金属矿产

doi:10.12134/j.dzykt.2020.06.003

喀喇昆仑林济塘盆地铅锌矿床容矿地层的海相沉积环境：源于侏罗系灰岩微量元素和石膏硫同位素的约束

唐俊林[1,2,3],李 昊[2],谭克彬[3],柯 强[2],董连慧[4],徐兴旺[2],哈依热提[3]

(1.中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083;2.中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;3.新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队,新疆哈密 839000;4.新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局,新疆乌鲁木齐 830000)

[摘 要]近年来,喀喇昆仑地区林济塘中生代沉积盆地内发现了火烧云超大型铅锌矿等众多铅锌矿床,以往对该地区的沉积环境以及其成矿相关性缺乏详细探讨。本文开展了林济塘盆地内侏罗系灰岩微量元素和石膏硫同位素分析,以揭示铅锌矿床容矿地层的沉积环境及其与成矿的相关性。研究发现,盆地内侏罗系灰岩中Ba、V、Ni、Cu、Co、Th、Co、Sr元素及比值特征显示其形成于海相,石膏硫同位素$\delta^{34}S$值为14.89‰~20.63‰,与同期海水相一致。研究结果表明该盆地内铅锌矿床的容矿地层形成于干热气候条件下的海相沉积氧化环境。

[关键词] 灰岩 石膏 微量元素 硫同位素 海相沉积 林济塘盆地 喀喇昆仑

[中图分类号]P595 [文献标识码] A [文章编号]0495-5331(2020)06-11

Tang Junlin, Li Hao, Tan Kebin, Ke Qiang, Dong Lianhui, Xu Xingwang, Ha Yireti. Ore-bearing strata of lead-zinc deposits in the Linjitang Basin of Karakorum in a marine sedimentary environment: Constraints from trace elements in limestone and sulfur isotope of gypsum in Jurassic [J]. Geology and Exploration, 2020, 56(6): 1134-1144.

0 引言

近年来,喀拉昆仑地区火烧云一带相继发现了多宝山、宝塔山、长山岭、萨岔口、五峰山、火烧云等铅锌矿床。其中,火烧云Pb-Zn矿床资源量超过1700万吨(范廷宾等,2018),达超大型规模。这些矿床均赋存于林济塘盆地之中,对该盆地开展容矿地层沉积环境及其成矿相关性的研究,对区域成矿预测研究具有重要作用。前人多认为该盆地于中生代沉积形成,位于前陆(董连慧等,2015)或弧后(李荣社等,2008;Pan et al.,2012)环境,对海相沉积环境的论证不足。作者通过对林济塘盆地内主要地层单元研究,开展了侏罗系灰岩微量元素和石膏硫同位素分析,为判断林济塘盆地内铅锌矿床容矿地层的沉积环境提供了新证据。

1 地质背景

研究盆地位于青藏高原北缘喀喇昆仑地区(图1),大地构造位置为羌塘-三江造山系甜水海地块之林济塘中生代沉积盆地,塔什库尔干-甜水海地体以南,羌塘地体以西(董连慧等,2010)。乔尔天山断裂呈南东向从盆地穿过,沿乔尔天山-岔路口断裂及两侧次级断裂形成新疆富集程度和规模最大的铅锌矿富集区(杜红星等,2012;徐仕琪等,2013;董连慧等,2015)。

林济塘盆地以北出露有晚三叠世深成岩浆岩,而在林济塘盆地以西、以南均出露有白垩纪岩浆弧,主要由喀拉昆仑地体及羌塘地体的花岗岩和花岗闪长岩侵入体组成。岩浆弧和林济塘盆地与班公-怒江洋盆向北俯冲至喀喇昆仑地体以下有关(潘桂棠等,2004;李荣社等,2008;Pan et al.,2012)。

[收稿日期]2020-04-23;[改回日期]2020-08-16;[责任编辑]郝情情。
[基金项目]国家自然科学基金项目(编号:41672088)资助。
[第一作者]唐俊林(1986年-),男,2012年毕业于新疆大学,获硕士学位,在读矿产普查与勘探专业,高级工程师,长期从事矿产普查、化探、区调工作。E-mail:254460796@qq.com。

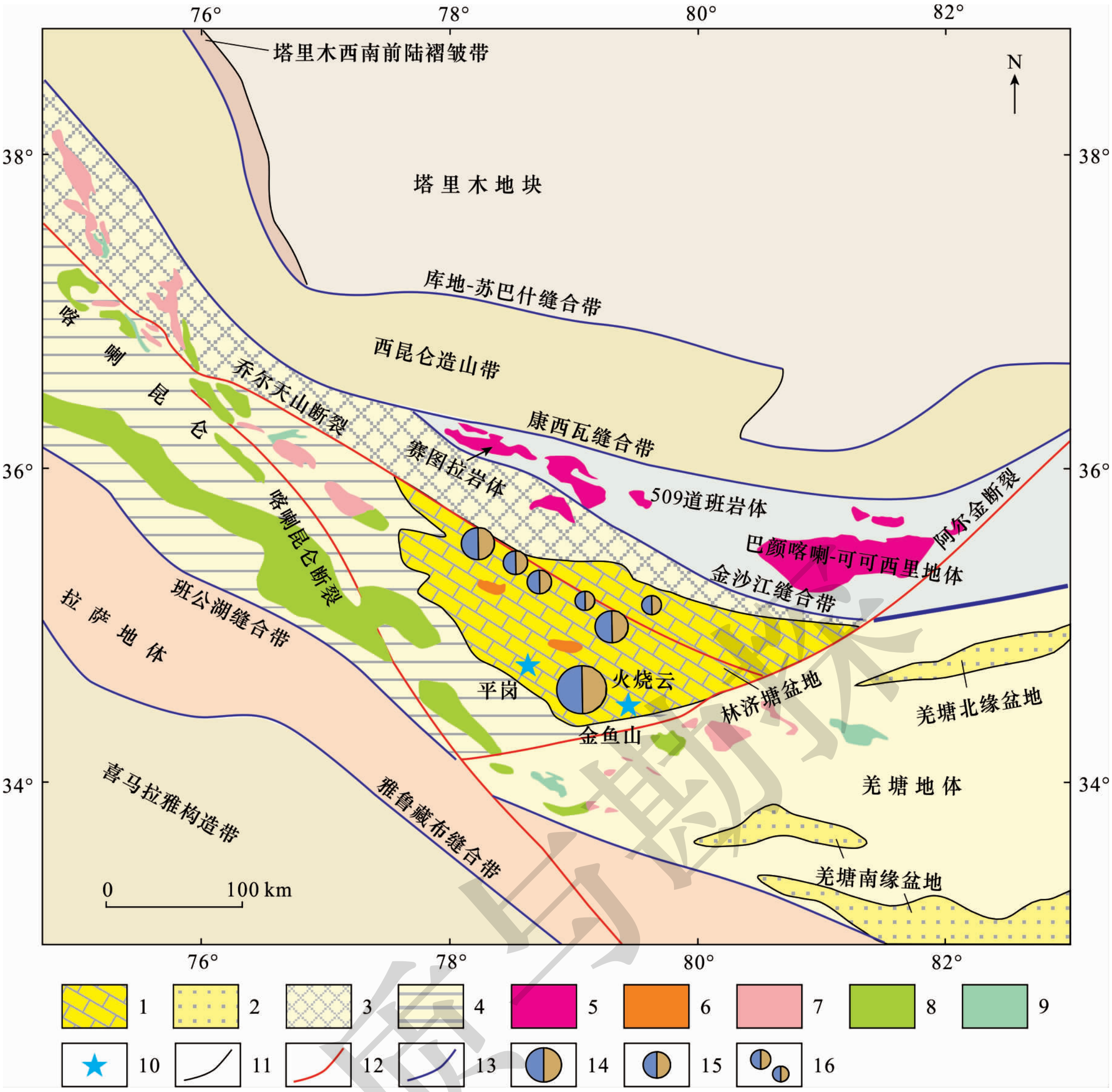

图 1　喀拉昆仑地区构造单元及林济塘盆地铅锌矿分布(构造单元与边界据潘桂棠等,2004;李荣社等,2008)

Fig. 1　Map showing tectonic units in the Karakorum area and distribution of Pb – Zn deposits in the Linjitang Basin (tectonic units and boundary after Pan et al. ,2004;Li et al. ,2008)

1 – 林济塘中生代盆地;2 – 羌塘南缘与北缘中生代盆地;3 – 塔什库尔干 – 甜水海地体;4 – 喀拉昆仑地体;5 – 三叠纪花岗岩;6 – 侏罗纪花岗岩;7 – 白垩纪花岗岩;8 – 白垩纪花岗闪长岩;9 – 白垩纪闪长岩;10 – 采样位置;11 – 地质界线;12 – 区域大断裂;13 – 缝合带;14 – 超大型铅锌矿;15 – 大型铅锌矿;16 – 中 – 小型铅锌矿

1 – Linjitang Mesozoic basin;2 – Mesozoic basin in the southern and northern margin of Qiangtang;3 – Tashkurgan – Tianshuihai terrane;4 – Karakoram terrane;5 – Triassic granite;6 – Jurassic granite;7 – Cretaceous granite;8 – Cretaceous granodiorite;9 – Cretaceous diorite;10 – sampling location;11 – geological boundary;12 – regional fault;13 – suture zone;14 – superlarge lead – zinc deposit;15 – large lead – zinc deposit;16 – small and medium – sized lead – zinc deposit

林济塘中生代沉积盆地主要地层单元为侏罗系和白垩系,由下向上依次为下侏罗统巴公布兰莎组、中侏罗统龙山组、上侏罗统红其拉甫组及上白垩统铁龙滩组(图 2)。侏罗系巴工布兰莎组为火烧云铅锌矿的赋矿地层,地层厚度 369 ~ 2313 m,主要由砂砾岩、灰岩等组成,夹有石膏层。

火烧云地层剖面底部为砾岩、砂岩,往上为鲕状灰岩及砂质灰岩,中部有薄层泥岩,上部为微晶灰岩和生物碎屑灰岩,顶部出露石膏层,厚 10 余米。

金鱼山地层剖面底部为灰岩,往上为泥质灰岩、泥岩,中部出现多层石膏,厚约 4 ~ 15 m,往上为泥岩和生物碎屑灰岩,顶部为泥岩;石膏呈浅灰 – 白色,粒状结构,块状构造,含少许碳质(图 3b、3d)。灰岩呈浅灰色,微晶 – 泥晶结构,块状构造,岩石由方解石,少许白云石和碳质组成(图 3e、3f)。

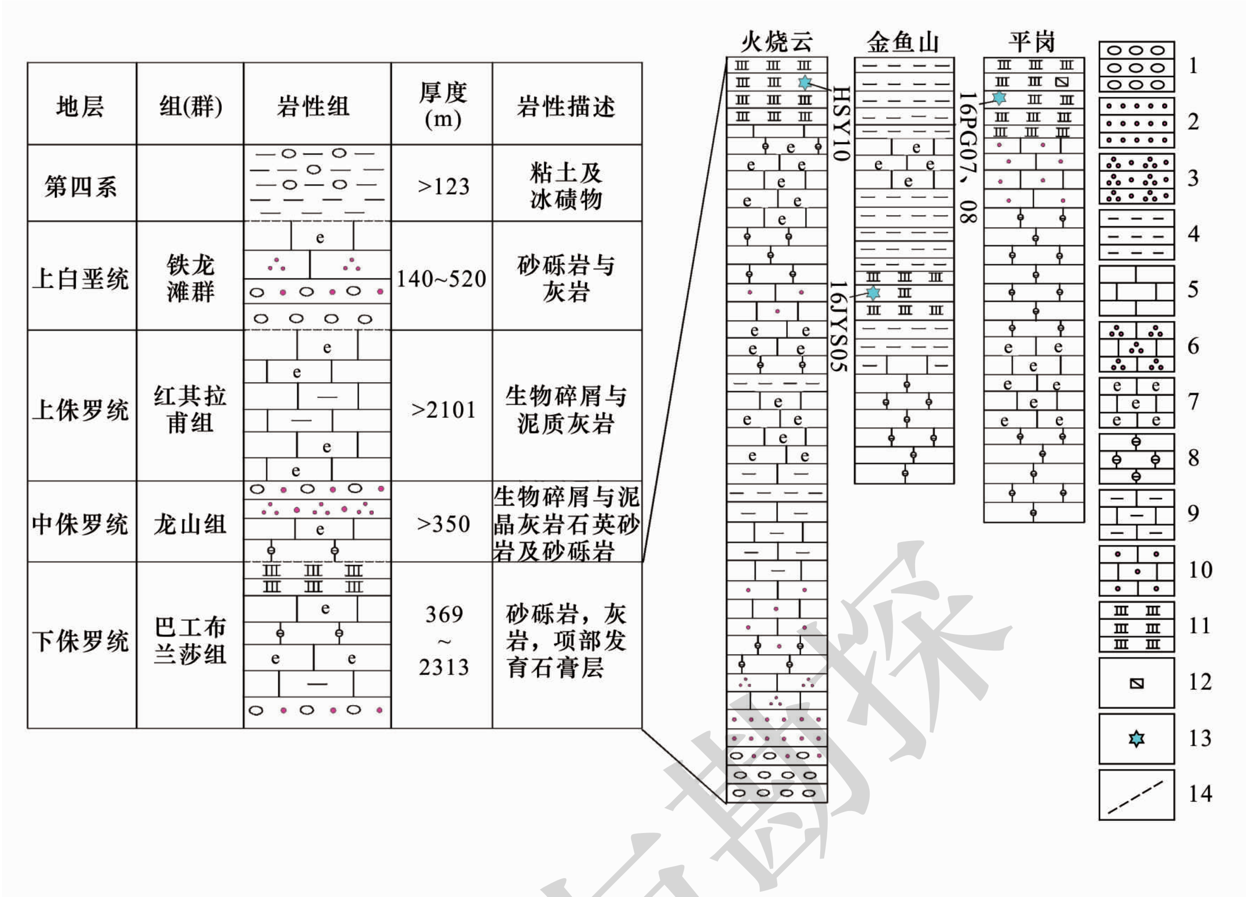

图 2　林济塘盆地区域地层柱状图(地层岩性及厚度据安徽地质调查院,2005a,2005b)

Fig. 2　Stratigraphic column of the Linjitang Basin (stratigraphic lithology and thickness after Anhui Geological Survey Institute, 2005a, 2005b)

1－砾岩;2－砂岩;3－石英砂岩;4－泥岩;5－灰岩;6－砂质灰岩;7－生物碎屑灰岩;8－微晶灰岩;9－泥质灰岩;10－鲕状灰岩;11－石膏;12－黄铁矿;13－采样位置;14－不整合界限

1－conglomerate;2－sandstone;3－quartz sandstone;4－mudstone;5－limestone;6－sandy limestone;7－bioclastic limestone;8－micrite;9－argillaceous limestone;10－oolitic limestone;11－gypsum;12－pyrite;13－sampling location;14－unconformable boundary

平岗地层剖面由下往上依次为微晶灰岩→生物碎屑灰岩→微晶灰岩→砂质灰岩→石膏。灰岩呈浅灰色,微晶－泥晶结构,部分为生物碎屑结构,块状构造,岩石由方解石,少许白云石和褐铁矿组成(图 3g、3h)。石膏呈浅灰－白色,粒状结构,块状构造,含星点状黄铁矿(图 3a、3c),厚度近 20 m。

2　样品来源和分析测试

2.1　样品来源

本次研究样品为侏罗系巴工布兰莎组灰岩和石膏,分别取自平岗(地理坐标:34°52′24.93″N,78°44′51.21″E)和金鱼山(地理坐标:34°34′48.93″N,79°25′39.22″E)两处(图 1),共取 23 件灰岩样品和 12 件石膏样品,样品采集时避开风化带和断裂带,选取未风化蚀变的新鲜岩石。

2.2　分析方法

2.2.1　微量元素分析

23 件灰岩样品分析测试在新疆矿产实验研究所完成。样品处理过程为清洗、晾干、粉碎至 200 目以下。X 射线荧光光谱法测定 Ba、Cr、Sr 元素、等离子体质谱法测定 Th、U 元素,等离子体光学发射光谱法测定 Co、Ni、Cu、V 元素。

2.2.2　硫同位素分析

硫同位素测试于中科院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室完成,测定使用仪器为 Finnigan DELTA S 气体同位素质谱仪。测定样品硫同位素时,将约 5 mg 粉末样品与 40 mg 五氧化二矾在真空条件下反应,反应温度 940℃,时长 30 min。分析测试结果用 V－CDT 标准表示,测试精度优于 ±0.2‰。

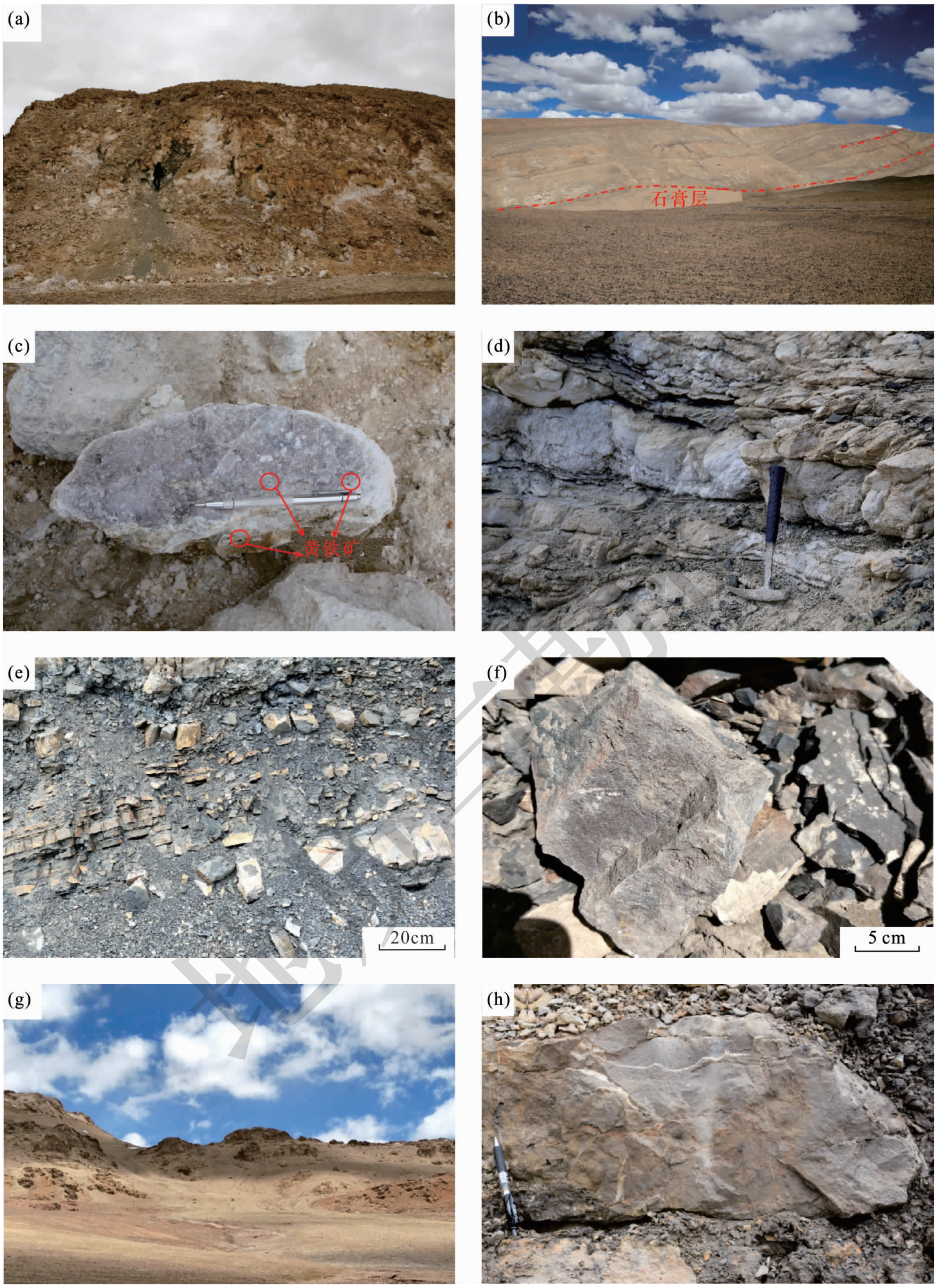

图 3　平岗、金鱼山石膏、灰岩特征

Fig. 3　Characteristics of gypsum and limestone at Pinggang and Jinyushan

a－平岗石膏层;b－金鱼山石膏层;c－平岗石膏中星点状黄铁矿;d－金鱼山石膏;e,f－金鱼山灰岩;g,h－平岗灰岩

a－ Pinggang gypsum; b － Jinyushan gypsum; c － stellate pyrite in Pinggang gypsum; d － Jinyushan gypsum; e, f － Jinyushan limestone; g, h－Pinggang limestone

3 测试结果

3.1 微量元素

灰岩微量元素含量见表 1。Ba 含量 $12.9\times10^{-6}\sim334\times10^{-6}$，平均 56.11×10^{-6}；V 含量 $4.3\times10^{-6}\sim13.3\times10^{-6}$，平均 8.08×10^{-6}；Ni 含量 $2.5\times10^{-6}\sim5.4\times10^{-6}$，平均 3.51×10^{-6}；Cu 含量 $1.8\times10^{-6}\sim22.3\times10^{-6}$，平均 5.67×10^{-6}；Cr 含量 $1\times10^{-6}\sim11.9\times10^{-6}$，平均 6.56×10^{-6}；U 含量 $0.28\times10^{-6}\sim2.2\times10^{-6}$，平均 0.89×10^{-6}；Th 含量 $0.3\times10^{-6}\sim1.2\times10^{-6}$，平均 0.73×10^{-6}；Co 含量 $0.31\times10^{-6}\sim2.5\times10^{-6}$，平均 1.03×10^{-6}；Sr 含量 $194\times10^{-6}\sim454\times10^{-6}$，平均 304.96×10^{-6}。

表 1 侏罗系巴工布兰莎组灰岩微量元素分析数据

Table 1 Trace – element analysis data of limestone in Jurassic Bagonglulansha Formation

序号	样号	Ba	V	Ni	Cu	Cr	U	Th	Co	Sr
1	100D5	57.4	6.8	4.3	3.6	11.1	0.74	0.92	1.4	403
2	100D13	67.2	4.3	3.1	2	2	0.48	0.79	0.84	341
3	100D14	76.2	9.4	5.1	3.1	15	0.69	1.2	0.79	194
4	100D15	334	10.7	3.1	2	7.3	0.64	1.1	0.75	402
5	100D16	160	13.3	5.4	4.9	11.3	0.76	1.2	2.5	332
6	112B1	15.4	4.6	2.8	3.4	5.4	0.73	0.3	0.8	261
7	112B2	57.5	8.2	3.9	1.8	10	0.87	0.47	0.6	304
8	112B3	21.7	6.2	3.2	2.7	11.9	0.93	0.61	0.7	272
9	112B4	29.5	5.9	4.1	2.6	6.7	1.2	0.48	1.2	354
10	112B6	37.8	5	3.4	2.8	7.9	1.1	0.36	1.1	419
11	112B7	26.8	5.5	4.3	2.3	3	0.9	0.53	1.1	444
12	112B8	21.1	7	3.6	3.6	5.3	2.2	0.6	1.1	381
13	112B9	34.6	7.1	3.8	3.5	6.1	1.3	0.57	1.3	445
14	112B10	40.9	8.1	4.9	5.5	5.5	1.2	0.84	0.81	454
15	021D1	28.9	10.2	2.8	3.5	3.3	0.69	1.1	0.73	218
16	021D2	12.9	10.5	2.5	2.9	1	1.8	0.46	0.31	202
17	022A1	27.7	8.6	2.7	6.4	11.6	0.67	0.7	0.74	211
18	022C1	41	9.6	3	4.1	3.8	0.59	0.69	1.2	224
19	022C2	51.3	8.6	2.8	11.9	1	0.28	0.56	1.1	244
20	022C3	39.4	8.4	3.1	17.3	5.2	0.34	0.91	1.4	239
21	022C4	18	7.8	2.8	6.3	1.7	0.64	0.64	0.97	208
22	022C5	62.8	9.8	3.2	22.3	6.7	0.6	0.88	1.2	224
23	022C6	28.5	10.2	2.8	11.8	8	1.2	0.8	1.1	238

注：测试单位：新疆矿产实验研究所；测试时间：2018 年。

3.2 硫同位素

从表 2 中可以看出，平岗 5 件石膏样品硫同位素值在 19.25‰～20.63‰之间，3 件含星点状黄铁矿石膏样品中黄铁矿硫同位素值在 11.08‰～11.40‰之间；金鱼山 4 件石膏样品硫同位素值在 14.89‰～16.84‰之间。

表 2　侏罗系巴工布兰莎组石膏硫同位素分析数据

Table 2　Analysis data of gypsum sulfur isotope in Jurassic Bagonglulansha Formation

序号	样品编号	岩性	$\delta^{34}S$(‰)	采样位置	分析矿物
1	16PG08 - 1 - 1	含星点状黄铁矿石膏	11.28	平岗	黄铁矿
2	16PG08 - 2 - 1	含星点状黄铁矿石膏	11.08		
3	16PG08 - 3 - 1	含星点状黄铁矿石膏	11.40		
4	16PG07 - 1	石膏	19.25		石膏
5	16PG07 - 3	石膏	20.19		
6	16PG07 - 5	石膏	20.63		
7	16PG08 - 3	含星点状黄铁矿石膏	20.40		
8	16PG08 - 5	含星点状黄铁矿石膏	19.83		
9	16JYS05 - 1	石膏	15.22	金鱼山	石膏
10	16JYS05 - 3	石膏	14.89		
11	16JYS05 - 5	石膏	15.69		
12	16JYS05 - 8	石膏	16.84		
13	HSY10 - 1	石膏	16	火烧云	石膏
14	HSY10 - 2	石膏	15.1		
15	HSY10 - 3	石膏	16		
16	HSY10 - 4	石膏	16.2		
17	HSY10 - 5	石膏	15.7		

注:火烧云样品据 Li et al. (2019)。

4　讨论

4.1　灰岩微量元素地球化学意义

灰岩其成分特征蕴含着沉积环境、地壳发展演化密切相关的信息,独特的地球化学成分反映了某些物源特征及沉积演化历程(Mclennan et al. ,1990;Jafarzadeh and Hosseini - Barzi,2008;Gabo et al. ,2009)相关元素及比值特征对古海水的氧化还原环境、古盐度、古气候等特征具较好的指示作用(Taylor and McLennan,1985;陈松等,2011)。

一般认为,Sr/Ba 比值是指示沉积水体盐度的重要标志,该值大于 1.0 为海相咸水,0.6 ~1 为半咸水相,小于 0.6 为陆相淡水(王敏芳等,2005;倪善芹等,2010;钱利军等,2012;屈李华等,2019)。样品的 Sr/Ba 为 1.2 ~18.06,平均值 8.91(表 3),表明灰岩形成于海相咸水环境。

Sr/Cu 值可用于古气候条件的判别,常常是气候温湿和干热的重要指标,Sr/Cu 处于 1 ~10 指示温湿气候,大于 10 指示干热气候(刘刚和周东升,2007;陈松等,2013)。样品的 Sr/Cu 值为 10.04 ~201,平均 90.07,反映干热气候条件。

表 3　侏罗系巴工布兰莎组灰岩微量元素比值

Table 3　Ratios of trace elements in limestone of Jurassic Bagonglulansha Formation

序号	样号	Sr/Ba	Sr/Cu	V/Cr	Ni/Co	U/Th
1	100D5	7.02	111.94	0.61	3.07	0.8
2	100D13	5.07	170.5	2.15	3.69	0.61
3	100D14	2.55	62.58	0.63	6.46	0.58
4	100D15	1.2	201	1.47	4.13	0.58
5	100D16	2.08	67.76	1.18	2.16	0.63
6	112B1	16.95	76.76	0.85	3.5	2.43
7	112B2	5.29	168.89	0.82	6.5	1.85
8	112B3	12.53	100.74	0.52	4.57	1.52
9	112B4	12	136.15	0.88	3.42	2.5
10	112B6	11.08	149.64	0.63	3.09	3.06
11	112B7	16.57	193.04	1.83	3.91	1.7
12	112B8	18.06	105.83	1.32	3.27	3.67
13	112B9	12.86	127.14	1.16	2.92	2.28
14	112B10	11.1	82.55	1.47	6.05	1.43
15	021D1	7.54	62.29	3.09	3.84	0.63

续表 3
Continued Table 3

序号	样号	Sr/Ba	Sr/Cu	V/Cr	Ni/Co	U/Th
16	021D2	15.66	69.66	10.5	8.06	3.91
17	022A1	7.62	32.97	0.74	3.65	0.96
18	022C1	5.46	54.63	2.53	2.5	0.86
19	022C2	4.76	20.5	8.6	2.55	0.5
20	022C3	6.07	13.82	1.62	2.21	0.37
21	022C4	11.56	33.02	4.59	2.89	1
22	022C5	3.57	10.04	1.46	2.67	0.68
23	022C6	8.35	20.17	1.28	2.55	1.5

氧化还原条件常常可用 V/Cr、Ni/Co、U/Th 值判别。通常认为 V/Cr 小于 2 时指示含氧环境；V/Cr 在 2 ~ 4.25 为贫氧环境，大于 4.25 时指示次氧 - 缺氧环境；Ni/Co 小于 5 时指示氧化环境，5 ~ 7 之间为次还原环境，大于 7 时指示还原环境；一般 U/Th 大于 1.25，代表缺氧环境，介于 0.75 ~ 1.25 之间，代表贫氧环境，小于 0.75，代表氧化环境（Dill，1986；Algeo and Maynard，2004；林治家等 2008；常华进等，2009；王淑芳等，2014）（表 4）。样品的 V/Cr 比值在 0.52 ~ 10.5，平均 2.17，其中 17 件样品在 2 以下，反映含氧沉积环境；Ni/Co 比值在 2.21 与 8.06 之间，平均 3.81，总体显示为氧化环境，分别有 2 件和 1 件样品落入次还原环境和还原环境。样品 U/Th 比值在 0.37 与 3.91 之间，平均 1.48，其中小于 0.75 的有 8 件，在 0.75 与 1.25 之间的有 4 件，大于 1.25 的（还原环境）有 11 件（图 4）。三个特征比值判别有一定出入，显示灰岩层形成时氧化还原环境多变，总体形成于氧化环境，部分阶段形成于还原环境。这与上覆于平岗灰岩层的石膏中见有星点状黄铁矿的特征相符。

表 4　微量元素特征比值指示环境参数表

Table 4　Sedimentary environments indicated by characteristic ratios of trace elements

环境指标	元素比值	沉积环境	数据来源
Sr/Ba	>1	海相咸水	王敏芳等，2005；倪善芹等，2010；钱利军等，2012；屈李华等，2019
	0.6 ~ 1	陆相淡水	
	<0.6	半咸水相	
Sr/Cu	1 ~ 10	温湿气候	刘刚等，2007；陈松等，2013
	>10	干热气候	
V/Cr	<2	含氧环境	Dill，1986；Algeoand and Maynard，2004；林治家等 2008；常华进等，2009；王淑芳等，2014
	2 ~ 4.25	贫氧条件	
	>4.25	贫氧到缺氧环境	
Ni/Co	<5	氧化环境	
	5 ~ 7	次还原环境	
	>7	还原环境	
U/Th	<0.75	氧化环境	
	0.75 ~ 1.25	贫氧环境	
	>1.25	缺氧环境	

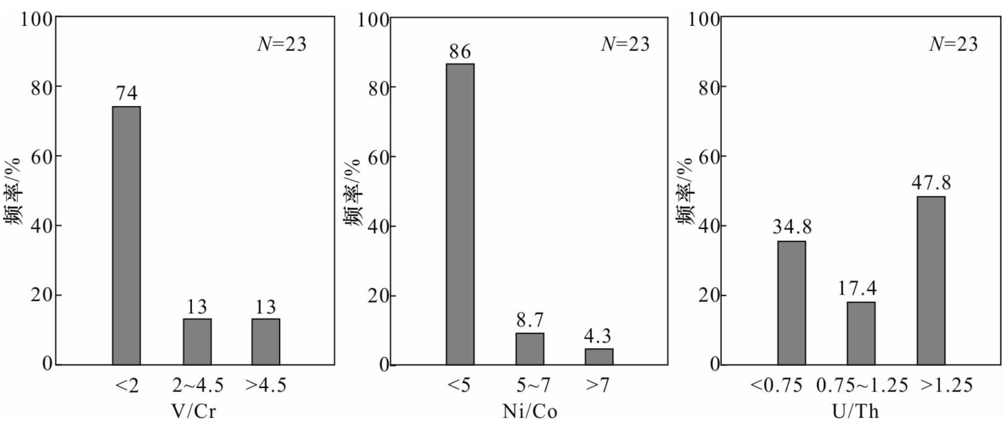

图 4　含氧量指标比值柱状图

Fig. 4　Ratio columns of oxygen content index

4.2　硫同位素的示源意义

石膏中硫同位素研究在矿床成因(Holser and Kaplan,1966;黄作良等,1996;Li et al.,2018)、成矿物质来源(牛新生等,2014;张华等,2014)、地层划分和对比(黄建国和刘世万,1990;梁汉东和丁悌平,2004)、沉积环境(史忠生等,2004;王春连等,2013)、古气候条件和古海洋环境(张同钢等,2004)等方面有较好的应用效果。

一般认为,同一地质时期海水中硫酸根的硫同位素值相对稳定,形成的硫酸盐矿物和海水硫酸盐本身具有大致相同的硫同位素组成,硫同位素值可用作沉积环境及物源判断(Tabakh et al.,1999;Bottrell and Newton,2006;)。平岗 5 件石膏样品硫同位素值在 19.25‰~20.63‰之间,金鱼山 4 件石膏样品硫同位素值在 14.89‰~16.84‰之间,火烧云 5 件石膏样品硫同位素值在 15.1‰~16.2‰之间(Li et al.,2019),与侏罗纪海水硫同位素值范围近一致(图 5、图 6)。平岗石膏层中可见星点状黄铁矿,3 件黄铁矿样品硫同位素值在 11.08‰~11.4‰之间,与盆地内火烧云矿床铅锌热液硫化物(Li et al.,2019;吴志旖等,2019)和多宝山方铅矿(杜红星等,2012)硫同位素值差别较大,表现为与平岗石膏层同源的特征。平岗石膏硫同位素值显著高于火烧云和金鱼山,应为其蒸发结晶过程中出现了硫同位素分馏,重硫偏向于富集在石膏中而轻硫则趋向于在黄铁矿中。

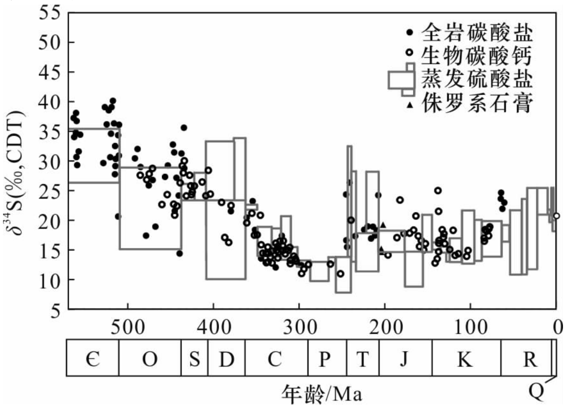

图 5　显生宙以来海相硫酸盐的 δ^{34}S 值随年代变化图(底图据 Kampschulte and Strauss,2004)

Fig.5　δ^{34}S values of marine sulphate since the Phanerozoic varying with ages(base diagram after Kampschulte and Strauss,2004)

林济塘盆地中铅锌矿床硫化物的硫同位素值差异较大,Li et al.(2019)认为硫主要来自于岩浆端元,吴志旖等(2019)认为其来源与细菌还原作用有关。数据结论还存在争议,这些矿床与容矿地层的成因关系还有待进一步论证。

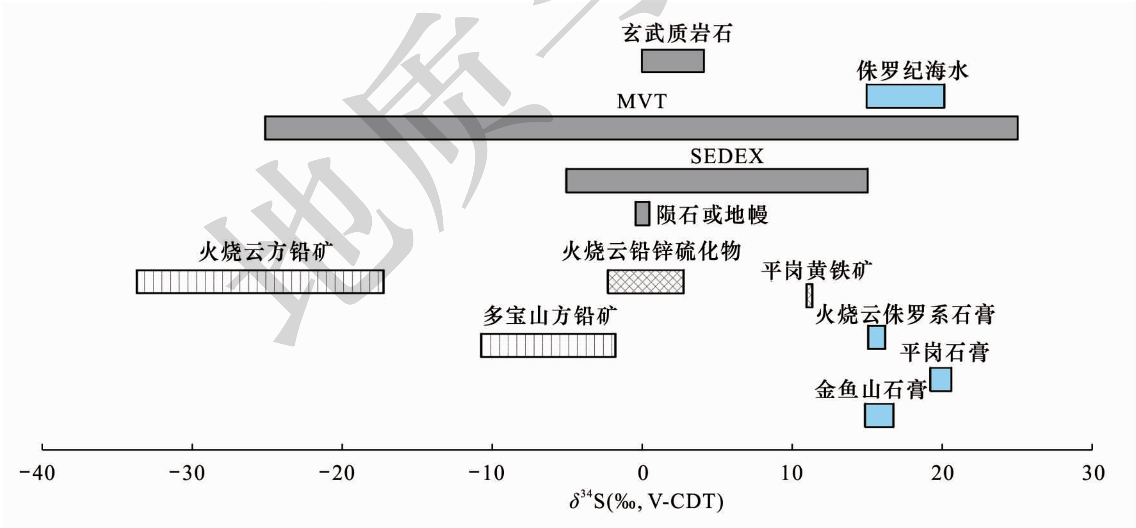

图 6　火烧云、平岗、金鱼山石膏硫同位素组成对比图解(硫同位素比值范围用矩形框表示,其中陨石或地幔数据源自 Ohmoto and Goldhaber,1997;侏罗纪海水数据源自 Kampschulte and Strauss,2004;SEDEX 和 MVT 铅锌矿数据源自 Leach et al.,2005;玄武岩数据源自 Hoefs,2009;多宝山方铅矿数据源自杜红星等,2012;火烧云铅锌硫化物数据源自 Li et al.,2019;火烧云方铅矿数据源自吴志旖等,2019)

Fig.6　Comparison of sulfur isotope compositions of gypsum in the Huoshaoyun,Pinggang and Jinyushan areas(Ranges of δ^{34}S values are shown by rectangulars. Meteorite or mantle after Ohmoto and Goldhaber (1997). Jurassic seawater data after Kampschulte and Strauss(2004). A compilation of δ^{34}S values for SEDEX and MVT lead - zinc deposits after Leach et al. (2005). Basalt data after Hoefs (2009). Duobaoshan glenite data after Du et al. (2012). Huoshaoyun lead - zinc sulfide data after Li et al. (2019). Huoshaoyun glenite data after Wu et al. (2019))

5 结论

（1）侏罗系灰岩 Sr/Ba 为 1.2～18.06，Sr/Cu 值为 10.04～201，显示其形成于干热条件下的海相咸水环境。石膏层的硫同位素值在 14.89‰～20.63‰之间，与同时期海水范围一致，表明其物质来源主要为海水。

（2）黄铁矿样品硫同位素值在 11.08‰～11.4‰之间，与侏罗系石膏层同源而与盆地内铅锌矿床硫化物不同。

（3）林济塘中生代沉积盆地内铅锌矿床的容矿地层形成于干热气候条件下的氧化海相沉积环境。

［References］

Algeo T J, Maynard J B. 2004. Trace－element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas－type cyclothems［J］. Chemical Geology, 206(3): 289－318.

Anhui Geological Survey Institute. 2005a. Wenquan geological map and description of 1∶25,000 scale (Figure I44C002001)［M］. Beijing: Geological Publishing House: 1－100 (in Chinese).

Anhui Geological Survey Institute. 2005b. Songxi geological map and description of 1∶25,000 scale (Figure I44C002002)［M］. Beijing: Geological Publishing House: 1－100 (in Chinese).

Bottrell S H, Newton R J. 2006. Reconstruction of changes in global sulfur cycling from marine sulfate isotopes［J］. Earth－Science Reviews, 75: 59－83.

Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, Huang Jing, Zhang Qirui. 2009. Redox sensitive trace elements as paleoenvironments proxies［J］. Geological Review, 55(1): 91－99 (in Chinese with English abstract).

Chen Song, Gui Herong, Sun Linhua, Liu Xianghong, Ma Yanping. 2011. Geochemical characteristics of REE in limestone of Jiudingshan Formation, northern Anhui Province and their constraint on the seawater［J］. Geology in Hina, 38(3): 664－672 (in Chinese with English abstract).

Chen Song, Gui Herong, Sun Linhua, Wang Xiao. 2013. Geochemical characteristics of trace elements in limestone of Houjiashan Formation from Suzhou, Anhui Province［J］. Journal of Mineralogy and Petrology, 33(1): 69－76 (in Chinese with English abstract).

Dill H. 1986. Metallogenesis of Early Paleozoic graptolite shales from the Graefenthal Horst (Northern Bavaria－Federal Republic of Germany)［J］. Economic Geology, 81(4): 889－903.

Dong Lianhui, Feng Jing, Liu Dequan, Tang Yanlin, Qu Xun, Wang Kezhuo, Yang Zaifeng. 2010. Research for classification of metallogenic unit of Xinjiang［J］. Xinjiang Geology, 28(1): 1－15 (in Chinese with English abstract).

Dong Lianhui, Xu Xingwang, Fan Tingbin, Qu Xun, Li Hao, Wan Jianling, An Haitao, Zhou Gang, Li Hongji, 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).

Du Hongxing, Wei Yongfeng, Xue Chunji, Qi Tianjiao, Jin Hongzhan, Lin Meiying, Li Shengwei. 2012. Geological and geochemical characteristics of Duobaoshan Pb－Zn deposit in Hetian, Xinjiang［J］. Xinjiang Geology, 28(1): 52－57 (in Chinese with English abstract).

Fan Tingbin, Li Hao, Xu Xingwang, Dong Lianhui. 2018. Research status and progress of nonsulfide zinc－lead deposit［J］. Northwestern Geology, 51(2): 147－159 (in Chinese with English abstract).

Gabo J A, Dimalanta C B, Asio M G, Queano K L, Yumul G P, Imai A. 2011. Geology and geochemistry of the clastic sequences from Northwestern Panay (Philippines): Implications for provenance and geotectonic setting［J］. Tectonophysics, 479(1): 111－119.

Hoefs J. 2009. Stable isotope geochemistry (sixth edition)［M］. Berlin: Springer: 1－35.

Holser W T, Kaplan I R. 1966. Isotope geochemistry of sedimentary sulfates［J］. Chemical Geology, 1: 93－135.

Huang Jianguo, Liu Shiwan. 1990. Stable isotope geochemistry and geological interpretation of Triassic marine carbonate rocks in easten Sichuan Basin［J］. Paleogeography of Lithofacies, 4(4): 16－25 (in Chinese with English abstract).

Huang Zuoliang, Mo Min, Zu Endong. 1996. Discovery and geological significances of anhydrite on boron deposits in Zhuanmiao area, Liaoning［J］. Geoscience, 10(3): 350－355 (in Chinese with English abstract).

Jafarzadeh M, Hosseini－Barzi M. 2008. Petrography and geochemistry of Ahwaz Sandstone Member of Asmari Formation, Zagros, Iran: Implications on provenance and tectonic setting［J］. Revista Mexicanade Ciencias Geológicas, 25(2): 247－260.

Kampschulte A, Strauss H. 2004. The sulfur isotopic evolution of Phanerozoic seawater based on the analysis of structurally substituted sulfate in carbonates［J］. Chemical Geology, 204(3): 255－286.

Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, Large R R, Garven G, Allen C R, Gatzmer J, Walters S. 2005. Sediment－hosted lead－zinc deposit: A global perspective［J］. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 561－607.

Li Hao, Xu Xingwang, Borg G, Albert G H, Dong Lianhui, Fan Tingbin, Zhou Gang, Liu Ruilin, Hong Tao, Ke Qiang, Wu Chu, Zhang Guoliang, Li Hang. 2019. Geology and geochemistry of the giant Huoshaoyun zinc－lead deposit, Karakorum Range, northwestern Tibet［J］. Ore Geology Reviews, 106: 251－272.

Li Minghui, Yan Maodu, Fang Xiaomin, Zhang Zengjie, Wang Zhengrong, Sun Shurui, Li Jiao, Liu Xiaoming. 2018. Origins of the Mid－Cretaceous evaporite deposits of the Sakhon Nakhon Basin in Laos: Evidence from the stable isotopes of halite［J］. Journal of Geochemical Exploration, 184: 209－222.

Li Rongshe, Ji Wenhua, Yang Yongcheng. 2008. Geology of Kunlun Mountains and adjacent areas［M］. Beijing: Geological Publishing House: 384－388 (in Chinese).

Liang Handong, Ding Tiping. 2004. Evidence of extremely light gypsum from the Permian－Triassic (P/T) event boundary at the Meishan section of South China［J］. Acta Geoscientica Sinica, 25(1): 33－37 (in Chinese with English abstract).

Lin Zhijia, Chen Duofu, Liu Qian. 2008. Geochemical indices for conditions of marine sediments［J］. Bulletin of Mineralogy, Petrology and

Geochemistry,27(1):72－80(in Chinese with English abstract).

Liu Gang, Zhou Dongsheng. 2007. Application of microelements analysis in identifying sedimentary enviroment—Taking Qianjiang Formation in the Jianghan Basin as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment,29(3):307－314(in Chinese with English abstract).

McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, Maynard J B. 1990. Geochemical and Nd－Sr isotopic composition of deep－sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta,54(7):2015－2050.

Ni Shanqin, Hou Quanlin, Wang Anjian, Ju Yiwen. 2010. Geochemical characteristics of carbonate rocks and its geological implications－Taking the Lower Palaeozoic carbonate rock of Beijing area as an example[J]. Acta Geoscientica Sinica,84(10):1510－1516(in Chinese with English abstract).

Niu Xinsheng, Liu Xifang, Chen Wenxi. 2014. Hydrochemical characteristic and origin for salt springs water in Dogai coring area of north Qiangtang Basin, Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 88(6): 1003－1010(in Chinese with English abstract).

Ohomoto H, Goldhaber M B. 1997. Sulphur and carbon isotopes. In: Barnes H L. (Ed.). Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 3rd edition. New York: Wiley: 517－612.

Pan G T, Wang L Q, Li R S, Yuan S H, Ji W H, Yin F G, Zhang W P, Wang B D. 2012. Tectonic evolution of the Qinghai－Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences,53:3－14.

Pan Guitang, Ding Jun, Yao Dongsheng. 2004. 1∶1500000 geological map of Qinghai－Tibet Plateau and adjacent areas[M]. Chengdu: Chengdu Map Publishing House:1－102(in Chinese).

Qian Lijun, Chen Hongde, Lin Liangbiao, Xu Shenglin, Ou Lihua. 2012. Geochemical characteristics and environmental implications of Middle Jurassic Shaximiao Formation, western margin of Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica,30(6):1061－1071(in Chinese with English abstract).

Qu Lihua, Zhou Xiaoying, Zhao Fang, Zhao Tongshou. 2019. Geochemical characteristics of limestone from the Triassic Kangnan Formation, north Qiangtang Basin(Tibet) and their constraint on the seawater[J]. Xinjiang Geology, 37(4): 479－487(in Chinese with English abstract).

Shi Zhongsheng, Chen Kaiyuan, Shi Jun, He Hujun, Liu Baojun. 2004. Sulfur isotopic composition and its geological significance of the Paleogene sulfate rock deposited in Dongpu Depression[J]. Petroleum Exporation and Development,31(6):44－46(in Chinese with English abstract).

Tabakh M E, Schreiber B C, Utha－Aroon C, Coshell L, Warren J K. 1998. Diagenetic origin of basal anhydrite in the Cretaceous Maha Sarakham salt: Khorat Plateau, NE Thailand[J]. Sedimentology,45: 579－594.

Tabakh M, Utha－Aroon C, Schreiber B C. 1999. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporites in the Khorat Plateau of northeastern Thailand[J]. Sedimentary Geology,123(1):31－62.

Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: Its compositionand evolution[M]. Oxford: Blackwell:1－311.

Wang Chunlian, Liu Chenglin, Xu Haiming, Wang Licheng, Shen Lijian. 2013. Sulfur isotopic composition of sulfate and its geological significance of Member 4 of Palaeocene Shashi Formation in Jiangling Depression of Hubei Province[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),43(3):691－703(in Chinese with English abstract).

Wang Minfang, Jiao Yangquan, Wang Zheng hai, Yang Qin, Yang Shengke. 2005. Recovery paleosalinity in sedimentary environment—An example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan－Hami Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology,26(6):719－722(in Chinese with English abstract).

Wang Shufang, Dong Dazhong, Wang Yuman, Huang Jinliang, Pu Boling. 2014. Geochemistry evaluation index of redox－sensitive elements for depositional environments of Silurian Longmaxi organic－rich shale in the south of Sichuan Basin[J]. Marin Origin Petroleum Geology, 19(3):27－34(in Chinese with English abstract).

Wu Zhiyi, Song Yucai, Hou Zengqian, Liu Yingchao, Zhuang Liangliang. 2019. The world－class Huoshaoyun nonsulfide zinc－lead deposit, Xinjiang, NW China: Formation by supergene oxidization of a Mississippi Valley－type deposit[J]. Earth Science,44(6):1987－1997(in Chinese with English abstract).

Xu Shiqi, Feng Jin, Tian Jiangtao, Zhao Tongyang. 2013. Metallogenic rules and regional predicion of lead－zinc deposits in Luoshigou of west Kunlun[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),43(4):1190－1199(in Chinese with English abstract).

Zhang Hua, Liu Chenglin, Wang Licheng, Fang Xiaomin. 2014. Characteristics of evaporites sulfur isotope from potash deposit in Thakhek Basin, Laos, and its implication for potash formation[J]. Geological Review,60(4):851－857(in Chinese with English abstract).

Zhang Tonggang, Chu Xuelei, Zhang Qirui, Feng Lianjun, Huo Weiguo. 2004. Sulphur and carbon isotope records in carbonate rocks of Yangtze Platform Dengying Formation[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(3):717－724(in Chinese with English abstract).

［附中文参考文献］

安徽地质调查院. 2005a. 温泉 1∶25 万地质图与说明书(图号 I44C002001)[M]. 北京:地质出版社:1－100.

安徽地质调查院. 2005b. 松西 1∶25 万地质图与说明书(图号 I44C002002)[M]. 北京:地质出版社:1－100.

常华进,储雪蕾,冯连君,黄晶,张启锐. 2009. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评,55(1):91－99.

陈松,桂和荣,孙林华,刘向红,马艳平. 2011. 皖北九顶山组灰岩稀土元素地球化学特征及对古海水的制约[J]. 中国地质,38(3):664－672.

陈松,桂和荣,孙林华,王晓. 2013. 安徽宿州寒武纪猴家山组灰岩微量元素地球化学特征[J]. 矿物岩石,33(1):69－76.

董连慧,冯京,刘德权,唐延龄,屈迅,王克卓,杨在峰. 2010. 新疆成矿单元划分方案研究[J]. 新疆地质,28(1):1－15.

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(1):41－50.

杜红星,魏永峰,薛春纪,齐天骄,晋红展,林美英,李胜伟. 2012. 多宝山铅锌矿床地质特征及地球化学研究[J]. 新疆地

质,28(1):52－57.

范廷宾,李昊,徐兴旺,董连慧.2018.非硫化物型锌－铅矿床研究现状及其进展[J].西北地质,51(2):147－159.

黄建国,刘世万.1990.四川盆地东部海相三叠系稳定同位素地球化学及地质解释[J].岩相古地理,4(4):16－25.

黄作良,莫珉,祖恩东.1996.辽宁砖庙矿区硼矿床硬石膏的发现及成因讨论[J].现代地质,10(3):350－355.

李荣社,计文化,杨永成.2008.昆仑山及邻区地质[M].北京:地质出版社:384－388.

梁汉东,丁悌平.2004.中国煤山剖面二叠/三叠系事件界线地层中石膏的负硫同位素异常[J].地球学报,25(1):33－37.

林治家,陈多福,刘芊.2008.海相沉积氧化还原环境的地球化学识别指标[J].矿物岩石地球化学通报,27(1):72－80.

刘刚,周东升.2007.微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J].石油实验地质,29(3):307－314.

倪善芹,侯泉林,王安建,琚宜文.2010.碳酸盐岩中锶元素地球化学特征及其指示意义——以北京下古生界碳酸盐岩为例[J].地质学报,84(10):1510－1516.

牛新生,刘喜方,陈文西.2014.西藏北羌塘盆地多格错仁地区盐泉水化学特征及其物质来源[J].地质学报,88(6):1003－1010.

潘桂棠,丁俊,姚冬生.2004.1:1500000青藏高原及邻区地质图[M].成都:成都地图出版社:1－102.

钱利军,陈洪德,林良彪,徐胜林,欧莉华.2012.四川盆地西缘地区中侏罗统沙溪庙组地球化学特征及其环境意义[J].沉积学报,30(6):1061－1071.

屈李华,周晓颖,赵芳,赵同寿.2019.羌北三叠系康南组灰岩地球化学特征及对古海水的制约[J].新疆地质,37(4):479－487.

史忠生,陈开远,史军,何胡军,柳保军.2004.东濮盐湖古近系硫酸盐硫同位素组成及地质意义[J].石油勘探与开发,31(6):44－46.

王春连,刘成林,徐海明,王立成,沈立建.2013.湖北江陵凹陷古新统沙市组四段硫酸盐硫同位素组成及其地质意义[J].吉林大学学报(地球科学版),43(3):691－703.

王敏芳,焦养泉,王正海,杨琴,杨生科.2005.沉积环境中古盐度的恢复－以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J].新疆石油地质,26(6):719－722.

王淑芳,董大忠,王玉满,黄金亮,蒲泊伶.2014.四川盆地南部志留系龙马溪组富有机质页岩沉积环境的元素地球化学判别指标[J].海相油气地质,19(3):27－34.

吴志旖,宋玉财,侯增谦,刘英超,庄亮亮.2019.新疆火烧云超大型非硫化物铅锌矿床:发生表生氧化的密西西比河谷型矿床[J].地球科学,44(6):1987－1997.

徐仕琪,冯京,田江涛,赵同阳.2013.西昆仑落石沟一带铅锌矿成矿特征及区域预测[J].吉林大学学报(地球科学版),43(4):1190－1199.

张华,刘成林,王立成,方小敏.2014.老挝他曲盆地钾盐矿床蒸发岩硫同位素特征及成钾指示意义[J].地质论评,60(4):851－857.

张同钢,储雪蕾,张启锐,冯连君,霍卫国.2004.扬子地台灯影组碳酸盐岩中的硫和碳同位素记录[J].岩石学报,20(3):717－724.

Ore－Bearing Strata of Lead－Zinc Deposits in the Linjitang Basin of Karakorum in a Marine Sedimentary Environment: Constraints from Trace Elements in Limestone and Sulfur Isotope of Gypsum in Jurassic

TANG Junlin[1,2,3], LI Hao[2], TAN Kebin[3], KE Qiang[2], DONG Lianhui[4], XU Xingwang[2], HA Yireti[3]

(1. *School of Earth and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083; 2. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029; 3. *The Sixth Geological Brigade, Xinjiang Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development, Hami, Xinjiang* 839000; 4. *Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Urumqi, Xinjiang* 830000)

Abstract: In recent years, a number of Pb－Zn deposits have been discovered in the Linjitang Mesozoic sedimentary basin of the Karakorum area, including the Huoshaoyun super－large Pb－Zn deposit. So far there is no detailed study on the sedimentary environment and metallogenic relevance for this area. This work analysed trace elements in Jurassic limestone and sulfur isotopes of Jurassic gypsum to clarify the sedimentary environment of the ore－bearing strata and metallogenic relevance. Results suggest that the elements Ba, V, Ni, Cu, Co, Th, Co and Sr and their ratios show that the limestone in this area formed in a marine environment. And the $\delta^{34}S$ value of the gypsum sulfur isotope is between 14.89‰ and 20.63‰, consistent with that of seawater in the same period. These results indicate that the ore－bearing strata of lead－zinc deposits in the Linjitang Basin of Karakorum formed in a sedimentary environment of oxidized marine facies under dry－hot climate.

Key words: limestone, gypsum, trace element, sulfur isotope, marine sediment, Linjitang Basin, Karakorum