

青海三江北段莫海拉亨铅锌矿床地质特征 及铅同位素组成的地质意义

李善平^{1,2}, 黄青华², 李小雪³, 陈静¹, 任华¹, 白宗海²

(1. 青海省地质矿产研究所, 青海省青藏高原北部地质过程与矿产资源重点实验室, 青海 西宁 810012;
2. 青海省地质调查院, 青海 西宁 810012; 3. 青海省第三地质矿产勘查院, 青海 西宁 810001)

摘 要:莫海拉亨铅锌矿地处三江北段成矿带北缘的结多弧后前陆盆地, 含矿层位主要为下石炭统杂多群碳酸盐组, 赋矿地层及北西向西断裂为重要的控矿因素, 矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿、褐铁矿等。对研究区铅同位素研究显示, 铅石矿 μ 多为 9.27~9.77, μ 平均值小于 9.58, ω 平均值为 39.99, 铅同位素组成具有正常铅演化特征; 铅石矿 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 一般为 18.51~18.92, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均为 38.64, 具稳定同位素组成的特性; 在 Zartman 铅同位素构造模式图中, 铅成矿物质具有壳幔演化的特征。由上所述, 莫海拉亨铅锌矿主要赋存于厚-巨厚层状碳酸盐岩中, 且成矿与岩浆活动无直接关系, 反映研究区 Pb 来源于上地壳含矿建造, 赋矿地层或次级断裂构造交汇部位是成矿或找矿的有利部位。

关键词: 三江北段; 莫海拉亨; Pb 锌矿床; 地质特征; 铅同位素

中图分类号: P597

文献标识码: A

文章编号: 1009-6248(2013)01-0119-11

Geologic Characteristics and Genetic Analysis of Lead-zinc Deposits of the Mohailaheng Area in the Northern Section of Lancang River, Nujiang River, and Jinsha River, Qinghai

LI Shan-ping^{1,2}, HUANG Qing-hua², LI Xiao-xue³, CHEN Jing¹, REN Hua¹, BAI Zong-hai²

(1. Qinghai Province Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources of Northern Qinghai-Tibetan Plateau, Qinghai Institute of Geology and Mineral Resources, Xining 810012, China; 2. Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, China; 3. The Third Institute of Mineral Exploration in Qinghai, Xining 810001, China)

Abstract: Mohailaheng lead-zinc deposit is located in Jieduo back-arc foreland basin of the north rim of the north of Sanjiang metallogenic belt, its main ore-bearing horizon is the lower carboniferous supported heteropoly group of carbonate group, Containing ore formation and NWW fracture are important ore-controlling factors. Ore minerals are mainly galena, sphalerite, limonite and so on. The research results of lead isotope in the study area show that lead quarries μ is 9.27-9.77, the average of μ is less than 9.58, the average of ω is 39.99, lead isotopic composition has the characteristics of normal lead evolution. Lead quarries $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is 18.51-18.92, the average of $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ is 38.64, with the characteristics of stable isotopic composition. Lead mineralizing materials have the characteristics of crust-mantle evolution in Zartman lead isotope structure. Based on the above analysis, Mohailaheng lead-zinc mine mainly

收稿日期: 2012-07-02; 修回日期: 2012-10-19

基金项目: 973 计划前期研究专项课题 (2010CB434808), 青海省科学技术厅重大科技项目 (2010-J-A1)

作者简介: 李善平 (1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域地质及矿床地质研究。E-mail: lishanping1952@163.com

occurs in thick-super thick layers of carbonate rocks, and the mineralization had no direct relation to magmatic activity, which reflected that the lead came from lead mine construction of the upper earth's crust. lead containing formation or subprime fracture intersection part are favorable met-allogenic or prospecting positions.

Key words: The north section of Sanjiang; Mohailaheng; Pb-Zn deposit; geological characteristics; lead isotope

莫海拉亨铅锌矿地处“三江”(澜沧江、怒江、金沙江)北段成矿带东北缘,主体位于北羌塘—昌都陆块北缘的结多弧后前陆盆地,北侧以可可西里—金沙江晚古生代—早中生代缝合带与巴颜喀拉三叠纪边缘前陆盆地(残留洋)相邻,南侧以斑公湖—怒江中生代缝合带与拉萨地体相望。近年来,在研究区及周边地区开展了不同程度矿产远景调查以及矿产资源评价、成矿作用等工作(侯增谦, 2008; 王召林, 2009; 田世洪, 2009),在成矿背景、控矿要素及找矿方向等方面有了进一步的认识(李善平, 2011; 李玉龙, 2011; 王树林, 2011),而在铅石矿成矿物质来源方面研究则较少;在邻区东莫扎抓铅锌矿床中,田世洪(2011)利用 Pb 同位素数据分析,认为铅成矿物质来自沉积地层。而这对进一步在该区研究区域成矿规律及找矿突破形成巨大技术瓶颈。笔者等通过对莫海拉亨铅锌矿床地质特征及铅同位素数据等分析,对莫海拉亨铅锌矿床进行地质特征及成矿物源等方面的研究,为研究区及周边地区找矿突破提供基础依据。

1 区域地质特征

“三江”北段成矿带位于青藏高原东北缘,大地构造处于欧亚大陆南缘,扬子古陆西缘,东坝—澜沧江缝合带北侧的古特提斯构造域,属特提斯巨型成矿域的重要组成部分。该带不仅经历了古生代特提斯多岛弧盆演化,而且叠加发育了喜马拉雅期碰撞造山形成的第三纪前陆盆地和走滑拉分盆地以及走滑断裂系统和逆冲推覆构造(侯增谦, 2006a);青藏高原东北缘可能发育一条上千千米长、且受新生代逆冲推覆构造控制的巨型 Pb-Zn-Cu-Ag 成矿带(侯增谦, 2008);以发育新生代大规模走滑断裂系统、逆冲推覆构造系统以及相伴产生的古近—新近纪前陆盆地为典型特征(侯增谦, 2006a);是我国最重要的有色金属成矿带之一(徐

善法, 2007; 张启明, 2007)。区域上主要出露石炭纪—第四纪地层,古生界包括下石炭统杂多群、上石炭统加麦弄群和下二叠统开心岭群。其中下石炭统杂多群碳酸盐组、下一中二叠统开心岭群杂迪考组、上三叠统结扎群是区域上主要的赋矿层位。莫海拉亨铅锌矿区矿化多集中分布于下石炭统杂多群碳酸盐岩组(C_1Z_2)中。区域内经历了长期复杂的构造运动,断裂构造十分发育,按走向分为北西西、北东和近东西向三组,各组断裂彼此交错切割,在区域上对成矿具严格的控制作用。岩浆活动强烈,印支期、燕山期、喜山期均有规模不等的岩浆活动,火山岩、侵入岩分布广泛,其展布受区域构造的控制,岩浆活动与成矿关系较为密切。

2 矿区地质特征

莫海拉亨矿区内地层严格受区域构造线的控制,呈北西—南东向展布,区内出露地层主要为早石炭世杂多群(C_1z)和晚三叠世结扎群(T_3j)(图1)。其中,下石炭统杂多群碳酸盐组(C_1z^b)是矿区内主要的赋矿层位,碳酸盐组呈北西—南东向展布,与下伏早石炭世杂多群碎屑岩组(C_1z^a)呈整合接触,与上覆晚三叠世结扎群甲丕拉组(T_3jp)呈角度不整合接触,局部呈断层接触;其岩性主要为灰白色厚层—巨厚层状灰岩夹灰黑色厚层状灰岩、少量碎屑岩及中酸性火山岩等,该套地层中灰白、灰黑色厚—巨厚层状灰岩层是区内主要赋矿层位。

矿区无区域性大断裂,均为次级断裂。按其延伸方向可划分为三组:①北西西向断裂。②北西—南东向断裂。③北东向断裂。其中以北西西向逆冲断层最为发育,是区内主干断裂,北西西向断裂沿断层带有铅锌矿化带产出,是典型的控矿构造。

褶皱构造主要以层间褶皱的形式见于早石炭世杂多群(C_1z)中。依据其力学性质及形迹特征,褶皱构造主要发生于早石炭纪杂多群碎屑岩组(C_1z^a)

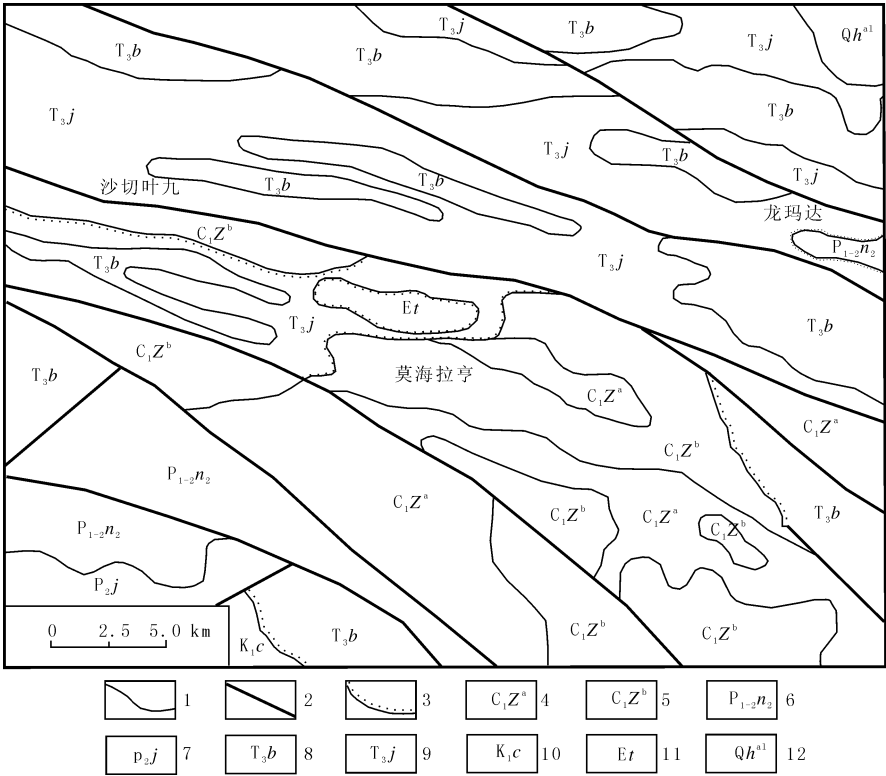


图 1 莫海拉亨矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Mohailaheng ore area

1. 地质界线；2. 断层；3. 不整合界线；4. 下石炭统杂多群碎屑岩组；5. 下石炭统杂多群碳酸盐组；6. 下一中二叠统开心岭群诺日巴尕日保组火山岩段；7. 下一中二叠统开心岭群九十多班组；8. 上三叠统结扎群波里拉组；9. 上三叠统结扎群甲丕拉组；10. 下白垩统风火山群错居日组；11. 古近系沱沱河组；12. 全新统冲积

与早石炭纪杂多群碳酸盐组 (C_1z^b) 中, 前者基本呈紧闭同斜褶皱, 为近东西向挤压应力所致; 后者褶皱构造常发生于中一中厚层状灰岩层中, 保存完好, 基本呈等轴紧密型褶皱, 规模总体上较小, 表现为近南北向挤压应力所致。

岩浆活动微弱, 喷出岩多呈透镜状或夹层零星分布于下石炭统杂多群碎屑岩组及碳酸盐组地层中, 表明区内成矿与岩浆活动并无直接联系。

刘英超、田世洪 (2009) 等利用单矿物闪锌矿和共生矿物组合闪锌矿与方铅矿 Rb-Sr 等时线方法以及单矿物萤石和共生矿物组合方解石与萤石 Sm-Nd 等时线方法测定莫海拉亨矿床的成矿时代为 31.8~33.9Ma, 平均为 33 Ma; 与研究区处于同一成矿带的东莫扎抓铅锌矿床共生矿物组合闪锌矿与黄铁矿 Sm-Nd 等时线年龄为 (34.7~35.7) Ma, 平均为 35 Ma (田世洪, 2009; 刘英超, 2009), 以及纳日贡玛铜钼矿床含矿斑岩锆石 U-Pb

年龄为 (43.3±0.5) Ma (杨志明, 2008), 成矿年龄为 (40.85±0.86) Ma (王召林, 2008), 表明莫海拉亨铅锌矿成矿时代与玉树逆冲推覆构造控制的巨型 Pb-Zn-Cu-Ag 成矿带成矿时代一致; 反映其成矿构造背景是青藏高原伴随陆内大规模走滑、逆冲推覆和大规模剪切等主要地质过程的晚碰撞期 (田世洪, 2011), 指示了莫海拉亨铅锌矿成矿作用与区域逆冲推覆构造和走滑断层密切相关。

3 矿床地质特征

通过对莫海拉亨铅锌区地质勘查及评价工作, 初步圈定矿化带 4 条, 锌 (铅) 矿体 8 条。其中 MIV、MI 矿化带最具规模, 找矿潜力巨大。

3.1 矿体特征

MIV 矿化带: 共圈出 2 条锌矿体, 其中 MIV-2 锌矿体为主矿体, 长约 1 700 m, 平均厚度 5.10

m, 呈长条带状北西—南东向展布, 局部地段集中。矿体在平面上展布形态较规则, 厚度变化较小。含矿岩石类型以黄褐色褐铁矿化灰岩为主, 呈蜂窝状, 沿蜂窝(孔洞)边缘可见细脉状铅锌矿化; 次为灰黑色铅锌矿化灰岩, 呈块状, 铅锌矿化呈星点状、团块状分布于岩石中, 局部裂隙发育处可见块状铅锌矿石。

M I 矿化带: 以锌矿体为主, 共圈定(铅) 锌矿体 5 条, 通过对 M I 矿化带进行深部工程验证, 发现了相应的铅锌矿(化) 体, 方铅矿、闪锌矿多呈细脉状、星点状、团块状分布, 含矿岩性为碎裂灰岩。其中 M I -3 锌矿体长约 3 400 m, 平均厚度 4.2 m, 呈长条带状近东西向展布, 矿体在地表展布形态较规则, 矿化较均匀。含矿岩石类型以灰黑色铅锌矿化灰岩为主, 伴有褐铁矿化灰岩产出, 局部地段可见块状铅锌矿石, 且在深部有延伸。

3.2 矿石学特征

含矿岩石类型主要为: 方铅矿(闪锌矿)-褐铁矿矿石, 黄铁矿-褐铁矿矿石, 褐铁矿矿石。

方铅矿(闪锌矿)-褐铁矿矿石: 方铅矿、闪锌矿多呈细脉状、星点状和团块状分布, 与方解石共生的方铅矿、闪锌矿多呈巨晶出现。具交代结构与残留压碎状结构, 似斑杂状构造, 矿石矿物主要有黄铁矿、褐铁矿、方铅矿、闪锌矿。褐铁矿多数呈致密状交代黄铁矿, 其间含交代残留的黄铁矿, 一部分呈土状含在脉石矿物中, 含量 13%; 黄铁矿粒径 0.002~0.07 mm, 部分呈自形或半自形粒状晶, 粒径在 0.26~0.56 mm, 受动力变质作用影响发育压碎纹, 沿裂隙被褐铁矿交代, 含量 1%; 方铅矿形态呈不规则状, 粒径在 0.008~0.37 mm, 压碎裂纹常见, 与黄铁矿无相对交代或包含现象, 含量 5%; 方铅矿颗粒细小, 沿方铅矿边缘分布, 含量 8%。脉石矿物主要为石英、方解石。

黄铁矿-褐铁矿矿石: 交代结构, 蜂窝状构造, 矿石矿物有褐铁矿、黄铁矿, 其中致密状的褐铁矿交代黄铁矿, 有些部位保留自形粒状或半自形粒状假象。黄铁矿呈交代残留状含在褐铁矿中, 粒径为 0.003~0.05 mm, 具压碎结构特征, 有些黄铁矿被风化淋滤后留下较多的孔洞, 形成蜂窝状构造, 含量 2%。褐铁矿为胶结物质成分, 含量大于

50%。脉石矿物主要为方解石。

褐铁矿矿石: 胶结结构, 蜂窝状构造, 矿石矿物以褐铁矿为主, 其多以胶结物的形式分布于脉石矿物间, 少数似显微粒状假象, 含他形粒状黄铜矿(粒径为 0.012~0.025 mm), 黄铁矿呈不规则状, 粒径约为 0.02 mm。褐铁矿含量大于 30%, 黄铜矿、黄铁矿微量。脉石矿物主要为石英和方解石。

3.3 围岩蚀变及结构构造

矿化带矿体呈似层状、透镜状及扁豆状等形态赋存于早石炭纪杂多群碳酸盐组中, 与矿化带矿体接触部位为碎裂灰岩, 岩石破碎, 裂隙发育, 蚀变强烈, 蚀变的强度、规模与铅锌品位的高低及矿体规模成正比, 与成矿作用有关的蚀变主要为硅化、碳酸盐化、白云岩化等, 局部发育萤石化及轻微重晶石化。

矿石结构包括胶状结构、他形粒状结构、球形结构、半自形、自形粒状结构和重结晶结构等; 矿石构造包括脉状、浸染状、角砾状和团块状构造等。

4 铅同位素分析

4.1 样品采集

研究区铅石矿主要在赋存于碎裂灰岩中, 方铅矿、闪锌矿多呈细脉状、星点状、团块状分布, 含矿岩性为碎裂灰岩; 样品采集主要选择局部地段块状铅锌矿石, 剥离表层后采集新鲜矿石。

4.2 分析方法及分析结果

样品经单矿物分离获得纯的硫化物单矿物(纯度>98%)。测定方法依 GB/T17672-1999《岩石中铅锶钨同位素测定方法》, 测定仪器 ISOPROBE-T 热电离质谱仪。共分析 Pb 同位素样品 14 件, 其中笔者分析样品 5 件, 选用同一成矿带且具有 MVT 型东莫扎抓铅锌矿样品 9 件, 分析结果见表 1。其中铅石矿样品 8 件, 脉石矿物 3 件, 容矿围岩 3 件; 铅同位素组成总体上较为集中, 分布范围: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.303 \sim 18.920$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.417 \sim 15.768$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.509 \sim 38.966$; 其中铅矿石样品集中分布于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.468 \sim 18.798$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.518 \sim 15.635$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.512 \sim 38.818$; 属于普通铅的范畴。

表 1 莫海拉亨铅锌矿床同位素组成表

Tab. 1 Pb isotope compositions from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

样 号	样品名称	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	资料来源
Q-1-1	黄铁矿	18.797	15.635	38.818	本文
Q-1-2	方铅矿	18.303	15.417	38.509	
Q-1	方铅矿	18.92	15.662	38.966	
Q-2	方铅矿	18.857	15.576	38.650	
Q-3	方铅矿	18.798	15.518	38.512	
TC007-08-2	黄铁矿	18.624	15.768	38.623	据田世洪， 2011
DMII-4-2A	闪锌矿	18.468	15.612	38.619	
DMII-4-4	闪锌矿	18.508	15.529	38.557	
ZK701-7	方解石	18.519	15.624	38.567	
ZK701-33	方解石	18.516	15.512	38.563	
ZK801-25	方解石	18.523	15.523	38.549	
080805-13	早石炭统（C ₁ ）灰岩	18.631	15.527	38.626	
080805-14	早石炭统（C ₁ ）灰岩	18.609	15.531	38.692	
080805-25	早石炭统（C ₁ ）灰岩	18.645	15.543	38.647	

注：本文样品由国土资源部武汉矿产资源监督检测中心测试。

Pb 同位素计算使用参数引自 Doe B R (1981)： $\lambda^{238}\text{U}=0.155\ 125\times10^{-9}\text{a}^{-1}$ ， $\lambda^{238}\text{U}=0.98\ 485\times10^{-9}\text{a}^{-1}$ ， $\lambda^{238}\text{Th}=0.49\ 475\times10^{-9}\text{a}^{-1}$ ，地球年龄值 $4.43\times10^9\text{a}$ 。

5 讨论

5.1 铅同位素组成特点

矿石铅是各种热液环境中沉淀出的不含 U、Th 的金属矿物（即矿石矿物），如方铅矿、黄铁矿等中的铅（魏菊英，1988；张理刚，1988）。吴开兴（2002）认为矿石铅组成主要受源区的初始铅、U/Pb、Th/U、即 $\mu\ (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 、 $\nu\ (^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 、 $\omega\ (^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb})$ 、 $\kappa\ (\text{Th}/\text{U})$ 及形成时间等因素的制约，而不受形成后所处地球化学环境的影响。铅同位素组成是一种非常有用的地球化学示踪体系，同时作为矿质来源研究的一种有效手段，已广泛应用于金属甚至非金属矿床（Stacey J S, 1983）。根据路远发（2004）的 GeoKit 程序进行计算的研究区铅同位素参数表（表 2）中显示， $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 为 1.18 11~1.211 4，铅石矿多集中为 1.191 8~1.211 4。崔彬（1996）认为大多数层控矿床的铅同位素组成为正常铅，具有均一和较高的 μ 值（ μ 多集中在 9~11）以及壳幔混合源的演化特征；异常铅具有更高的 μ 值（ $\mu=10.25\sim11$ ）和同位素组成不同的两种以上铅混合演化的特

征；混合铅以正常铅为主并有少量异常铅的混入，反映了层控矿床的多来源、多阶段、多成因的特征，具有较低的 μ 值（ $\mu=8.25\sim10$ ）和多阶段演化之特征。陈好寿（1981）认为正常铅是同生或成岩时的铅，计算的模式年龄与围岩一致，表明最初属同生沉积，所以正常型铅一般为沉积-弱改造型层控矿床的特征；混合型或异常型铅代表沉积-强改造型或后成型层控矿床。研究区莫海拉亨铅锌矿区 $\mu\ (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})=9.14\sim9.77$ ，铅石矿 $\mu\ (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 多为 9.27~9.77，平均为 9.42，所有样品 μ 值均小于 10，研究区铅同位素不具有异常铅及混合铅的特征，显示莫海拉亨铅锌矿铅同位素组成具有正常铅的特征。

吴开兴（2002）认为同一时代地质体的 $\mu\ (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 与 $\nu\ (^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ 可以变化，这可能与 U 的丢失、加入密切相关。研究区 $\omega\ (^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb})=34.08\sim37.68$ ，铅石矿 ω 多数为 35.37~37.68，平均 35.99； $V_1=51.55\sim75.88$ ，铅石矿 V_1 值变化范围相对较大，多集中于 55.52~75.56 之间； $V_2=41.29\sim69.32$ ，铅石矿多在 48.51~66.85。将研究区铅同位素采用单阶段铅演化模式进行计算的模式年龄偏小，多数为负值，暗示研究区铅锌矿床铅具有壳幔混合源的演化特征。将研究区 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 数值投影于 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解（Zartman R E et al., 1981.）中（图 2），显示铅石

表 2 莫海拉亨铅锌矿区铅同位素参数表

Tab. 2 Pb isotope Parameter table from the Mohailaheng Pb-Zn deposit

样 号	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	t (Ma)	μ	ω	Th/U	V ₁	V ₂	△α	△β	△γ
Q-1-1	1.1919	-38.5	9.14	35.37	3.75	51.55	41.29	60.04	6.61	27.95
Q-1-2	1.1976	-26.8	9.47	36.6	3.74	66.29	57.03	77.67	18.48	35.72
Q-1	1.2080	-128.6	9.54	36.49	3.7	75.56	66.85	90.17	21.41	39.91
Q-2	1.2106	-197.8	9.38	34.82	3.59	66.39	65.33	86.54	15.8	31.47
Q-3	1.2114	-233.2	9.27	34.08	3.56	61.59	62.68	83.14	12.02	27.79
TC007-08-2	1.1811	219.5	9.77	37.68	3.73	75.88	69.32	90.09	29.24	40.31
DMII-4-2A	1.1829	139.9	9.48	37.05	3.78	65.88	54.23	74.73	18.71	36.7
DMII-4-4	1.1918	3.1	9.32	35.82	3.72	55.52	48.51	66.67	12.75	29.12
ZK701-7	1.1853	117.8	9.5	36.68	3.74	64.31	56.5	75.99	19.4	34.34
ZK701-33	1.1937	-25.5	9.28	35.64	3.72	55.65	48.3	66.9	11.63	29.15
ZK801-25	1.1933	-16.1	9.3	35.65	3.71	55.49	49.05	67.3	12.35	28.78
080805-13	1.1999	-92.6	9.3	35.43	3.69	60.08	53.53	73.52	12.61	30.83
080805-14	1.1982	-70.5	9.31	35.83	3.72	61.1	51.82	72.25	12.87	32.59
080805-25	1.1996	-81.6	9.33	35.58	3.69	60.94	54.34	74.33	13.65	31.39

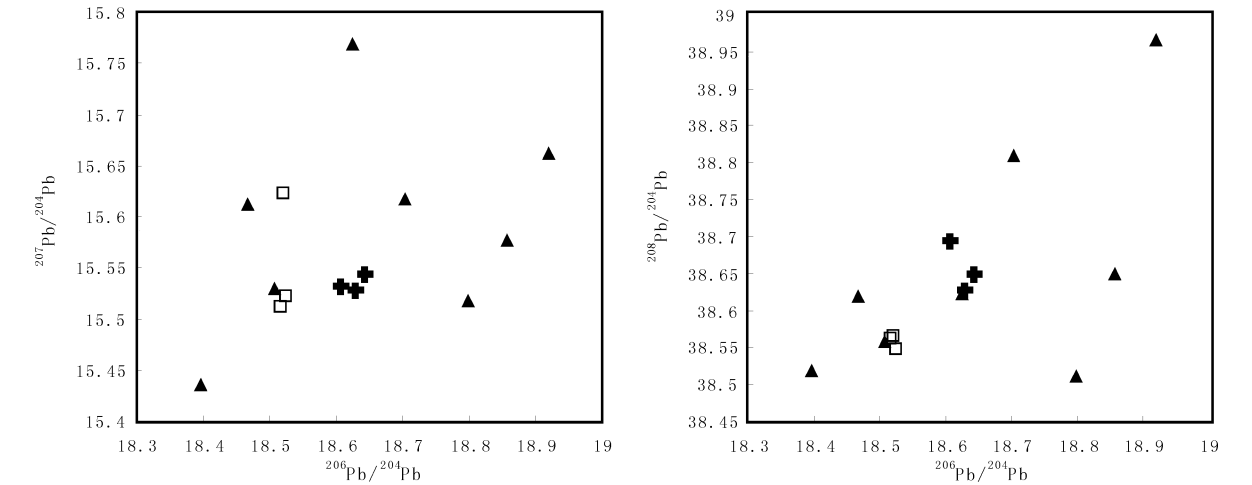


图 2 研究区铅同位素组成图解

Fig. 2 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb diagram for the study area

▲. 铅石矿; □. 方解石脉; +. 灰岩(下同)

矿线性关系不甚明显。

5.2 成矿物质来源

通常认为，铅同位素源区特征值 μ 值的变化能提供地质体经历地质作用的信息，反映铅的来源（吴开兴，2002）。朱炳泉（1998）认为具有低 μ 值（小于 9.58 或 9.74）的铅来自下部地壳或上地幔，或来自其他构造单元中，基本上处于封闭的体系，矿床的形成一般与岩浆活动关系密切，而且在成矿过程中，基本上没有受到地壳物质的混染。具有高 μ 值（9.58 或 9.74）的铅或位于零等时线右侧的放射成因铅来自铀、钍相对富集的上部地壳岩石（Zartman R E, Doe B R. 1981；朱炳泉，1998；吴

开兴，2002）。高 μ 值铅一般来自上地壳，低 μ 值和低 ω 值是上地幔源，低 μ 值和高 ω 值则是典型的下地壳来源（Doe B R，Zartman R E. 1979；Kamona A F，1999）。研究区莫海拉亨铅锌矿区 μ （²³⁸U/²⁰⁴Pb）= 9.14 ~ 9.77，其中铅石矿 μ （²³⁸U/²⁰⁴Pb）多为 9.27 ~ 9.77，平均为 9.42；容矿灰岩 μ 平均为 9.31，方解石脉 μ 平均为 9.36；研究区 ω 值平均为 35.91，其中铅石矿平均为 39.99，容矿灰岩 μ 平均为，35.61，方解石脉 μ 平均为 35.99；而莫海拉亨矿区内主要赋矿层位为下石炭统杂多群碳酸盐组灰白、灰黑色厚-巨厚层状灰岩，岩浆活动不发育，喷出岩多呈透镜状或夹层

零星分布于下石炭统杂多群碎屑岩组及碳酸盐组地层中，表明区内成矿与岩浆活动并无直接联系。由此，研究区铅可能与上地壳沉积地层密切相关。

Zortman R E (1981) 根据下地壳麻粒岩相低 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值和低 U/Pb 值，以及较高的 $^{203}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 Th/U 值，提出“铅构造”模式，较好地说明了下地壳、上地幔、上地壳与造山带来源成矿作用的 Pb 同位素组成。Stacey J S (1983) 认为，在使用铅构造模式示踪时，投影点落在造山带增长线上方的矿石铅必然包含上地壳成分，而投影点位于造山带增长线下方的矿石铅则必

定源于地幔或下地壳；投影点位于造山带增长线附近，表明各储库混合源。在铅同位素构造模式 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解 (Zartman R E et al., 1981.) 中 (图 3-a)，研究区多数样品投影于下地幔和造山带之间，少数样品投点于造山带和上地壳间，且靠近造山带；在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解 (Zartman R E et al., 1981.) 中 (图 3-b)，多数点投影于造山带与下地壳间，且整体靠近造山带，少数样品位于造山带与上地壳间。结合研究区区域地质背景、矿区地质特征、含矿建造、矿体岩石地球化学及矿区岩浆岩活动等特征，表明研究区铅石矿

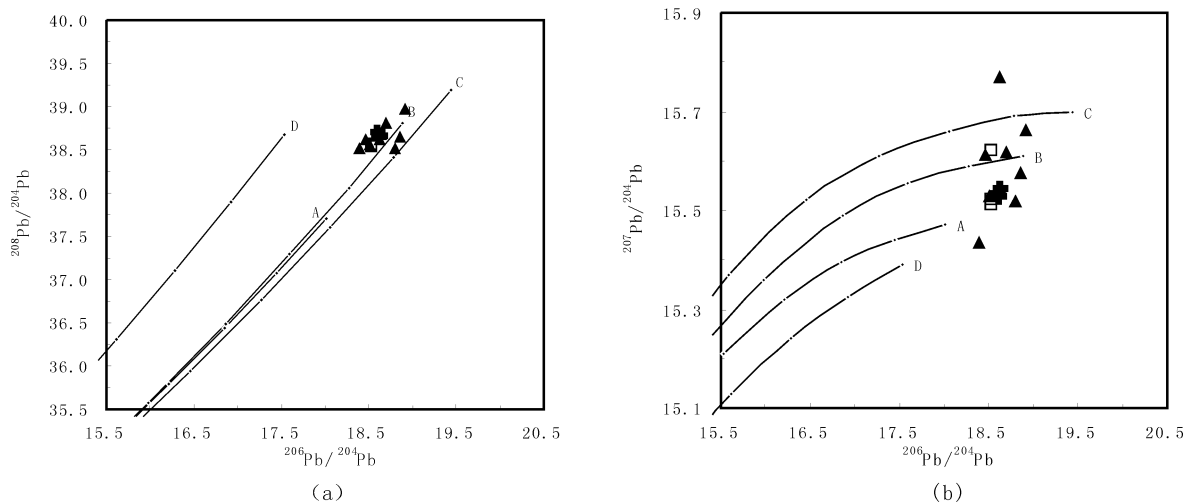


图 3 研究区 Pb 同位素组成图

Fig. 3 Plumbotectonics model of Lead isotopes for the study area

A. 地幔演化曲线；B. 造山带演化曲线；C. 上地壳演化曲线；D. 下地壳演化曲线

更多具有沉积地层来源的特性。

研究区铅同位素矢量特征值 V_1 、 V_2 见表 2， V_1 平均值为 62.59， V_2 平均为 55.63；铅石矿 V_1 、 V_2 平均值相对较高，分别为 64.83、58.16。在铅同位素矢量特征值 V_1 - V_2 的投点图 (朱炳泉, 1998) 中 (图 4)，多数点投于华南区与北疆区的界线处。

朱炳泉 (1998) 认为钍铅的变化以及钍铅与铀铅同位素组成的相互关系对于地质过程与物质来源能提供更丰富的信息，为突出这种变化关系，将 Pb 同位素表示成与同时代地幔的相对偏差，直观的用 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解表示。该图解消除了时间因素的影响，理论上比全球性的演化模式具有更好的示踪意义 (郑明华, 2001)。将测试数据通过

路远发 (2004) Geokit 软件计算，得到莫海拉亨铅锌矿床矿石与同时代地幔的相对偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ (表 2)。将研究区样品投影于 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解 (朱炳泉, 1998) (图 5) 中，多数样品点投于造山带铅范围内，且靠近上地壳与地幔混合的俯冲带铅岩浆作用区，部分点落在上地壳与地幔混合的俯冲带铅岩浆作用范围内。刘英超 (2008) 根据同一成矿带具有 MVT 型东莫扎抓铅锌矿区中 Pb 同位素，确定铅锌矿中的 Pb 来自于地壳；莫海拉亨铅锌矿床地质特征未显示成矿和岩浆活动相关的证据 (刘英超, 2008；田世洪, 2011)。因此，莫海拉亨铅锌矿床中的铅成矿物质明显与岩浆活动没有直接关系，反映与上地壳成矿作用紧密相关，铅石矿物质可能来源于上地壳沉积地层。

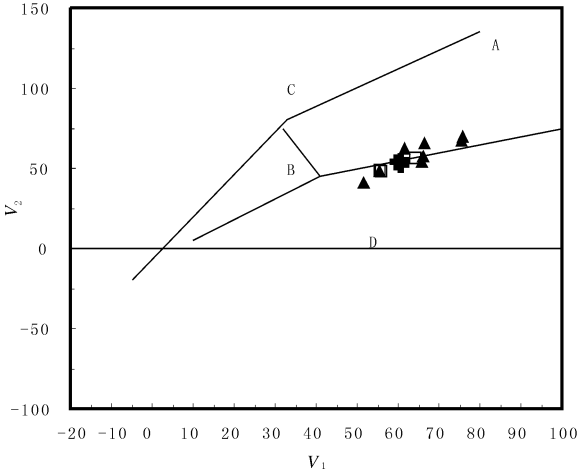


图 4 铅同位素矢量特征值 V_1 - V_2 图

Fig. 4 Diagram of characteristic V_1 - V_2 lead isotopic for the study area
A. 华南; B. 扬子; C. 华北; D. 北疆

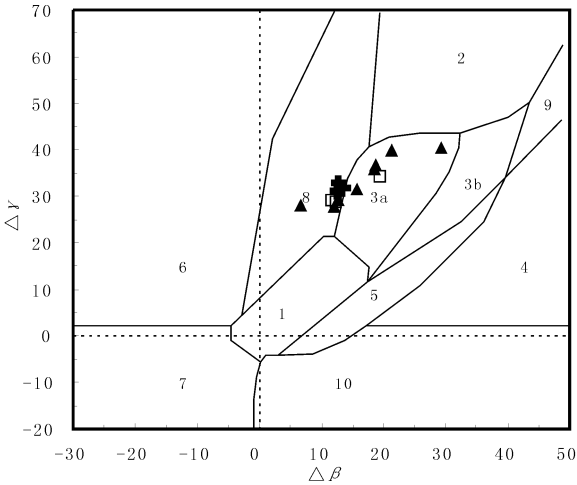


图 5 铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图

Fig. 5 Diagram of $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ lead isotopic for the study area
1. 地幔源铅; 2. 上地壳铅; 3. 上地壳与地幔混合的俯冲带铅 (3a. 岩浆作用; 3b. 沉积作用); 4. 化学沉积型铅; 5. 海底热水作用铅; 6. 中深变质作用铅; 7. 深变质下地壳铅; 8. 造山带铅; 9. 古老页岩上地壳铅; 10. 退变质铅

卢武长 (1986) 对层状和层控矿床研究认为, 铅同位素组成主要有三种类型: ①铅同位素组成稳定, 放射性成因铅的含量很低, 模式年龄和围岩的年龄基本一致。②放射性成因铅的含量很高, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.8$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 18.8$, 给出了未来模式年龄。③含有少量的放射性成因铅, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值接近于或高于远洋沉积物的铅同位素组成, 这类矿床具有上地壳铅的特征, 但有缺铀的下地壳

铅的补偿。研究区 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 一般为 $18.51 \sim 18.92$, 平均为 18.62 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均为 38.64 ; 暗示研究区铅锌矿床铅同位素组成稳定, 放射性成因铅的含量相对较低。而将研究区样品投点于 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境判别图 (R E Zartman et al., 1981) 中 (图 6), 多数点投于造山带及下地壳叠合区中, 部分铅投于上地壳区中, 而研究区铅锌矿床多赋存于巨厚层状灰岩中, 岩浆活动微弱, 铅同位素组成稳定, 表明铅石矿具有上地壳的演化特征。

由此, 研究区铅锌矿床多赋存于巨厚层状灰岩中, 铅成矿物质明显与岩浆活动无直接关系, 铅同位素组成稳定, 反映铅石矿物质可能来源于上地壳沉积地层。

5.3 Pb 同位素组成的地质意义

矿石 Pb 同位素组成变化不仅与地壳、地幔演化时间序列和成矿时代有关, 而且明显表现出区域性特征, 并与矿种和矿床类型密切相关, 在研究成矿规律、指导找矿与矿床评价上, 可能存在更重要的潜在应用价值 (Zhu Bingquan, 1984)。莫海拉亨铅锌矿床铅同位素组成显示, 铅具有正常铅的演化特征; 矿石矿 Pb 同位素 μ ($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$) 多为 $9.27 \sim 9.77$, 平均为 9.42 ; ω 值平均为 39.99 , μ 平均值均小于 9.58 , $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 一般为 $18.51 \sim 18.92$, 平均为 18.62 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均为 38.64 , 具稳定同位素组成的特性。在 Zartman 铅同位素构造模式图中, 多数矿石铅落在造山带铅范围内, 且靠近上地壳与地幔混合的俯冲带铅岩浆作用区, 部分点落在上地壳与地幔混合的俯冲带铅岩浆作用范围内; 结合研究区区域地质背景、矿区地质特征、含矿建造、矿体岩石地球化学及矿区岩浆岩活动等特征, 表明研究铅石矿更多具有沉积地层来源的特性。

研究区周缘地表水在溶滤或渗滤基岩山区岩石中有用矿质元素后, 在重力作用下, 向盆地边缘或中心部位运移, 在运移至相对较软弱的地层层理或裂隙间, 将不断溶蚀、渗滤、交代地层中有益矿质元素, 并在构造适宜部位富集、沉淀, 形成层状、似层状或透镜状、脉状、不规则状等不同形态的矿体或矿脉; 在局部围岩中形成矿化蚀变带。另外, 在重力作用下, 地表水及地下水沿矿区内次级断裂或裂隙下渗、入渗至地壳一定部位, 在下渗过程中

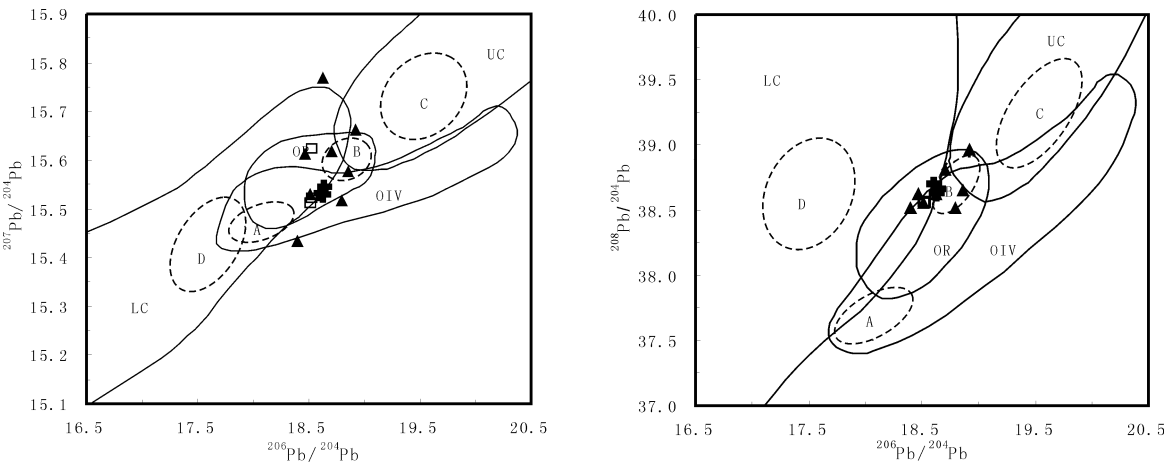


图 6 Pb 同位素构造环境判别图

Fig. 6 Discrimination diagrams of lead isotope tectonic environment for the study area
LC. 下地壳; UC. 上地壳; OIV. 洋岛火山岩; OR. 造山带; A, B, C, D 分别为各区域中样品相对集中区

渗滤、交代沉积岩层中的有用矿质元素，形成成矿流体，在上覆岩层温度、压力减弱作用下，成矿流体在浮力作用下向上运移，并在构造、地层适宜部位沉淀、富集成矿。第三，研究区成矿构造背景是青藏高原伴随陆内大规模走滑、逆冲推覆和大规模剪切等主要地质过程的晚碰撞期（田世洪，2011），其成矿作用与区域逆冲推覆构造和走滑断层密切相关。矿区内北西西、北西—南东、北东向次级断裂交汇部位，具有寻找铅锌矿的有利部位。

综上所述，莫海拉亨铅锌矿铅石矿矿质来源于上地壳含矿建造沉积地层，携矿流体在运移过程中，通过渗滤、交代等作用，在次级断裂构造交汇或地层适宜部位富集、沉淀成矿。

6 结语

(1) 莫海拉亨铅锌矿区内出露地层主要为早石炭世杂多群 (C_1z) 和晚三叠世结扎群 (T_3j)，其中下石炭统杂多群碳酸盐组 (C_1z^b) 灰白、灰黑色厚-巨厚层状灰岩层是矿区内主要的赋矿层位；初步圈定矿化带 4 条，锌（铅）矿体 8 条，其中 MIV、MI 矿化带最具规模，找矿潜力巨大。

(2) 矿区内 $\mu = 9.14 \sim 9.77$ ，铅石矿 μ 多为 $9.27 \sim 9.77$ ， μ 平均值均小于 9.58， ω 值平均为 39.99，Pb 同位素组成具有正常铅演化特征； $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 一般为 $18.51 \sim 18.92$ ， $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均

为 38.64，Pb 同位素组成稳定；铅石矿具上地壳演化的特征。

(3) 在 Zartman 铅同位素构造模式图中，铅成矿物质具有壳幔演化的特征，而研究区铅锌矿主要赋存于巨厚层状碳酸盐岩中，且矿区地质特征显示成矿和岩浆活动无直接关系。反映莫海拉亨铅锌矿铅石矿物质来源于上地壳含矿建造沉积地层，厚-巨厚层状碳酸盐岩赋矿地层及次级断裂构造交汇部位是找矿或成矿的有利部位。

参考文献 (References):

侯增谦, 宋玉财, 李政, 等. 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, 2008, 27 (2): 421-441.

Hou Z Q, Song Y C, Li Z, et al. Thrust-controlled, sediment-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibet anorogenic belt: Geological features and tectonic model [J]. Mineral Deposits, 2008, 27 (2): 421-441 (in Chinese with English abstract).

王召林, 侯增谦, 杨竹森, 等. 青海杂多地区新生代构造特征与两种矿床的关系 [J]. 矿床地质, 2009, 28: 157-169.

Wang Z L, Hou Z Q, Yang Z S, et al. Structural characteristics of Cenozoic strata and relationship between two types of ore deposits in Zaduo area,

- southern Qinghai [J]. Mineral Deposits, 2009, 28 (2): 157-169 (in Chinese with English abstract).
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等. 玉树地区东莫扎扎和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28 (6): 747-758.
- Tian S H, Yang Z S, Hou Z Q, et al. Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of Dongmozhaizhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits in Yushu area, southern Qinghai and their geological implications [J]. Mineral Deposits, 2009, 28 (6): 747-758 (in Chinese with English abstract).
- 李善平, 李永祥, 李怀毅, 等. 青海三江北段莫海拉亨铅锌矿床地质特征及找矿前景[J]. 青海大学学报 (自然科学版), 2011, 29 (3): 41-46.
- Li S P, Li Y X, Li H Y, et al. Geological Characteristics and Prospecting of Mohailaheng lead-zinc deposit in Sanjiang area, Qinghai [J]. Qinghai University (Natural Science), 2011, 29 (3): 41-46 (in Chinese with English abstract).
- 李玉龙, 夏楚林, 鲁海峰, 等. 青海莫海拉亨铅锌矿床地质特征及找矿前景分析[J]. 甘肃科技, 2011, 27 (1): 35-38.
- Li Y L, Xia C L, Lu H F, et al. Geological characteristics and ore prospects of the Zinc-lead deposit in Mohailaheng area [J]. Gansu Science and Technology, 2011, 27 (1): 35-38 (in Chinese with English abstract).
- 王树林, 李玉龙. 青海莫海拉亨铅锌矿床地质特征及找矿远景初探[J]. 青海科技, 2011, 2: 26-30.
- Wang S L, Li Y L. Geological characteristics and ore prospects of the Zinc-lead deposit in Mohailaheng area [J]. Qinghai Science and Technology, 2011, 2: 26-30 (in Chinese with English abstract).
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等. 青海玉树东莫扎扎和莫海拉亨铅锌矿床与逆冲推覆构造关系的确定——来自粗晶方解石 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30 (3): 475-489.
- Tian S H, Yang Z S, Hou Z Q, et al. Confirmation of connection between Dongmozhaizhua and Mohailaheng Pb-Zn ore deposits and thrust nappe system in Yushu area, Southern Qinghai: Evidence from Rb-Sr and Sm-Nd isochron ages of macrocrystalline calcite [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30 (3): 475-489 (in Chinese with English abstract).
- 侯增谦, 莫宣学, 杨志明, 等. 青藏高原碰撞造山带成矿作用: 构造背景、时空分布和主要类型[J]. 中国地质, 2006a, 33: 348-359.
- Hou Z Q, Mo X X, Yang Z M, et al. The qinghai-tibet plateau collosion orogenic belt mineralization: tectonic background, time and space distribution and the main types [J]. China Geology, 2006 a, 33: 34 8-359 (in Chinese with English abstract).
- 徐善法, 袁志亮, 陈建平. 三江北段地球化学特征研究[J]. 物探与化探, 2007, 31 (2): 199-206.
- Xu S F, Yuan Z L, Chen J P. Geochemical study of the Sanjiang north [J]. Geophysical Exploration and Geochemical Exploration, 2007, 31 (2): 199-206 (in Chinese with English abstract).
- 张启明, 陈建平, 齐先茂. 基于 GIS 的证据权法在三江北段铜多金属成矿预测中的应用[J]. 沉积与特提斯地质, 2007, 27 (2): 106-113.
- Zhang Q M, Chen J P, Qi X M. Application of brass ore-forming metal based on GIS of the evidence weight method in the Sanjiang north area [J]. Deposits and Tethys Geology, 2007, 27 (2): 106-113 (in Chinese with English abstract).
- 刘英超. 青海杂多东莫扎扎-莫海拉亨铅锌成矿作用 (硕士学位论文) [D]. 北京: 中国地质科学院. 2009, 50-124.
- Liu Y C. Mineralization of Pb-Zn in Dongmozhaizhua and Mohailaheng Pb-Zn deposits, Zaduo area, Qinghai Province (Master Degree Thesis) [D]. Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 2009, 50-124 (in Chinese with English summary).
- 杨志明, 侯增谦, 杨竹森, 等. 青海纳日贡玛斑岩钼 (铜) 矿床: 岩石成因及构造控制[J]. 岩石学报, 2008, 24 (3): 489-502.
- Yang Z M, Hou Z Q, Yang Z S, et al. Genesis of porphyries and tectonic control on the Narigongma porphyry Mo-Cu deposit, southern Qinghai [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (3): 489-502 (in Chinese with English abstract).
- 王召林, 杨志明, 杨竹森, 等. 纳日贡玛斑岩铜钼矿床: 玉龙铜矿带的北延——来自辉钼矿 Re-Os 同位素年龄的证据[J]. 岩石学报, 2008, 24 (3): 503-510.
- Wang Z L, Yang Z M, Yang Z S, et al. Narigongma porphyry molybdenite copper deposit, northern extension of Yulong copper belt: evidence from the age of Re-Os isotope [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24 (3): 503-510 (in Chinese with English abstract).
- 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33 (5): 459-464.
- Lu Y F. GeoKit: A geochemical toolkit for Microsoft excel

- [J]. *Geochimica*, 2004, 33 (5): 459-464 (in Chinese with English abstract) .
- 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- Wei J Y, Wang G Y. Isotope geochemical [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1988 (in Chinese with English abstract) .
- 张理刚. 长石铅和矿石铅同位素组成及其地质意义[J]. 矿床地质, 1988, 7 (2): 55-64.
- Zhang L G. Isotopic composition and geological significance of feldspar lead and ore lead [J]. *Mineral deposits*, 1988, 7 (2): 55-64 (in Chinese with English abstract) .
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30 (3): 73-82.
- Wu K X, Hu R Z, Bi X W, et al. Summarize on source of ore-forming materials for ore lead isotope tracer [J]. *Geological and Geochemical*, 2002, 30 (3): 73-82 (in Chinese with English abstract) .
- 崔彬. 简论中国层控铜铅锌矿床的稳定同位素地球化学特征[J]. 现代地质, 1996, 10 (2): 231-235.
- Cui B. Discusses such issues as the control of the Copper, lead, zinc deposits of stable isotope geochemical characteristics [J]. *Modern Geology*, 1996, 10 (2): 231-235 (in Chinese with English abstract) .
- 陈好寿. 我国层控矿床的铅同位素特征及其矿床成因意义[J]. 科学通报, 1981, 10: 23-28.
- Chen H S. lead isotope characteristics and the genesis meaning of stratabound deposits in our country [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1981, 10: 23-28 (in Chinese with English abstract) .
- 朱炳泉, 李献华, 戴谟, 等. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- Zhu B Q, Li X H, Dai T M, et al. Theory and application in the Earth science isotope theory system—crust-mantle evolution in mainland China [M]. Science Press, Beijing, 1998 (in Chinese with English abstract) .
- 郑明华, 张寿庭, 刘家军, 等. 西南天山穆龙套型金矿床产出地质背景与成矿机制[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- Zheng M H, Zhang S T, Liu G J, et al. Geological background and ore-forming mechanism output of Molongtao type gold deposits in the southwest Tianshan area [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2001 (in Chinese with English abstract) .
- 卢武长. 稳定同位素地球化学[M]. 成都: 成都地质学院, 1986.
- Lu W C. Stable Isotope Geochemistry [M]. Chengdu Institute of Geology, Chengdu, 1986 (in Chinese with English abstract) .
- Zhu Bingquan. Features of pb isotopic composition of ores and evolution of continental crust of China [J]. *Scientia Sinica*, 1984, 27 (3): 635-646.
- Stacey J S. Lead-isotope compositions of diverse igneous rocks and ore deposits from southwestern New Mexico and their implications for early Proterozoic crustal evolution in the western United States [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94: 43-57.
- Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—The model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75 (2): 135-162.
- Doe B R, Zartman R E. Plumbotectonics the Phanerozoic [A]. Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Ed [M]. Wiley Interscience. Chap 2. 1979, 22-70.
- Kamona A F, Lévêque J, Friedrich G, et al. Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb-Zn-Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damaran-Lufilian Fold Belt of Central Africa [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34: 273-283.