晚二叠世九十道班组灰岩中,灰岩发生褶皱变形,中新世五道梁组泥岩、泥灰岩不整合于灰岩之上。矿床发育大量碳酸盐岩溶蚀垮塌角砾岩,越靠近九十道班灰岩与上覆二叠系碎屑岩的接触部位越发育(宋玉财等, 2013; Song et al., 2015)。角砾为九十道班组灰岩,次棱角状,大小不一,无定向性,并见很多燧石角砾。角砾间杂基主要有两种,一是中新世五道梁组泥岩、泥灰岩,具有沉积层理;二是灰岩细颗粒。他们均形成在矿前,前一种应为五道梁组沉积期地表水溶蚀垮塌所致,后一种可能为地表水溶蚀,也可能为热液溶蚀垮塌形成(Song et al., 2015)。铅锌硫化物主要交代后一种角砾岩成矿,由于地层变形,矿体呈不规则状出现在灰岩中。

在特提斯域内的其他受碳酸盐岩溶蚀垮塌构造控制的MVT矿床中,交代内沉积式的矿化普遍出现,如在厂硐、Reocin、Upper Silesia矿集区、Bleiberg、Touissit-Bou Beker矿床,在这些矿床中,既有赋存在内沉积中的矿化,也有赋存在角砾岩中的矿化(Sass-Gutkiewicz et al., 1982; Dzylinski and Sass-Gustkiewicz, 1977; Velasco et al., 2003; Bouabdellah et al., 1995, 2012)。

6.3 蒸发盐溶蚀垮塌构造

石盐和石膏等蒸发盐相比较碳酸盐等其他岩石溶解度大,因此容易被流体溶解,从而形成溶蚀垮塌角砾岩(Warren, 2016)。同样,由于蒸发盐往往被完全溶解消失或转变为其他矿物(方解石、石英/燧石、重晶石等),这类角砾岩往往被误识别为碳酸盐岩溶蚀垮塌角砾岩。在特提斯域内,伊朗Kuh-e-Surmeh矿床和Ozbak-Kuh矿床、我国茂租等矿床和火烧云矿床可能受此类构造控制,矿体一般赋存在

角砾岩中,但有矿化出现在未或弱垮塌的、呈“斑马”构造的白云岩中,顺层发育。

伊朗扎格罗斯褶皱-逆冲带内的Kuh-e-Surmeh矿床赋存在二叠纪Dalan组灰岩中,该组是一套含石膏的地层。已有研究报道指出铅锌硫化物赋存在角砾岩中,同时伴有大量石膏出现(Liaghat et al., 2000),由于MVT硫化物成矿作用和硫化物表生氧化很难形成大量石膏(Reichert and Borg, 2008; Leach et al., 2005),因此矿床丰富的石膏更有可能来自地层中石膏,故含矿部位的角砾岩更可能由蒸发盐溶蚀垮塌所致。

中伊朗地块上的Ozbak-Kuh矿床赋矿围岩为中泥盆世Sibzar组具斑马构造的白云岩中。碳酸盐岩中斑马构造通常由条带状的浅色方解石/白云石和暗色碳酸盐岩互层构成,尽管对斑马构造有不同成因解释(Vandeginste et al., 2005),但在含蒸发盐的碳酸盐岩中,斑马构造非常常见,其蒸发盐往往后来被方解石/白云石替代(Beales and Hardy, 1980; Bouhlel et al., 2007, 2009)。由于整合在Sibzar组下部的Padeha组就是一个含石膏的地层,结合斑马构造的出现,显示Sibzar组很有可能也是一个含蒸发盐的地层。矿体顺层出现在Sibzar组底部(一个逆冲断层上部10余米处)的白云质角砾岩中,笔者推测这套角砾岩为蒸发盐溶蚀垮塌角砾岩。

在中国扬子克拉通西缘有很多矿床赋存在新元代灯影组上部的白云岩中(有些认为是早寒武世地层),包括茂租、赤普、大渡河谷、金沙厂、麻栗坪、跑马等矿床。前文已述,在该区灯影组为一套含蒸发盐地层(郑绵平等, 2006; 王立成等, 2013),并且在矿区的灯影组中常见斑马构造、鸟眼构造、石膏结核假晶构造等指示蒸发盐沉积环境和蒸发盐曾经存在的结构构造。矿体赋存在顺层发育的白云质角砾岩中,角砾棱角状、大小不一,有时长轴与地层产状一致,有时混杂堆积,但均来自邻近的围岩地层,无内沉积发育。考虑到灯影组为一套含蒸发盐地层,及角砾岩总体顺层发育、角砾普遍无任何溶蚀磨圆、角砾体内不发育内沉积等特征,笔者认为这套角砾岩为蒸发盐溶蚀垮塌角砾岩,但目前蒸发盐已几乎完全溶蚀消失。

前文讨论已述,青藏高原西北缘的火烧云矿床的含矿中侏罗世龙山组是一套含蒸发盐岩的建造,

不仅距离矿体上部100~200 m的地层中出现厚达30~40 m的石膏层,而且靠近矿体处可以发现薄的沉积石膏层。由于强烈地表生氧化作用,大多原生硫化物结构难以识别,但局部的残留下来的原生构造显示,硫化物赋存在角砾岩中。从角砾岩长轴排列特点看,具有顺地层出现并垮塌的特征,我们推测角砾岩可能由蒸发盐溶蚀垮塌所致。

6.4 高孔隙度白云岩

高孔隙度的白云岩可能在成岩阶段形成,也可以在成岩后热液作用下形成。在特提斯域,高孔隙度白云岩赋含MVT矿床,主要出现在中国扬子克拉通西缘,部分矿床出现在中国青藏高原东部、伊朗中伊朗地块上,矿体顺层产出。

在扬子克拉通西缘,以会泽代表的许多MVT矿床赋存在高孔隙度的白云岩中(表1),白云岩时代从寒武纪到二叠纪,但没有前寒武纪的围岩。这些白云岩往往粗晶,未矿化的白云岩可见白云石晶粒间的孔洞,赋矿白云岩上下围岩往往是孔隙度低的灰岩或细晶白云岩。铅锌硫化物充填并交代白云岩,有时形成非常强的块状矿化,有时部分交代白云岩。赋矿白云岩可以有角砾岩出现,但通常角砾岩较少发育。相似的赋矿白云岩也出现在中伊朗地块中的Darreh-Zanjir矿床内。

在青藏高原东部玉树地区的东莫扎抓矿床,主矿体赋存在晚三叠世波里拉组底部的白云岩化灰岩中,白云石颗粒不粗,但由于白云岩化,导致岩石孔隙度增大,细粒铅锌硫化物及黄铁矿就出现在白云石间的孔隙中,形成了浸染状的矿石(Liu et al., 2011)。

6.5 含重晶石地层

伊朗的Mehdiabad是目前世界上最大的MVT铅锌矿床,其控矿特征具有重要的代表性。在Mehdiabad矿床,Black Hill是一条倾向NEE的陡倾同沉积正断层,其下盘为早白垩世Sangestan组以碎屑岩为主的地层,上盘包括Taft组白云岩及其上部的Abkuh组灰岩(Reichert, 2007)。笔者的观察表明,Taft组仅在Black Hill断层上盘的矿区范围为白云岩,断层下盘和向矿区外围,Taft组过渡为灰岩,表明Black Hill控制了Taft组白云岩化的范围,同时,在Taft组白云岩中形成了大量同沉积角砾岩。Mehdiabad矿床至少发育三期重晶石,第一期重晶

石与石英共生,粒度相对细,呈丘状出现在Abkuh组灰岩中;第二期重晶石与菱铁矿共生,粒度相对粗,呈脉状或条带状出现,切穿第一期重晶石,并呈脉状出现下伏的Taft组白云岩中;第三期重晶石与石英共生,粒度相对细,主要出现在Taft组白云岩中。Mehdiabad矿床的硫化物矿化出现在Taft组白云岩中,形成了层控的矿体。矿化主要为闪锌矿、方铅矿和少量黄铜矿交代第二期和第三期重晶石,少量充填于第三期重晶石晶粒间,硫化物的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCD}}$ 值低于-10‰(未发表数据),表明重晶石通过硫酸盐细菌还原作用(BSR)提供了还原硫。因此,在Mehdiabad矿床,早期先存的重晶石对后来铅锌成矿起到了十分关键的作用,故笔者将其视为该矿床重要的控矿因素。但要强调的是,形成Mehdiabad矿床,同沉积断层、同沉积角砾岩、白云岩化均起到了重要作用。

在特提斯域,除上述主要的控矿要素外,断裂或构造裂隙还控制一些MVT矿床的产出,但这些矿床的规模有限,如伊朗的Nakhlak矿床、欧洲的Raibl和Villemagne矿床;而其他一些受断裂或构造裂隙控制的矿床是否为MVT矿床仍不明确(如伊朗的Irakuh等,见前文讨论)。对这些矿床,本文不再探讨。

7 断裂控矿及油气与成矿的关系

7.1 断裂控矿

几乎所有MVT矿床都需要通过断裂沟通深部含金属流体上升至矿质沉淀部位,这些断裂往往不直接含矿,起到疏导流体的作用(Leach et al., 2005),可称为导矿断裂。

在特提斯域,很多矿区都存在逆断层,特别处于褶皱-逆冲带内的矿床。笔者认为,在区域尺度,褶皱-逆冲对形成MVT矿床起到重要作用,包括:逆冲作用导致岩片堆叠,更易诱发蒸发盐底辟构造,底辟也容易沿逆断层发育;褶皱和逆冲使得深部的碳酸盐岩抬升至浅表及并导致其变形破碎,从而更易形成碳酸盐岩溶蚀垮塌构造。前文已述,这两种构造是控制特提斯域MVT矿床形成的重要因素。

然而,笔者的观察显示,在矿床尺度,逆断层并没有起到导矿断裂的作用,导矿断裂多为陡倾的张性断裂。(1)理论上,流体在压性断层流动不充分,

相反,在张性断层中流体可以充分流动(Cox et al., 2001);(2)如上文所述,从成矿时间上看,成矿多发生在区域挤压之后或挤压晚期的走滑或伸展阶段;(3)在很多矿床,与矿体直接连接的是陡倾的张性断层,而非逆断层。如,在中国会泽,矿体与北西走向、陡倾的张性断层相连接,而与北东走向的逆断层不相连(Han et al., 2007)。在厂坝,笔者发现,一些北西走向的陡倾断裂形成脉状矿化,表明此方向断裂活动时发生矿化作用。同时,见该性质断层与缓倾的层状矿体相连,具体表现为:顺断层发育十几厘米厚的强硫化物矿化,再向侧方,为铅锌硫化物交代缓倾的内沉积,而在断层另一侧,由于岩性为垮塌角砾岩,仅出现一些弱的脉状矿化。相反,在矿区内发育的、近南北走向的逆冲断层不与矿体相连。在欧洲的Upper Silesia矿集区、Wiesloch矿床、Reocin矿床、北非的Touissit-Bou Beker矿床、北非东部受盐底辟构造控制的许多矿床,其导矿断裂都与张性断裂有关,这些张性断裂通常由早期断裂在碰撞造山期间活化所致(Gorecka, 1993; Kibitlewski, 1993; Bouabdellah et al., 1995, 2012; Velasco et al., 2003; Symons et al., 2009; Bouhlef et al., 2016),这些矿床的矿体不受矿区内的逆断层控制。

7.2 油气与成矿的关系

在特提斯域内,多个MVT矿集区与重要的含油气盆地相伴,如我国扬子克拉通西缘、伊朗扎格罗斯褶皱-逆冲带、北非的褶皱-逆冲带等(万志峰, 2008; 丘东洲等, 2009)。同时,在许多矿床中,出现有油气流体活动记录(沥青或和油气包裹体),如金顶矿床、赤普矿床、Reocin矿床、Wiesloch矿床、Upper Silesia矿集区、Touissit-Bou Beker矿床、Bou Jaber矿床、Bou Grine矿床、Fedj-el-Adoum矿床(Leach et al., 1996; Clayton and Baird, 1997; Bechtel et al., 1998; Velasco et al., 2003; Makhoukhi et al., 2003; Wu, 2013; Bouhlef et al., 2016; Chi et al., 2017)。

关于油气与MVT铅锌成矿的关系,提出可能存在的关系主要包括(李发源等, 2002; Anderson, 2008; 顾雪祥等, 2010):(1)油气流体直接迁移金属;(2)油气流体直接提供还原硫;(3)油气流体作为还原剂,还原硫酸盐提供还原硫,有两种方式,一

种是油气流体与地层中硫酸盐反应提供,另一种是直接还原含金属流体中的硫酸盐。理论研究表明(Emsbo, 2000; Leach et al., 2005),在MVT矿床成矿流体温度条件下($<250^{\circ}\text{C}$),只有氧化的流体能够迁移大量铅锌,而还原的流体,如果不是在强酸性条件下,其迁移铅锌的能力很低,故还原流体很难迁移足够量铅锌在碳酸盐岩中形成具有较大规模的矿床,所以油气流体直接迁移铅锌的可能性不大。油气流体理论上可以直接为MVT铅锌成矿提供还原硫,然而在大多MVT矿床中,油气流体活动记录(沥青和烃类包裹体)的量相比较硫化物的量低很多,表明油气流体直接提供硫的量不足以沉淀出矿床所含的金属硫化物,故油气流体直接提供还原硫对铅锌成矿的贡献有限。因此,对于MVT矿床,油气流体通常是作为还原剂,以还原硫酸盐(可以发生在矿床外围)、提供还原硫的方式参与铅锌成矿(顾雪祥等, 2010; Leach et al., 2017),油气流体活动的开始时间通常早于成矿,并可能一直持续到成矿期和成矿后。笔者对金顶矿床的研究也注意到,油气流体间接提供了还原硫,同时与赋矿围岩发生了相互作用,“改造”围岩,对后来的铅锌成矿起到重要作用。

在金顶矿床,普遍发育沥青和油气包裹体,地球化学示踪表明,油气流体来自兰坪盆地晚三叠海相地层(薛春纪等, 2009; Chi et al., 2017)。沥青的Re-Os定年显示,油气流体开始迁移聚集的时间为(68 ± 5) Ma (Selby and Creaser, 2005; 高炳宇等, 2012),明显较(23 ± 3) Ma的成矿年龄早(Yalikun et al., 2017)。油气流体与金顶盐底辟穹窿体内的膏盐通过细菌硫酸盐还原(BSR)作用,形成了 H_2S ,为后期铅锌成矿提供了必要的还原硫(Chi et al., 2017; Leach et al., 2017)。同时,我们观察发现,油气流体与矿床内紫红色(含灰岩角砾)砂岩发生反应,使其发生褪色蚀变,将围岩中的 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} ,同时也形成了方解石胶结物。这些方解石为后来的铅锌硫化物成矿提供了可交代的物质,而 Fe^{2+} 与金顶穹窿中的 H_2S 结合形成黄铁矿/白铁矿。Re-Os定年表明,一组黄铁矿的等时线年龄为(65 ± 10) Ma (唐永永等, 2013),与沥青的Re-Os年龄一致,进一步证实了油气流体开始迁移聚集的时间早于铅锌成矿,也反映矿床内的多数黄铁矿/白铁矿形成于成

矿前。总之,在金顶矿床,油气流体先于铅锌成矿聚集在成矿部位,并与围岩发生相互作用,形成了H₂S及导致(含灰岩角砾)砂岩的胶结物方解石化,为后期铅锌成矿提供了重要条件。

8 结 论

特提斯域是全球最重要的MVT铅锌富集区,矿床广泛地分布在陆-陆碰撞/汇聚造山带两侧的褶皱-逆冲带和前陆带内,成矿通常发生在碰撞挤压作用晚期或之后、区域处于走滑或伸展的阶段。矿床、矿体的就位与张性断层密切相关,主要受蒸发盐底辟构造、碳酸盐岩溶蚀垮塌构造、蒸发盐溶蚀垮塌构造、高孔隙度白云岩、含重晶石地层等因素控制。油气流体在许多矿床和矿集区出现,主要通过硫酸盐发生反应为铅锌成矿提供还原硫。

特提斯域为何富集MVT铅锌矿床,笔者认为主要有以下三方面因素。(1)合适的大地构造环境。MVT矿床被认为主要形成于汇聚环境,包括弧-陆碰撞造山环境、洋-陆俯冲(安第斯山式)造山环境、陆-陆碰撞/汇聚造山环境(Bradley and Leach, 2003)。相比较弧-陆碰撞和洋-陆俯冲造山带,陆-陆碰撞/汇聚造山带两侧地块上都可以发育MVT矿床,陆-陆碰撞的影响范围可以远至距碰撞边界上千千米的地区,因此,陆-陆碰撞/汇聚环境有更广阔的成矿空间。陆-陆碰撞/汇聚过程复杂,包括汇聚方向的改变和碰撞远程效应等,使得区域应力不仅是简单地挤压,还包括走滑和伸展,从而在局部地区形成张性构造,张性构造能够有效地诱导深部含铅锌的盆地卤水向上迁移成矿。(2)地层中富集蒸发盐。从特提斯演化历史看,域内地块原来位于冈瓦纳大陆北部,然后从冈瓦纳大陆裂解出来,向北迁移,最后与欧亚大陆汇聚,因此这些地块长期处于有利形成蒸发盐的古纬度,事实上确实形成了丰富的蒸发盐矿产(高广立, 1989; Banerjee and Mazumdar, 1999; 刘成林等, 2015)。首先,大量蒸发盐的发育表明,特提斯演化地质历史时期,通过蒸发作用产成了大量盆地卤水,下渗的高盐度卤水能够有效萃取地层中的铅锌,从而形成富铅锌的成矿流体,这些流体储层在地壳中,后来在合适的构造条件下向上迁移成矿。因此,大量蒸发盐的发育意味着有更多机会形成富铅锌的成矿流体。其次,蒸

发盐底辟和溶蚀垮塌构造是特提斯域内重要的控制MVT矿床形成的因素,因此,蒸发盐的发育有利于这些控矿因素的形成。最后,金属硫化物的形成需要硫,蒸发盐中的石膏和硬石膏等硫酸盐能够为成矿提供丰富的硫。(3)油气流体丰富。特提斯域是全球油气资源最为富集的地区(叶和飞等, 1999),前文已述,油气流体能够与硫酸盐反应为金属硫化物沉淀成矿提供还原硫,同时,油气流体还可以与围岩相互作用,改造围岩使围岩处于还原环境,从而有利于金属沉淀。因此,丰富的油气流体有利于产生大量还原硫,并“改善”围岩环境,促进铅锌硫化物沉淀。

在特提斯域寻找MVT矿床的前景十分广阔,在陆-陆碰撞/汇聚造山带的褶皱-逆冲带和前陆带,尤其在含大量蒸发盐和有油气活动记录显示、并经历碰撞以来走滑或伸展构造的区域,找矿潜力巨大。定位MVT矿床、矿体,除重视MVT矿床常见的碳酸盐岩溶蚀垮塌构造和高孔隙度白云岩等控矿因素外,还要关注蒸发盐底辟构造、蒸发盐溶蚀垮塌构造、地层中的重晶石层位,并注意寻找陡倾的张性断层,这些是都实现矿床和矿体定位的关键。

References

- Agard P, Omrani J, Jolivet L, Whitechurch H, Vrielynck B, Spakman W, Monié P, Meyer B, Wortel R. 2011. Zagros orogeny: A subduction-dominated process[J]. *Geological Magazine*, 148 (5/6): 692-725.
- Ahsan S, Qureshi I. 1997. Mineral/rock resources of Lasbela and Khuzdar Districts, Balochistan, Pakistan[J]. *Geol. Bull. Univ. Peshawar*, 30: 41-51.
- Alavi M. 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution[J]. *American Journal of Science*, 304 (1): 1-20.
- Alavi M. 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran[J]. *American Journal of Science*, 307(9): 1064-1095.
- Allen M B, Kheirkhah M, Emami M H, Jones S J. 2011. Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia-Eurasia collision zone[J]. *Geophys. J. Int.*, 184(2): 555-574.
- Anhui Geological Survey. 2005. Report of 1:250,000 Wenquan and Songxi Geological Maps[R]. Unpublished, Hefei (in Chinese).
- Arlegui L. 2001. Paleostress reconstruction from Striated Fault Data Sets in the Kirthar Fold Belt, Southern Pakistan[J]. *Int. Geol. Rev.*, 43(6): 539-547.
- Ballato P, Nowaczyk N R, Landgraf A, Strecker M R, Friedrich A, Tabatabaei S H. 2008. Tectonic control on sedimentary facies

- pattern and sediment accumulation rates in the Miocene foreland basin of the southern Alborz mountains, northern Iran[J]. *Tectonics*, 27(6), doi:10.1029/2008TC002278, 2008.
- Banerjee D M, Mazumdar A. 1999. On the Late Neoproterozoic–Early Cambrian Transition Events in Parts of East Gondwanaland[J]. *Gondwana Research*, 2(2):199–211.
- Beales F W, Hardy J L. 1980. Criteria for the recognition of diverse dolomite types with an emphasis on studies on host rocks for Mississippi Valley Type ore deposits[J]. *SEPM Special Publication*, 28: 197–213.
- Bechstadt T. 1978. The lead–zinc deposit of Bleiberg–Kreuth (Carinthia, Austria): Palinspastic situation, paleogeography and ore mineralization[J]. *Verhandlungen Geol. Bundesanstalt*, 3: 221–235.
- Bechtel A, Pervaz M, Püttmann W. 1998. Role of organic matter and sulphate–reducing bacteria for metal sulphide precipitation in the Bahloul Formation at the Bou Grine Zn/Pb deposit (Tunisia) [J]. *Chemical Geology*, 144(1/2):1–21.
- Bechtel A, Shieh Y N, Pervaz M, Püttmann W. 1996. Biodegradation of hydrocarbons and biogeochemical sulfur cycling in the salt dome environment: inferences from sulfur isotope and organic geochemical investigations of the bahloul formation at the Bou Grine Zn/Pb ore deposit, Tunisia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(60): 2833–2855.
- Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, Ratschbacher L, Bi S, Wu Z, McWilliams M O, Calvert A. 2001. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago[J]. *Nature*, 412(6847): 628–632.
- Boni M, Gilg H A, Balassone G, Schneider J, Allen C R, Moore F. 2007. Hypogene Zn carbonate ores in the Angouran deposit, NW Iran[J]. *Mineralium Deposita*, 42(8): 799–820.
- Bouabdellah M. 2012. Genesis of the Touissit–Bou Beker Mississippi Valley–type district (Morocco–Algeria) and its relationship to the Africa–Europe collision[J]. *Economic Geology*, 107(1): 117–146.
- Bouabdellah M, Brown A C, Sangster D F. 1995. Mechanisms of formation of internal sediments at the Beddiane lead–zinc deposit, Touissit Mining district, northeastern Morocco[C]//International Field Conference on Carbonate–Hosted Lead–Zinc Deposits, Extended Abstract, St. Louis, Missouri USA.
- Bouabdellah M, Niedermann S, Velasco F. 2015. The Touissit–Bou Beker Mississippi Valley–type district of northeastern Morocco: relationships to the Messinian salinity crisis, Late Neogene–Quaternary alkaline magmatism, and buoyancy–driven fluid convection[J]. *Economic Geology*, 110(6): 1455–1484.
- Bouhrel S, Johnson C A, Leach D L. 2007. The peridiapiric–type Pb–Zn deposit at Fedj El Adoum, Tunisia: Geology, petrography, and stable isotopes[C]//Proceedings of the Ninth Biennial SGA Meeting, Dublin, Ireland, 1: 323–326.
- Bouhrel S, Leach D L, Johnson C A, Lehmann B. 2009. Ore Textures and isotope signatures of the peridiapiric carbonate–hosted Pb–Zn deposit of Bougrine, Tunisia[C]//Proceedings of the Tenth Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits, Townsville, Queensland, 1: 409–411.
- Bouhrel S, Leach D L, Johnson C A, Marsh E, Salmi–Laouar S, Banks D A. 2016. A salt diapir–related Mississippi Valley–type deposit: the Bou Jaber Pb–Zn–Ba–F deposit, Tunisia: fluid inclusion and isotope study[J]. *Mineralium Deposita*, 51 (6): 749–780.
- Bradley D C, Leach D L. 2003. Tectonic controls of Mississippi Valley–type lead–zinc mineralization in orogenic forelands[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 652–667.
- Bradley D C, Leach D L, Symons D, Emsbo P, Premo W, Breit G, Sangster, D F. 2004. Reply to discussion on “Tectonic controls of Mississippi Valley–type lead–zinc mineralization in orogenic forelands” by Kesler S E, Christensen J T, Hagni R D, Heijlen W, Kyle J R, Misra K C, Muechez P, Van der Voo R[J]. *Mineralium Deposita*, 39(4): 515–519.
- Brevart O, Dupré B, Allegre C J. 1982. Metallogenic provinces and the remobilization process studied by lead isotopes; lead–zinc ore deposits from the southern Massif Central, France[J]. *Economic Geology*, 77(3): 564–575.
- Brigo L, Omenetto P. 1979. The lead and zinc ores of the Raibl (Cave del Predil–northern Italy) Zone: new metallogenic data[J]. *Verh. Geol. Bundesanstalt (Austria)*, 3: 241–247.
- Brugger J, McPhail D C, Wallace M, Waters J. 2003. Formation of Willemite in Hydrothermal Environments[J]. *Economic Geology*, 98(4): 819–835.
- Burchfiel B C. 1980. Eastern European Alpine system and the Carpathian orocline as an example of collision tectonics[J]. *Tectonophysics*, 63(1/4): 31–61.
- Cai J X, Zhang K J. 2009. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic[J]. *Tectonophysics*, 467(1/4): 35–43.
- Charef A, Sheppard S M F. 1987. Pb–Zn mineralization associated with diapirism: fluid inclusion and stable isotope (H, C, O) evidence for the origin and evolution of the fluids at Fedj–el–Adoum, Tunisia[J]. *Chemical Geology*, 61(1): 113–134.
- Chen Wei, Kong Zhigang, Liu Fengxiang, Wang Xuewu, Deng Mingguo, Zhao Jianxing. 2017. Geology, geochemistry, and ore genesis of the Nayongzhi Pb–Zn deposit, Guizhou Province, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1269–1284(in Chinese with English abstract).
- Chi G, Xue C, Sun X, Lai J, Luo P, Song H, Li S, Zeng R. 2017. Formation of a giant Zn–Pb deposit from hot brines injecting into a shallow oil–gas reservoir in sandstones, Jinding, southwestern China[J]. *Terra Nova*, 29: 312–320.
- Clayton C J, Baird A W. 1997. Fluid flow, Pb–Zn mineralization, hydrocarbon maturation and migration in the Tunisian Atlas[C]. *Geofluids II’ 97.* International Conference on Fluid Evolution, Migration, and Interaction in Sedimentary Basins and Orogenic Belts, 2nd, Extended Abstracts.

- Coppola V, Boni M, Gilg H A, Strzelska-Smakowska B. 2009. Nonsulfide zinc deposits in the silesia-cracow district, southern Poland[J]. *Mineralium Deposita*, 44(5): 559-580.
- Cox S F, Knackstedt M A, Braun J. 2001. Principles of structural controls on permeability and fluid flow in hydrothermal systems[M]//Richards J P, Tosdal R M (ed.). *Structural Controls on Ore genesis, Reviews in Economic Geology*, 14: 1-24.
- Dal Piaz G V, Bistacchi A, Massironi M. 2003. Geological outline of the Alps[J]. *Episodes*, 26(3): 175-180.
- Daliran F, Pride K, Walther J, Berner Z A, Bakker R J. 2013. The Angouran Zn (Pb) deposit, NW Iran: evidence for a two stage, hypogene zinc sulfide-zinc carbonate mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 53:373-402.
- DeCelles P G, Kapp P, Gehrels G E, Ding L. 2014. Paleocene-Eocene foreland basin evolution in the Himalaya of southern Tibet and Nepal: Implications for the age of initial India-Asia collision[J]. *Tectonics*, 33(5): 824-849.
- Disnar J R. 1996. A comparison of mineralization histories for two MVT deposits, Trèves and Les Malines (Causse basin, France), based on the geochemistry of associated organic matter[J]. *Ore Geology Reviews*, 11(1/3): 133-156.
- Dong Lianhui, Xu Xingwang, Fan Tingbin, Qu Xun, Li Hao, Wan Jianling, An Haitao, Zhou Gang, Li Jihong, Chen Gang, Liu Chuan. 2015. Discovery of the Huoshaoyun super-Large exhalative-sedimentary carbonate Pb-Zn deposit in the Western Kunlun area and its great significance for regional metallogeny[J]. *Xinjiang Geology*, 33(1): 41-50 (in Chinese with English abstract).
- Dzulynski S, Sass-Gustkiewicz M. 1977. Comments on the genesis of the eastern Alpine zinc-lead deposits[J]. *Mineralium Deposita*, 12: 219-288.
- Ehya F. 2014. The Paleozoic Ozbak-Kuh carbonate-hosted Pb-Zn deposit of East Central Iran: Isotope (C, O, S, Pb) geochemistry and ore genesis[J]. *Mineralogy and Petrology*, 108 (1): 123-136.
- Ehya F, Lotfi M, Rasa I. 2010. Emarat carbonate-hosted Zn-Pb deposit, Markazi Province, Iran: A geological, mineralogical and isotopic (S, Pb) study[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(2): 186-194.
- Emsbo P. 2000. Gold in sedex deposits[J]. *SEG Reviews*, 13: 427-437.
- Fernandez F G, Both R A, Mangas J, Arribas A. 2000. Metallogenesis of Zn-Pb carbonate-hosted mineralization in the southeastern region of the Picos de Europa (central northern Spain) province: geologic, fluid inclusion, and stable isotope studies[J]. *Economic Geology*, 95(1): 19-40.
- Fernandez-Martinez J, Velasco F. 1996. The Troya Zn-Pb carbonate-hosted sedex deposit, northern Spain[J]. *Carbonate-hosted lead-zinc deposits. Society of Economic Geologists Special Publication*, 4: 364-377.
- Frizon de Lamotte D, Leturmy P, Missenard Y, Khomsi S, Ruiz G, Saddiqi O, Guillocheau F, Michard A. 2009. Mesozoic and Cenozoic vertical movements in the Atlas system (Algeria, Morocco, Tunisia): an overview[J]. *Tectonophysics*, 475(1): 9-28.
- Gao Bingyu, Xue Chunji, Chi Guoxiang, Li Chao, Qu Wenjun, Du Andao. 2012. Re-Os dating of bitumen in the giant Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1561-1567 (in Chinese with English abstract).
- Gao Guangli. 1989. Tehtyan evaporite zone and corresponding mineral deposits in China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 14(5): 545-551 (in Chinese with English abstract).
- Gilg H A, Boni M, Hochleitner R, Struck U. 2008. Stable isotope geochemistry of carbonate minerals in supergene oxidation zones of Zn-Pb deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 33(2): 117-133.
- Golonka J. 2004. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic[J]. *Tectonophysics*, 381(1-4): 235-273.
- Gorecka E. 2013. Geological setting of the Silesian-Cracow Zn-Pb deposits[J]. *Geological Quarterly*, 37(2): 127-146.
- Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, Li Baohua, Xue Chunji, Dong Shuyi, Fu Shaohong. 2010. The coupling relationship between metallization and hydrocarbon accumulation in sedimentary basins[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 83-105 (in Chinese with English abstract).
- Guest B, Axen G J, Lam P S, Hassanzadeh J. 2006. Late cenozoic shortening in the west-central alborz mountains, northern Iran, by combined conjugate strike-slip and thin-skinned deformation[J]. *Geosphere*, 2(1): 35-52.
- Han R S, Liu C Q, Huang Z L, Chen J, Ma D Y, Lei L, Ma G S. 2007. Geological features and origin of the Huize carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag) district, Yunnan, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1): 360-383.
- Handy M R, Schmid S M, Bousquet R, Kissling E, Bernoulli D. 2010. Reconciling plate-tectonic reconstructions of Alpine Tethys with the geological-geophysical record of spreading and subduction in the Alps[J]. *Earth-Science Reviews*, 102(3): 121-158.
- He Guoxing, Sun Qiwu, Xia Chuanjian, Deng Binwu. 2006. Probe to genesis of Paoma Pb-Zn deposit, Ningnan county, Sichuan province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(b10): 81-84 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1): 106-132.
- He Shenghui, Rong Huifeng, Chen Xiansheng. 2014. Metallogenic geologic setting and mineralization process of the Maliping Pb-Zn deposit in Huize county, Yunnan[J]. *Mineral Exploration*, 5(5): 712-719 (in Chinese with English abstract).
- Hitzman M W, Reynolds N A, Sangster D, Allen C R, Carman C E. 2003. Classification, genesis, and exploration guides for nonsulfide

- zinc deposits[J]. *Economic Geology*, 98(4): 685–714.
- Hou Zengqian., Song Yucai, Li, Zheng, Wang Zhaolin, Yang Zhusen, Yang Zhiming, 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[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 123–144 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z, Cook N J. 2009. Metallogenesis of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue[J]. *Ore Geology Reviews*, 36(1): 2–24.
- Hou Z, Zhang H. 2015. Geodynamics and metallogeny of the eastern Tethyan metallogenic domain[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 346–384.
- Hu X, Garzanti E, Moore T, Raffi I. 2015. Direct stratigraphic dating of India–Asia collision onset at the Selandian (middle Paleocene, 59±1 Ma)[J]. *Geology*, 43(10): 859–862
- Hu, X, Garzanti E, Wang J, Huang W, An W, Webb A. 2016a. The timing of India–Asia collision onset—Facts, theories, controversies[J]. *Earth–Science Reviews*, 160: 264–299.
- Hu X, Wang J, Boudagher–Fadel M, Garzanti E, An W. 2016b. New insights into the timing of the India–Asia collision from the Paleogene Quxia and Jialazi formations of the Xigaze forearc basin, South Tibet[J]. *Gondwana Research*, 32: 76–92.
- Jankovic S. 1984. Strata-bound low temperature Pb–Zn–Ba±F deposits in carbonate rocks of western Asia: Geotectonic setting and main metallogenic features[C]. *Berlin: Syngeneses and Epigenesis in the Formation of Mineral Deposits*, Springer, 373–390.
- Khan A, Kelling G, Umar M, Kassi A. 2002. Depositional environments and reservoir assessment of Late Cretaceous sandstones in the south central Kirthar foldbelt, Pakistan[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 25(4): 373–406.
- Kibitlewski S. 2013. Tectonic control of the origin of Zn–Pb deposits in the Chrzanów region[J]. *Geological Quarterly*, 37(2): 229–240.
- Koptagel O, Ulusoy U, Fallick A E. 2007. Sulfur and Lead Isotope Investigations of the Carbonate-Hosted Pb–Zn Deposits in the Yahyalı Region, Kayseri, Southern Turkey[J]. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16(1): 57–76.
- Le Guen M, Orgeval J J, Lancelot J. 1991. Lead isotope behaviour in a polyphased Pb–Zn ore deposit: Les Malines (Cévennes, France)[J]. *Mineralium Deposita*, 26(3): 180–188.
- Leach D L, Apodaca L E, Kozłowski A, Landis G P, Hofstra A H. 1996. Fluid-inclusion gases in sphalerite, galena, and dolomite from the Silesian–Cracow Zn–Pb district, Poland[J]. *Prace–Panstwowego Instytutu Geologicznego*, 154: 104–111.
- 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[J]. *Mineralium Deposita*, 36(8): 711–740.
- 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[J]. *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. 2005. Sediment-hosted lead–zinc deposits: A global prospective[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume, 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[J]. *Mineralium Deposita*, 52(3): 281–296.
- Li Fayuan, Gu Xuexiang, Fu Shaohong, Zhang Ming. 2002. The role of organic matter in the formation of MVT Pb–Zn deposit[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 21(4): 272–276 (in Chinese with English abstract).
- Li Lianting. 2014. The geological feature of Fulechang Pb–Zn deposit and inference of deep prospecting in Luoping, Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 33(2): 240–244 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaoming, Tan Kaixuan, Gong Wenjun, Gong Gelian. 2000. Study on the metallogenic epoch of the Jinding lead–zinc deposit with apatite fission track analysis[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(3): 282–286 (in Chinese with English abstract).
- Li Y L, Wang C S, Dai J, Xu G, Hou Y, Li X. 2015. Propagation of the deformation and growth of the Tibetan–Himalayan orogen: A review[J]. *Earth–Science Reviews*, 143: 36–61.
- Li Z, Ding L, Song P, Fu J, Yue Y. 2015. Paleomagnetic constraints on the paleolatitude of the Lhasa block during the early Cretaceous: implications for the onset of India–Asia collision and latitudinal shortening estimates across Tibet and stable Asia[J]. *Gondwana Research*, 41: 352–372.
- Liaghat S, Moore F, Jami M. 2000. The Kuh-e-Surmeh mineralization, a carbonate-hosted Zn–Pb deposit in the simply folded belt of the Zagros Mountains, SW Iran[J]. *Mineralium Deposita*, 35(1): 72–78.
- Lin Fangcheng. 2005. Geological and geochemical characteristics and genesis of supper-large-scale Sedex-type stratiform lead–zinc deposits in the Dadu river valley on the western margin of the Yangtze craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 541–556 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Zhao Yanjun, Fang Xiaomin, Lu Fenglin, Wang Licheng, Yan Maodu, Zhang Hua, Ding Ting. Plate tectonics control on the distribution and formation of the marine potash deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1893–1907 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jishun. 1996. Some problems in studies of the exhalative sedimentary mineralization[J]. *Mineral Resources and Geology*, 10(1): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingchao, Hou Zengqian, Yang Zhusen, Tian Shihong, Song Yucai, Yang Zhiming, Wang Zhaolin, Li Zheng. 2008. Some

- insights and advances in study of Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 253-264 (in Chinese with English abstract).
- 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 Dongmohazhua Pb-Zn Deposit in the Thrust Fold Setting of the Tibetan Plateau, China: Evidence from Fluid Inclusion and Stable Isotope Data[J]. *Resource Geology*, 61(4): 384-406.
- Liu Yingchao, Hou Zengqian, Yu Yushuai, Tian Shihong, Li Yulong, Yang Zhusen. 2013. Characteristics and genesis of Lalongla MVT-like deposit in Changdu region, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(4): 1407-1426 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Ore Geology Reviews*. 70: 546-561.
- Liu Yingying, Qi Liang, Huang Zhilong, Zhou Jiayi, Zhu chuanwei, Huang Xiaowen. 2013. Re-Os dating of sulfides and geological implications in the Fule zinc-lead deposit, northeastern Yunnan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, S2: 599-600 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y Y, Qi L, Gao J F, Ye L, Huang Z L, Zhou J X. 2015. Re-Os dating of galena and sphalerite from lead-zinc sulfide deposits in Yunnan Province, SW China[J]. *Journal of Earth Science*, 26(3): 343-351.
- Makhoukhi S, Marignac C, Pironon J, Schmitt J M, Marrakchi C, Bouabdelli M, Bastoul A. 2003. Aqueous and hydrocarbon inclusions in dolomite from Touissit-Bou Beker district, Eastern Morocco: a Jurassic carbonate hosted Pb-Zn (Cu) deposit[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 78: 545-551.
- Metcalf I. 1996. Gondwanaland dispersion, Asian accretion and evolution of eastern Tethys[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 43(6): 605-623.
- Metcalf I. 2006. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: the Korean Peninsula in context[J]. *Gondwana Research*, 9(1): 24-46.
- Mirnejad H, Simonetti A, Molasalehi F. 2015. Origin and formational history of some Pb-Zn deposits from Alborz and Central Iran: Pb isotope constraints[J]. *International Geology Review*, 57(4): 463-471.
- Mitsuishi M, Wallis S R, Aoya M, Lee J, Wang Y. 2012. E-W extension at 19Ma in the Kung Co area, S. Tibet: Evidence for contemporaneous E-W and N-S extension in the Himalayan orogen[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 325: 10-20.
- Mladenova V, Valchev S. 1998. Ga/Ge ratio in sphalerite from the carbonate-hosted Sedmochislenitsi Deposit as a temperature indication of initial fluids[J]. *Spis.Bulgar. Geol. Druzh*, 59(2/3): 49-54.
- Jazi M A, Karimpour M H, Shafaroudi A M. 2017. Nakhlak carbonate-hosted Pb (Ag) deposit, Isfahan province, Iran: a geological, mineralogical, geochemical, fluid inclusion, and sulfur isotope study[J]. *Ore Geology Reviews*, 80: 27-47.
- Montacer M, Disnar J R, Orgeval J J, Trichet J. 1988. Relationship between Zn-Pb ore and oil accumulation processes: Example of the Bou Grine deposit (Tunisia)[J]. *Organic Geochemistry*, 13(1): 423-431.
- Mouthereau F, Lacombe O, Vergés J. 2012. Building the Zagros collisional orogen: timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence[J]. *Tectonophysics* 532:27-60.
- Omar H, Abdelhak B, Madjid C, Saadia Y, Hanafi H, Djamel B. 2016. Pb-Zn (Ba) deposits of the oriental Saharan Atlas (north-east of Algeria): distribution, control and implications for mining exploration[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(5): 1-10.
- Oszczytko N. 2010. Late Jurassic-Miocene evolution of the Outer Carpathian fold-and-thrust belt and its foredeep basin (Western Carpathians, Poland)[J]. *Geological Quarterly*, 50(1): 169-194.
- Peng Song, Jin Zhongguo, Lin Guisheng, Zhu Youqing, Wang Bing. 2016. Analysis of pore-controlling factors and metallogenic model of Wuzhishan lead-zinc deposit, Guizhou: a case study of Nayongzhi deposit[J]. *Mineral Exploration*, 7(3): 463-470 (in Chinese with English abstract).
- Pfaff K, Hildebrandt L H, Leach D L, Jacob D E, Markl G. 2010. Formation of the Wiesloch Mississippi Valley-type Zn-Pb-Ag deposit in the extensional setting of the Upper Rhinegraben, SW Germany[J]. *Mineralium Deposita*, 45(7): 647-666.
- Plumlee G S, Leach D L, Hofstra A H, Landis G P, Rowan E L, Viets J G. 1994. Chemical reaction path modeling of ore deposition in Mississippi Valley-type Pb-Zn deposits of the Ozark region, U.S. Midcontinent[J]. *Economic Geology*, 89(6): 1361-1383.
- Puigdefabregas C, Muñoz J, Vergés J. 1992. Thrusting and foreland basin evolution in the southern Pyrenees[M]. *Netherlands:Thrust tectonics*, Springer, 247-254.
- Qiu Dongzhou, Xie Yuan, Li Xiaoqing, Huang Fuxi. 2009. Geological Characteristics of Lithofacies Paleogeography and Hydrocarbon Accumulation in Asian Tethyan Tectonic Domain[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 14(2): 41-51 (in Chinese with English abstract).
- Rajabi A, Rastad E, Canet C. 2012. Metallogeny of Cretaceous carbonate-hosted Zn-Pb deposits of Iran: geotectonic setting and data integration for future mineral exploration[J]. *International Geology Review*, 54(14): 1649-1672.
- Rajabi A, Rastad E, Canet C. 2013. Metallogeny of Permian-Triassic carbonate-hosted Zn-Pb and F deposits of Iran: A review for future mineral exploration[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 60(2): 197-216.
- Rddad L, Bouhlel S. 2016. The Bou Dahar Jurassic carbonate-hosted Pb-Zn-Ba deposits (Oriental High Atlas, Morocco): Fluid-

- inclusion and C–O–S–Pb isotope studies[J]. *Ore Geology Reviews*, 72:1072–1087.
- Reichert J. 2007. A Metallogenic Model for Carbonate–hosted Non–sulphide Zinc Deposits Based on Observations of Mehdi Abad and Irankuh, Central and Southwestern Iran[D]. Unpublished Ph.D. thesis, Martin–Luther–Universität, Halle–Wittenberg, 152P.
- Reichert J, Borg G. 2008. Numerical simulation and a geochemical model of supergene carbonate–hosted non–sulphide zinc deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 33(2): 134–151.
- Reynolds N A, Chisnall T W, Kaewsang K, Keesaneyabutr C, Taksavasut T. 2003. The padaeng supergene nonsulfide zinc deposit, Mae Sod, Thailand[J]. *Economic Geology*, 98(4): 773–785.
- Rouvier H, Perthuisot V, Mansouri A. 1985. Pb–Zn deposits and salt–bearing diapirs in Southern Europe and North Africa[J]. *Economic Geology*, 80(3): 666–687.
- Sarkarinejad K, Azizi A. 2008. Slip partitioning and inclined dextral transpression along the Zagros Thrust System, Iran[J]. *Journal of Structural Geology*, 30(1): 116–136.
- 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[J]. *Economic Geology*, 77(2): 392–412.
- Schroll E, Rantitsch G. 2005. Sulphur isotope patterns from the Bleiberg deposit (Eastern Alps) and their implications for genetically affiliated lead–zinc deposits[J]. *Mineralogy and Petrology*, 84(1/2): 1–18.
- Selby D, Creaser R A. 2005. Direct radiometric dating of the Devonian–Mississippian time–scale boundary using the Re–Os black shale geochronometer[J]. *Geology*, 33(7): 545–548.
- Senogur A M C. 1987. Tectonics of the Tethyides: orogenic collage development in a collisional setting[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15(1): 213–244.
- Singer D A. 1995. World class base and precious metal deposits: A quantitative analysis[J]. *Economic Geology*, 90(1): 88–104.
- Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, Tian Shihong, Liu Yingchao, Wang Xiaohu, Liu Yanxue, Xue Chuandong, Wang Guanghui, Li Zheng. 2011. Sediment–hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang area, S.W. China: characteristics and genetic types[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 355–380 (in Chinese with English abstract).
- Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, Li Shijing, Wang Fuchun, Gao Yongwang, Gong Xiugang, Yang Zhusen, Zhang Hongrui, Li Liansong, Wang Guiren, Wang Yuanquan, Liu Qun, Hao Hongda. 2013. Mineral prospecting and its related approaches in Duocaima Pb–Zn deposit, Tuotuohe, Qinghai Province, China[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 744–756 (in Chinese with English abstract).
- Song Yucai, Hou Zengqian, Wang Guiren, Li Liansong, Yang Tiannan, Zhang Hongrui, Liu Yanxue, Yang Zhusen, Tian Shihong, Liu Yingchao, Jia Zongyong, Wang Yuankui, Liu Qun, Yan Ming, He Li. 2015. Metallogenic features and guidelines for ore exploration in Tuotuohe area, northern Sanjiang orogenic belt, China[J]. *Mineral Deposits*, 34(1): 1–20 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 533–545.
- Spangenberg J E, Herlec U. 2006. Hydrocarbon biomarkers in the Topla–Mežica zinc–lead deposits, northern Karavanke/Drau Range, Slovenia: Paleoenvironment at the site of ore formation[J]. *Economic Geology*, 101(5): 997–1021.
- 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[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9/10): 1293–1317.
- Stampfli G M. 2000. Tethyan oceans[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 173(1): 1–23.
- Stampfli G M, Borel G D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 196(1/2): 17–33.
- Suess E. 1893. Are great ocean depths permanent[J]. *Nat. Sci.*, 2: 180–187.
- Symons D, Sangster D, Leach D. 1995. A Tertiary age from paleomagnetism for Mississippi Valley–type zinc–lead mineralization in Upper Silesia, Poland[J]. *Econ. Geol.*, 90(4): 782–794.
- Symons D T, Lewchuk M T, Kawasaki K, Velasco F, Leach D L. 2009. The Reocin zinc–lead deposit, Spain: paleomagnetic dating of a late Tertiary ore body[J]. *Mineralium Deposita*, 44(8): 867–880.
- Talbot C, Aftabi P. 2004. Geology and models of salt extrusion at Qum Kuh, central Iran[J]. *J. Geol. Soc.*, 161(2): 321–334.
- Tang Yongyong, Bi Xianwu, Wu Liyan, Wang Lei, Zou Zhichao, He Liping. 2013. Re–Os isotopic dating of pyrite from Jinding Zn–Pb ore deposit and its geological significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(3): 287–294 (in Chinese with English abstract).
- Taylor R D, Leach D L, Bradley D C, Pisarevsky S A. 2009. Compilation of mineral resource data for Mississippi Valley–type and clastic–dominated sediment–hosted lead–zinc deposits[R]. Open–File Reprint 2009–1297, U.S. Geological Survey, 1–42.
- Thom J, Anderson G M. 2008. The role of thermochemical sulfate reduction in the origin of Mississippi Valley–type deposits. I. Experimental results[J]. *Geofluids*, 8(1), 16–26.
- Van Hinsbergen D J, Lippert P C, Dupont–Nivet G, McQuarrie N, Doubrovine P V, Spakman W, Torsvik T H. 2012. Greater India Basin hypothesis and a two–stage Cenozoic collision between India and Asia[J]. *PNAS*, 109(20): 7659–7664.
- Vandeginste V, Swennen R, Gleeson S A, Ellam R M, Osadetz K, Roure F. 2010. Zebra dolomitization as a result of focused fluid

- flow in the rocky mountains fold and thrust belt, Canada[J]. *Sedimentology*, 52(5): 1067–1095.
- Velasco F, Herrero J M, Yusta I, Alonso J A, Seebold I, Leach D. 2003. Geology and geochemistry of the Reocin zinc– lead deposit, Basque– Cantabrian Basin, Northern Spain[J]. *Econ. Geol.*, 98(7): 1371–1396.
- Verges J, Fernández M, Martínez A. 2002. The Pyrenean orogen: Pre-, syn-, and postcollisional evolution[J]. *J. Virtual Explor.*, 8: 55–74.
- Wan Zhifeng, Xia Bin, Cai Zhouong, Liu Ping, Zhang Yi. 2008. Controls of the Tethyan tectonic evolution on the hydrocarbon accumulation in Northwest Africa[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 28(4): 24–27 (in Chinese with English abstract).
- Wang Licheng, Liu Chenglin, Zhang Hua. 2013. Tectonic and Sedimentary Settings of Evaporites in the Dengying Formation, South China Block: Implications for the Potential of Potash Formation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 585–593.
- Wang C S, Zhao X, Liu Z, Lippert P C, Graham S A, Coe R S, Yi H, Zhu L, Liu S, Li Y. 2008. Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau[J]. *PNAS*, 105: 4987–4992.
- Wang J H, Yin A, Harrison T M, Grove M, Zhang Y Q, Xie G H. 2001. A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo–Asian collision zone[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 188(1):123–133.
- Wang Z, Wang A. 1985. Study of genesis of paleocave in the Tianbaoshan and Daliangzi deposits, Sichuan Province[J]. *Geology and Prospecting*, 10: 8–15 (in Chinese with English abstract).
- Warren J K. 2006. *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons*[M]. Würzburg: Springer Science & Business Media, 1–1035.
- Warren J K. 2016. *Evaporites: A Geological Compendium*[M]. Bangkok: Springer, 1–1813.
- Wei A Y, Xue C D, Xiang K, Li J, Liao C, 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 70: 562–577.
- Wilkinson J J. 2014. Sediment– hosted zinc– lead mineralization: Processes and Perspectives[C]//Turekian HDHK (ed.). *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, Oxford: Elsevier, 219–249.
- Williams H, Turner S, Kelley S, Harris N. 2001. Age and composition of dikes in Southern Tibet: New constraints on the timing of east–west extension and its relationship to postcollisional volcanism[J]. *Geology*, 29(4): 339–342.
- Wu F Y, Ji W Q, Wang J G, Liu C Z, Chung S L, Clift P D. 2014. Zircon U– Pb and Hf isotopic constraints on the onset time of India–Asia collision[J]. *Am. J. Sci.*, 314: 548–579.
- Wu Yue. 2013. *The Age and Ore-forming Process of MVT Deposits in the Boundary Zrea of Sichuan– Yunnano– Guizhou Provinces, Southwest China*[D]. Beijing: Ph.D. thesis, China University of Geosciences (Beijing), 1–167(in Chinese with English abstract).
- Xue C, Chi G, Li Z, Dong X. 2014. Geology, geochemistry and genesis of the Cretaceous and Paleocene sandstone– and conglomerate–hosted Urogen Zn– Pb deposit, Xinjiang, China: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 63: 328–342.
- Xue C, Zeng R, Liu S, Chi G, Qing H, Chen Y, Wang D. 2007. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn– Pb deposit, western Yunnan, South China: A review[J]. *Ore Geology Reviews*, 31(1): 337–359.
- Xue C J, Gao Y B, Chi G X, Leach D L. 2009. Possible former oil–gas reservoir in the giant Jinding Pb– Zn deposit, Lanping, NW Yunnan: the role in the ore accumulation[J]. *Journal Earth Science Environment*, 31: 221–229 (in Chinese with English abstract).
- Yalikul Y, Xue C, Symons D T A. 2017. Paleomagnetic age and tectonic constraints on the genesis of the giant Jinding Zn– Pb deposit, Yunnan, China[J]. *Mineralium Deposita*, doi: 10.1007/s00126–017–0733–9.
- Yan Zhigui, Xia Chuanjian, He Guangxing, Deng Binwu. 2006. Geological characteristics and ore potential analysis of Paoma Pb– Zn deposit, Ningnan county, Sichuan province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21: 77–80 (in Chinese with English abstract).
- Ye Hefei, Luo Jianning, Li Yongtie, Tong Zhenyan, Yu Qian, Wang Xiaolong, Zhu Tongxing, Feng Xintao. 1999. Tethyan tectonic domain and petroleum exploration[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20(1):1–27 (in Chinese with English abstract).
- Yigit O. 2009. Mineral deposits of Turkey in relation to Tethyan metallogeny: Implications for future mineral exploration[J]. *Geology*, 104(1): 19–51.
- Yin A. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. *Tectonophysics*, 488(1): 293–325.
- Yuan B, Mao J W, Yan X H, Wu Y, Zhang F, Zhao L L. 2014. Sources of metallogenic materials and metallogenic mechanism of Daliangzi ore field in Sichuan Province: Constraints from geochemistry of S, C, H, O, Sr isotope and trace element in sphalerite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30: 209–220 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Daoguo, Zhang Yingwen, Liu Kaikun. 2007. Geological characteristics and ore prospecting orientation of the Maomaochang– Zhazichang lead– zinc ore field in Northwestern Guizhou[J]. *Mineral Resources and Geology*, 21(4): 410–414 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Hou Z. 2015. Pattern and Process of Continent–Continent Collision Orogeny: A Case Study of the Tethys Collisional Orogen[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(9):1539–1559 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Changqing, Yu Jinjie, Mao Jingwen, Rui Zongyao. 2009. Advances in the study of Mississippi Valley– type deposits[J]. *Mineral Deposits*, 28(2): 195–210(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Zhang C Q, Wu Y, Hou L, Mao J W. 2015. Geodynamic setting of mineralization of Mississippi Valley-type deposits in world-class Sichuan-Yunnan-Guizhou Zn-Pb triangle, southwest China: Implications from age-dating studies in the past decade and the Sm-Nd age of Jinshachang deposit[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 103: 103-114.
- Zhang Zhiyang. 2003. An analysis of geology and genesis of Lehong Pb-Zn deposit[J]. *Yunnan Geology*, 22: 97-106 (in Chinese with English abstract).
- Zheng M H, Wang X C. 1991. Genesis of the Daliangzi Pb-Zn deposit in Sichuan, China[J]. *Economic Geology*, 86: 831-846.
- Zheng Mianping, Qi Wen, Zhang Yongsheng. 2006. Present situation of potash resources and direction of potash search in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1239-1246 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chaoxian, Wei Chunsheng. 1997. The Mississippi Valley-type lead-zinc deposits[J]. *Geology-Geochemistry*, 1: 65-75 (in Chinese with English abstract).
- Zhou J X, Bai J H, Huang Z L, Zhu D, Yan Z F, Lv Z C. 2015. Geology, isotope geochemistry and geochronology of the Jinshachang carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 272-284.
- Zhou J X, Gao J G, Chen D, Liu X K. 2013a. Ore genesis of the Tianbaoshan carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China: geologic and isotopic (C-H-O-S-Pb) evidence[J]. *International Geology Review*, 55: 1300-1310.
- Zhou J X, Huang Z L, Bao G P. 2013b. Geological and sulfur-lead-strontium isotopic studies of the Shaojiwan Pb-Zn deposit, southwest China: Implications for the origin of hydrothermal fluids[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 128: 51-61.
- Zhou J X, Huang Z L, Gao J G, Yan Z F. 2013c. Geological and C-O-S-Pb-Sr isotopic constraints on the origin of the Qingshan carbonate-hosted Pb-Zn deposit, Southwest China[J]. *International Geology Review*, 55: 904-916.
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, Li X B, Jin Z G. 2013d. Constraints of C-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 77-92.
- Zhou J X, Huang Z L, Yan Z F. 2013e. The origin of the Maozu carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China: constrained by C-O-S-Pb isotopic compositions and Sm-Nd isotopic age[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 73: 39-47.
- Zhou J X, Huang Z L, Lv Z C, Zhu X K, Gao J G, Mirnejad H. 2014. Geology, isotope geochemistry and ore genesis of the Shanshulin carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China[J]. *Ore Geology Reviews*, 63: 209-225.
- Zhou J Y, Wang J H, Horton B K, Yin A, Spurlin M S. 2011. The closure of Paleogene basins of east-central Tibet in response to tectonic, sedimentation, magmatism and paleoclimate[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 172-178 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xinyou, Wang Dongbo, Wang Shulai. 1998. Geology and sulfur isotope geochemistry of the Tamu-Kalangu lead-zinc deposits, Akto county, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 17(3): 204-214 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, Dilek Y, Hou Z Q, Mo X X. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Res.*, 23 (4): 1429-1454.
- Zhu Xinyou, Wang Jjingbin, Liu Zengren, Fang Tonghui. 2010. Geological characteristics and the genesis of the Wulagen lead-zinc deposit, Xinjiang, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84: 694-702 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安徽省地质调查局. 2005. 1:25万温泉幅-松西幅地质图[R]. 合肥.
- 陈伟, 孔志岗, 刘凤祥, 王学武, 邓明国, 赵剑星. 2017. 贵州纳雍枝铅锌矿床地质、地球化学及矿床成因[J]. *地质学报*, 91(6):1269-1284.
- 董连慧, 徐兴旺, 范廷宾, 屈迅, 李昊, 万建领, 安海涛, 周刚, 李基宏, 陈刚, 刘川. 2015. 喀喇昆仑火烧云超大型喷流-沉积成因碳酸盐型Pb-Zn矿的发现及区域成矿学意义[J]. *新疆地质*, 33: 42-50.
- 高炳宇, 薛春纪, 池国祥, 李超, 屈文俊, 杜安道. 2012. 云南金顶超大型铅锌矿床沥青Re-Os法测年及地质意义[J]. *岩石学报*, 28(5): 1561-1567.
- 高广立. 1989. 我国的特提斯聚盐带及有关矿产[J]. *地球科学*, (5): 545-551.
- 顾雪祥, 章永梅, 李葆华, 薛春纪, 董树义, 付绍洪. 2010. 沉积盆地中金属成矿与油气成藏的耦合关系[J]. *地学前缘*, 17(2):83-105.
- 贺光兴, 孙启武, 夏传见, 邓斌武. 2006. 四川省宁南县跑马铅锌矿成因浅析[J]. *地质找矿论丛*, 21(S1): 81-84.
- 贺胜辉, 荣惠锋, 陈贤胜. 2014. 云南麻栗坪铅锌矿床成矿地质背景及成矿作用[J]. *矿产勘查*, 5(5): 712-719.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 刘英超, 田世红, 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[J]. *矿床地质*, 27(2): 123-144.
- 李发源, 顾雪祥, 付绍洪, 章明. 2002. 有机质在MVT铅锌矿床形成中的作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 21(4): 272-276.
- 李连廷. 2014. 云南罗平富乐厂铅锌矿床地质特征及深部找矿推测[J]. *云南地质*, 33(2): 240-244.
- 李小明, 谭凯旋, 龚文君, 龚革联. 2000. 利用磷灰石裂变径迹法研究金顶铅锌矿成矿时代[J]. *大地构造与成矿学*, 24(3):283-286.
- 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[J]. *地质学报*, 79(4): 540-556.
- 刘成林, 赵艳军, 方小敏, 吕凤琳, 王立成, 颜茂都. 2015. 板块构造对海相钾盐矿床分布与成矿模式的控制[J]. *地质学报*, 89(11): 1893-1907.

- 刘继顺. 1996. 喷流沉积成矿作用研究的若干问题[J]. 矿产与地质, 10(1): 6-10.
- 刘英超, 侯增谦, 杨竹森, 田世洪, 宋玉财, 杨志明. 2008. 密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床:认识与进展[J]. 矿床地质, 27(2): 253-264.
- 刘英超, 侯增谦, 于玉帅, 田世洪, 李玉龙, 杨竹森. 2013. 西藏昌都地区拉拢拉类MVT铅锌矿床矿化特征与成因研究[J]. 岩石学报, 29(4): 1407-1426.
- 刘莹莹, 漆亮, 黄智龙, 周家喜, 朱传威, 黄小文. 2013. 滇东北富乐铅锌矿床硫化物Re-Os同位素年龄及其地质意义[J]. 矿物学报, S2: 599-600.
- 彭松, 金中国, 林贵生, 朱尤青, 王兵. 2016. 贵州五指山铅锌矿区控矿因素及成矿模式研究——以纳雍枝矿床为例[J]. 矿产勘查, 7(3): 463-470.
- 丘东洲, 谢渊, 李晓清, 黄福喜. 2009. 亚洲特提斯域岩相古地理与油气聚集地质特征[J]. 海相油气地质, 14(2): 41-51.
- 宋玉财, 侯增谦, 王贵仁, 李连松, 杨天南, 张洪瑞, 刘燕学, 杨竹森, 田世洪, 刘英超, 贾宗涌, 汪元奎, 刘群, 闫明, 何利. 2015. “三江”北段沱沱河地区的成矿规律与找矿方向[J]. 矿床地质, 34(1): 1-20.
- 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[J]. 岩石矿物学杂志, 30(3): 355-380.
- 宋玉财, 侯增谦, 杨天南, 李世金, 王富春, 高永旺, 巩秀钢, 杨竹森, 张洪瑞, 李连松, 王贵仁, 汪元奎, 刘群, 郝宏达. 2013. 青海沱沱河多才玛特大型Pb-Zn矿床一定位预测方法与找矿突破过程[J]. 矿床地质, 32: 744-756.
- 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 邹志超, 和利平. 2013. 云南金顶超大型铅锌矿床碳、氧、锶、铅同位素地球化学[J]. 地球化学, 42(5):467-480.
- 万志峰, 夏斌, 蔡周荣, 刘平, 张毅. 2008. 特提斯构造演化对西北非地区油气成藏的控制作用[J]. 沉积与特提斯地质, 28(4): 24-27.
- 王立成, 刘成林, 张华. 2013. 华南地块震旦纪晚期—早寒武世古大陆位置暨灯影组蒸发岩成钾条件分析[J]. 地球学报, 34(5):585-593.
- 王则江, 汪岸儒. 1985. 四川天宝山、大梁子铅锌矿床古岩溶洞穴沉积成因研究[J]. 地质与勘探, 10: 10-17.
- 吴越. 2013. 川滇黔地区MVT铅锌矿床大规模成矿作用的时代与机制[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1-167.
- 薛春纪, 高永宝, ChiG X, Leach D L. 2009. 滇西北兰坪金顶可能的古油气藏及对铅锌大规模成矿的作用[J]. 地球科学与环境学报, 31(3):221-229.
- 晏子贵, 夏传见, 贺光兴, 邓斌武. 2006. 四川省宁南县跑马铅锌矿地质特征及找矿前景分析[J]. 地质找矿论丛, 21(S1): 77-80.
- 叶和飞, 罗建宁, 李永铁, 童箴言, 余谦, 王小龙, 朱同兴, 冯心涛. 1999. 特提斯构造域与油气勘探[J]. 沉积与特提斯地质, 20(1):1-27.
- 袁波, 毛景文, 闫兴虎, 吴越, 张锋, 赵亮亮. 2014. 四川大梁子铅锌矿成矿物质来源与成矿机制:硫、碳、氢、氧、锶同位素及闪锌矿微量元素制约[J]. 岩石学报, 30(1):209-220.
- 张洪瑞, 侯增谦. 2015. 大陆碰撞造山样式与过程:来自特提斯碰撞造山带的实例[J]. 地质学报, 89(9):1539-1559.
- 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(2): 195-210.
- 张自洋. 2003. 乐红铅锌矿床地质与成因分析[J]. 云南地质, 22(1): 97-106.
- 曾道国, 张应文, 刘开坤. 2007. 对黔西北猫猫厂—榨子厂铅锌矿床地质特征及找矿方向的几点不同认识[J]. 矿产与地质, 21(4):410-414.
- 郑绵平, 齐文, 张永生. 2006. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. 地质通报, 25(11): 1239-1246.
- 周朝宪, 魏春生, 叶造军. 1997. 密西西比河谷型铅锌矿床[J]. 地质地球化学, 1: 65-75.
- 祝新友, 汪东波, 王书来. 1998. 新疆阿克陶县塔木—卡兰古铅锌矿带矿床地质和硫同位素特征[J]. 矿床地质, 17(3):204-214.
- 祝新友, 王京彬, 刘增仁, 方同辉. 2010. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因[J]. 地质学报, 84(5): 694-702.