

文章编号: 0258-7106(2013)01-0177-10

青海肯德可克铁多金属矿区年代学及硫同位素特征*

肖 晔¹, 丰成友¹, 刘建楠¹, 于 淼², 周建厚¹, 李大新¹, 赵一鸣¹

(1 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;
2 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘 要 肯德可克铁多金属矿床位于柴达木盆地西南缘、青海祁漫塔格地区的狼牙山-景忍一带, 与毗邻的野马泉、杂林格铁多金属矿床具有相似的地质构造背景、成矿地质条件和矿化特征。利用锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年技术, 获得肯德可克铁多金属矿区二长花岗岩的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(229.5±0.5) Ma($n=19$, MSWD=0.02), 厘定其形成时代为晚三叠世, 二长花岗岩锆石 Hf 同位素组成较均一, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 0.8~5.9, 金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成(-2.0‰~+1.5‰) 接近于零值, 平均为 0.43‰, 表明为岩浆来源。结合区域最新研究资料, 认为肯德可克铁多金属矿床为与印支期岩浆侵入活动有关的矽卡岩型矿床。

关键词 地球化学; 矽卡岩型铁多金属矿; 锆石 U-Pb 测年; 同位素; 肯德可克; 祁漫塔格; 东昆仑
中图分类号 P618.31 文献标志码 A

LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating and sulfur isotope characteristics of Kendekeke Fe-polymetallic deposit, Qinghai Province

XIAO Ye¹, FENG ChengYou¹, LIU JianNan¹, YU Miao², ZHOU JianHou¹, LI DaXin¹ and ZHAO YiMing¹
(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China)

Abstract

The Kendekeke iron ore deposit is located in the southwestern margin of Qaidam Basin, lying in Langyashan-Jingren area of Qimantag. It is similar to adjacent Yemaquan and Galinge iron polymetallic deposits in geotectonic background, ore-forming conditions and mineralization characteristics. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating reveals that the age of the monzonite granite from the Kendekeke iron deposit is (229.51±0.48) Ma ($n=19$, MSWD=0.02), suggesting Late Triassic. $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ varies from 0.8 to 5.9, the $\delta^{34}\text{S}$ component (-2.0‰~+1.5‰) of the sulfide is close to zero, implying that the source was magma. Combined with filed materials, the Kendekeke iron polymetallic deposit is thought to be a skarn deposit related to the intrusion of Indosinian magma.

Key words: geochemistry, skarn-type Fe-polymetallic deposit, U-Pb dating of zircon, isotopes, Kendekeke, Qimantag, East Kunlun

地处柴达木盆地西南缘的青海祁漫塔格地区是东昆仑造山带的重要组成部分, 近年来, 随着国土资源大调查专项、青藏专项、地质矿产调查评价专项等的相继开展和研究工作不断深入, 该区找矿工作取

* 本研究得到中国地质调查局地质调查项目(编号: 1212011085528, 1212011120135, 1212011121089) 国家自然科学基金项目(批准号: 41172076) 和中国地质调查局青年地质英才计划(201112) 的联合资助

第一作者简介 肖 晔, 男, 1981年生, 实习研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: xiaoye11cn@163.com.

收稿日期 2012-05-20; 改回日期 2012-12-31。张绮玲编辑。

得较大突破,尤其是发现了一系列与印支期花岗质岩浆侵入活动有关的具有重要经济价值的大中型矽卡岩型铁铜多金属矿床,如卡而却卡(丰成友等,2009;李东生等,2010;李大新等,2011)、虎头崖(丰成友等,2011;马圣钊等,2012)、野马泉(张爱奎等,2010)、尕林格(陈世顺等,2009;祁俊霞等,2010)、四角羊(李洪普等,2010)、它温查汉(曹德智等,2012)等(图1)。相对而言,肯德可克铁多金属矿床发现较早,其位于青海省西部格尔木市以西340 km处的狼牙山-景忍一带,现由青海庆华矿业有限公司开发。对其成因,伊有昌等(2006)提出属热水喷流沉积(改造)型铁铅锌-钴铋金多金属矿床;潘彤(2008)通过对钴金铋含矿建造中硅质岩的成因研究,认为是火山喷流热水沉积成因。笔者野外调查发现,矿区侵

入岩浆活动强烈,铁多金属矿体为典型的矽卡岩矿石,与相邻的野马泉、尕林格铁多金属矿床具有相同的成矿地质条件和矿化特征。为此,笔者开展了与矽卡岩型铁矿床有关的二长花岗岩的锆石 U-Pb 定年及矿石矿物硫同位素研究,进一步证明了铁多金属矿床与印支期花岗质岩浆作用密切相关的事实。

1 矿床地质

1.1 地层

矿区主要出露古生代地层(图2)。早古生代,在前寒武纪结晶基底基础上发生强烈伸展作用,形成厚逾1000 m的奥陶系-志留系滩间山群地层,分布在矿区中北部,自下至上可分为3层:第一层为大理

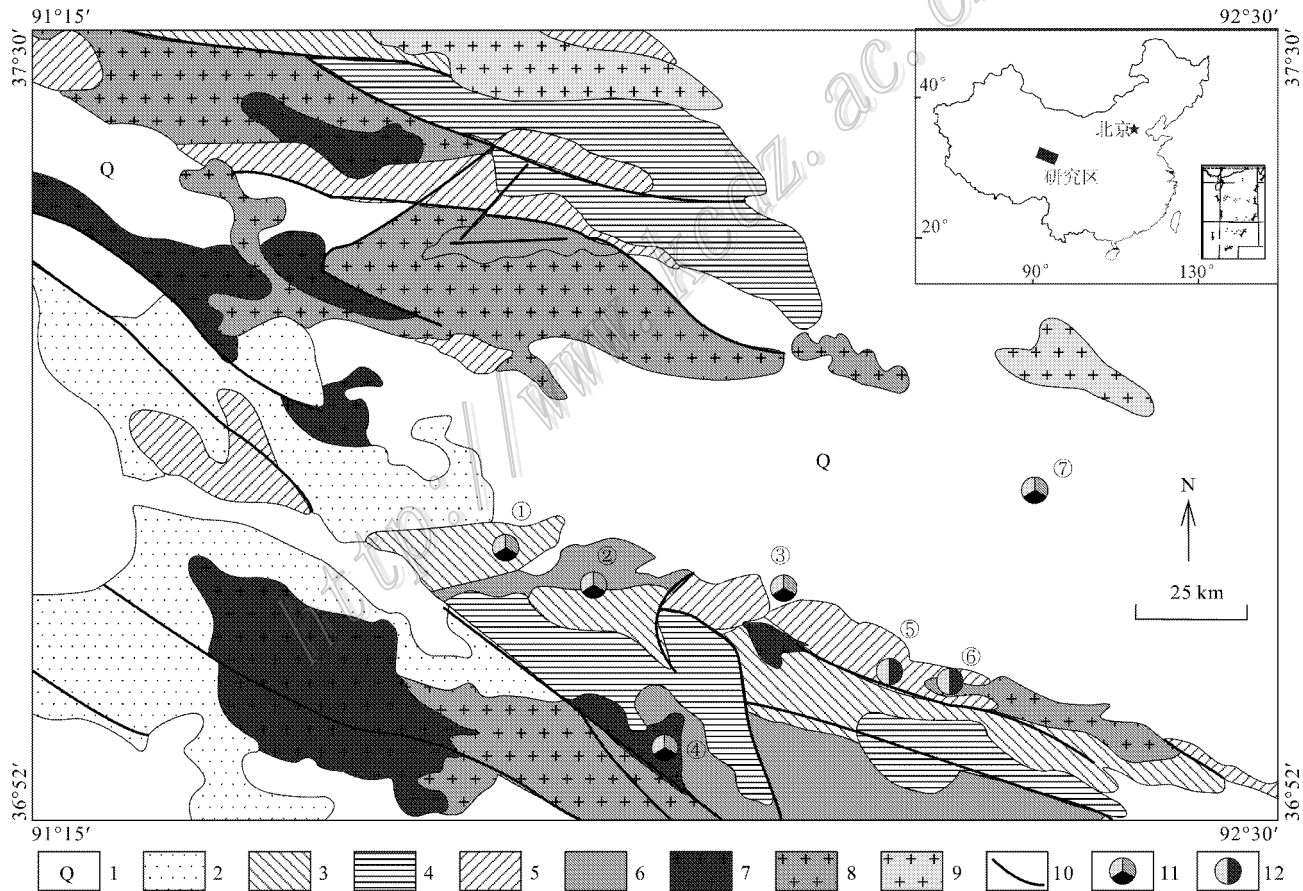


图1 青海祁漫塔格地区矽卡岩型铁多金属矿床分布略图

1—第四系冲积层;2—三叠系火山岩;3—石炭系碳酸盐岩;4—泥盆系火山岩;5—奥陶系-志留系火山岩;6—元古界地层;7—印支期花岗岩;8—海西期花岗岩;9—加里东期花岗岩;10—断裂;11—铁铜多金属矿床;12—铅锌矿。矿床:①虎头崖;②肯德可克;③野马泉;④群力;⑤四角羊;⑥金鑫;⑦尕林格

Fig. 1 Geological sketch map of Qimantag area, Qinghai Province, showing distribution of Fe-Cu polymetallic deposits
1—Quaternary; 2—Triassic; 3—Carboniferous; 4—Devonian; 5—Ordovician-Silurian; 6—Proterozoic; 7—Indosinian granitoids; 8—Hercynian granitoids; 9—Caledonian granitoids; 10—Fault; 11—Iron-copper polymetallic ore deposit; 12—Lead-zinc ore. Name of deposit: ① Hutouya; ② Kendekeke; ③ Yemaquan; ④ Qunli; ⑤ Sijiaoyang; ⑥ Jinxin; ⑦ Galinge

岩、白云质大理岩,其底部与硅质岩、角岩接触部位产有透镜状、扁豆状磁铁矿、铁锌矿或含铜磁黄铁矿矿化;第二层为变泥质硅质岩夹碳质板岩和砂卡岩化硅质岩、杂砂岩,产有钴矿体;第三层为变泥质硅质岩夹碳质板岩、大理岩,在硅质岩夹碳质板岩中,产有 10 层、累计厚达 27.09 m 的银铅锌矿体。晚古生代地层包括分布于矿区北部、西部的上泥盆统火山岩和分布于矿区东南部的中石炭统砂岩、灰岩。

1.2 构造

昆北火山侵入杂岩带北部以柴南缘断裂为界与柴达木盆地相隔,南部以昆中断裂为界与昆中花岗-变质杂岩带相邻,总体呈 NWW 向展布,属东昆仑复合造山带的一部分。矿区位于昆北火山-侵入岩带的西部,经过多期的滑脱-逆冲推覆作用,产生了一系列叠瓦状推覆体和构造岩片,构造岩片的混杂现象十分普遍。各地层单元之间多以规模巨大的走向断层为边界,构成了区内主要的构造格架,同时也控制着区内岩浆岩的分布。

区内断裂构造十分发育,走向 NW-NWW 向,以

压性、压扭性为主,包括冰沟—木都大湾、野马泉南、四角羊沟、黑山南侧及景忍山东等断裂;褶皱与断裂相伴产出,其轴迹与主构造线相一致,有楚鲁套海高勒背斜、狼牙山向斜、肯德可克向斜、野马泉向斜、黑山向斜、水里可可哈达向斜和长山向斜等。区内矿产主要产于向斜核部、弧形断裂的转折处以及构造带的复合部位(青海省地质矿产局,1991)。

1.3 岩浆岩

区内岩浆喷发活动频繁,时代主要为加里东中期、华力西早期和印支期。加里东中期火山岩颜色较深,岩相、岩性及厚度变化大,呈 NWW 向、NW 向的长条状分布,普遍发生蚀变作用,岩性主要有蚀变玄武岩、蚀变安山-玄武岩、细碧岩等,常见枕状构造。

矿区地表侵入岩极少出露,但随着矿床勘查程度不断提高以及矿山开发的逐步推进,在钻孔及坑道内见有二长花岗岩、石英斑岩、闪长玢岩等产出,野外调查时发现二长花岗岩与铁多金属矿化具有密切的时空关系,其为本文锆石 U-Pb 定年的主要对象。

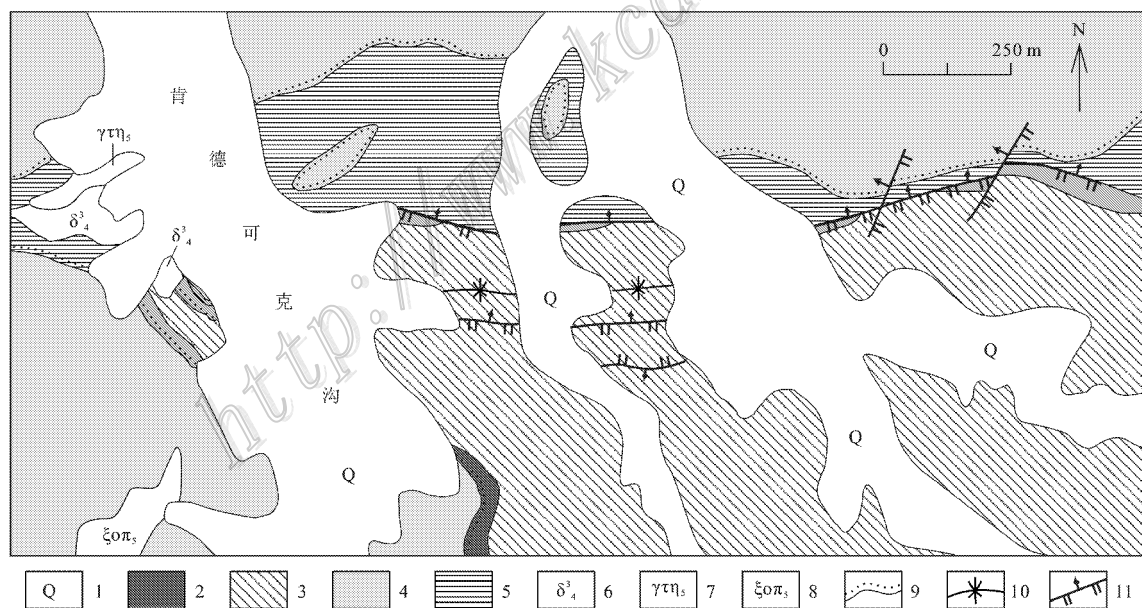


图 2 肯德可克铁矿区地质简图(据^①修改)

1—第四系冲积层;2—中石炭统白云岩及灰岩互层;3—中石炭统砂岩;4—上泥盆统英安质熔岩、凝灰熔岩;5—奥陶系—志留系滩间山群变泥质硅质岩夹大理岩及火山岩;6—闪长岩;7—钠长霏细斑岩;8—石英正长斑岩;9—不整合界线;10—向斜轴迹;11—断层

Fig. 2 Sketch geological map of the Kendekeke Fe-polymetallic deposit

1—Quaternary; 2—Middle Carboniferous dolomites and limestone; 3—Middle Carboniferous sandstone; 4—Upper Devonian dacite lava mass and tuff lava; 5—Ordovician-Silurian Tanjianshan Group meta-argillaceous-siliceous rocks intercalated with marble and volcanic rock; 6—Diorite; 7—Albite felsophyre; 8—Quartz syenitic porphyritic dyke; 9—Unconformity; 10—Synclinal axis traces; 11—Fault

① 青海省有色地勘局地质矿产勘查院. 2004. 青海省格尔木市肯德可克矿区铁多金属矿资源量估算报告.

1.4 矿体特征

矿区主矿体赋存于肯德可克向斜轴部与下古生界地层不整合面附近,空间分布受向斜轴部的层间构造、纵张构造与隐伏断层的复合部位所控制。目前共发现 146 个矿体,可分为南、北 2 个矿带。南矿带以铁矿为主,伴生有锌、铅、银、镉、铜、金等矿产;北矿带以钴、金、铋、铁矿为主。矿体规模相差悬殊,形态常为豆荚状、似层状、扁豆状和透镜状。其中银-铅-锌矿体多呈似层状和透镜状产出,走向长约 500 m,延深大于 300 m,厚度达 27 m,钴-铋-金矿体呈透镜状、豆荚状、扁豆状、似层状及脉状,共有矿体数十个,规模大小不一,其中最大矿体长 480 m,厚 11 m,延深 40~225 m。大矿体和较大矿体的连续性与对应性较好,小矿体的连续性和对应性较差。58 号矿体长 1650 m,最厚处 113.02 m,是矿区规模最大的矿体,规模最小的 128 号矿体长 100 m,真厚度 0.15 m。仅在个别钻孔中见有厚约 14 m 的钼矿(化)体;铁-锌矿体近 40 个,呈透镜状、豆荚状、扁豆状、似层状产出,最大矿体长 1650 m,厚约 42 m,延伸 44~355 m,脉状铅、铜矿体产于铁矿体上盘的白云质大理岩的张性断裂中,其中脉状铅矿体规模较大。矿体走向总体近东西向,因受不同断裂构造的控制,矿体产状南缓北陡,南矿带矿体倾向南,倾角一般 20~30°,北矿带矿体倾向北,倾角一般 30~40°,个别达 56°。

空间上,铁矿体与钙镁质砂卡岩紧密共生(图 3),砂卡岩矿物以透辉石为主,次为钙铝-钙铁系列石榴子石、橄榄石等,其外缘伴生有中-低温热液期的铅锌矿化。不同类型矿体的分布具有一定的分带性,垂向上,从上到下一般是铅矿体、锌铁矿体、铁矿体,锌矿体常在中、下部出现,铅矿体绝大多数赋存于石炭系碳酸盐岩中,铁矿体、锌铁矿体和锌矿体从石炭系地层到钙镁橄榄石砂卡岩带中皆有分布,主要赋存于石榴子石透辉石砂卡岩带中。横向上,铅矿体集中在南矿带,而硫铁矿体和铜矿体多分布于北矿带,铁矿体则构成南、北矿带的主体。

1.5 矿石类型、矿物组成及结构构造

肯德可克矿床矿石类型、金属元素及矿物组成较为复杂。铁矿石以 Fe 为主,其次伴生有 Zn、Pb、Cu 等;银-铅矿石主要有 Pb,其次为 Ag、Zn 及少量的 Cu 等;钴-铋-金矿石主要有 Au、Co、Bi,含少量 Ag、

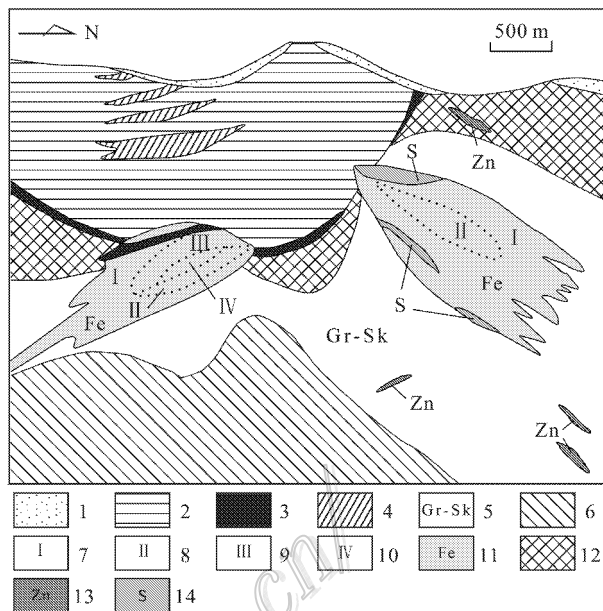


图 3 肯德可克铁多金属矿区勘探线剖面图

(根据青海省有色地勘局地质矿产勘查院^①修改)

1—第四系冲积层;2—中石炭统砂岩;3—中石炭统白云岩及灰岩互层;4—上泥盆统英安质熔岩、凝灰熔岩;5—石榴子石透辉石砂卡岩带;6—透辉石、钙镁橄榄石砂卡岩带;7—透辉石磁铁矿与石榴子石透辉石磁铁矿带;8—绿泥石方解石磁铁矿带;9—绿泥石大理岩磁铁矿带;10—方解石磁铁矿带;11—铁矿体;12—铜矿体;13—锌矿体;14—硫矿体

Fig. 3 Geological section of the Kendekeke Fe-polymetallic deposit

1—Quaternary; 2—Middle Carboniferous sandstone; 3—Middle Carboniferous dolomites and limestone; 4—Upper Devonian dacite lava mass and tuff lava; 5—Garnet-diopside skarn ore belt; 6—Diopside-monticellite skarn ore belt; 7—Diopside magnetic iron ore and garnet-diopside magnetic iron ore; 8—Chlorite-calcite magnetic iron ore; 9—Chlorite-marble magnetic iron ore; 10—Calcite magnetic iron ore; 11—Iron ore; 12—Copper ore; 13—Zinc ore; 14—Sulfur ore

Mo 等。金属矿物大部分颗粒细小,晶形差,铁(锌)矿石的金属矿物主要是磁铁矿,其次有闪锌矿、黄铁矿等;钴-铋-金矿石的金属矿物主要是黄铁矿、胶黄铁矿、白铁矿、毒砂、自然铋、铋矿、硫钴矿、自然金、银金矿、钴华等;银-铅矿石的主要金属矿物有方铅矿,其次有闪锌矿、黄铁矿和少量的黄铜矿、自然银等。脉石矿物种类也不尽相同,其中铁-锌矿石的脉石矿物为碳酸盐、绿泥石、透闪石和橄榄石等;钴-铋-金矿石的脉石矿物为石榴子石、透辉石、橄榄石、石英、绿泥石、阳起石、碳酸盐、透闪石和绢云母等;银-铅矿石的脉石矿物有石英、绢云母、石榴子石、透

① 青海省有色地勘局地质矿产勘查院. 2004. 青海省格尔木市肯德可克矿区铁多金属矿资源量估算报告.

辉石、绿泥石、碳酸盐及蛇纹石、斜长石、角闪石、石英等。矿石构造有致密块状构造、浸染状构造、条带状构造、细脉-网脉状构造、角砾状构造、花斑状构造。围岩蚀变主要有角岩化、矽卡岩化、金云母化和绿泥石化等,其中角岩化发育。

1.6 成矿期和成矿阶段

区内不同矿化类型及不同矿物组合相互穿插、交代、叠加,反映出成矿的多期多阶段性,大体可分为内生成矿期的矽卡岩化阶段、退化蚀变阶段、热液硫化物阶段和表生期。矽卡岩化阶段主要以出现钙镁橄榄石、透辉石、钙铁榴石等无水矽卡岩矿物为标志,几乎未见金属矿物的生成,退化蚀变阶段以生成大量细粒磁铁矿和绿泥石、符山石、金云母、阳起石等含水硅酸盐矿物为标志,也包括透辉石、硅灰石等无水硅酸盐矿物的继续生成,该阶段生成的磁铁矿粒度细,明显交代透辉石、钙铁榴石,具交代溶蚀结构、溶蚀胶结结构、包含结构,浸染状构造,其叠加于早期矽卡岩之上,磁铁矿主要分布于早期生成的透辉石、石榴子石粒间,热液硫化物阶段形成大量金属硫化物,它们既共生又形成先后之分,其中辉钼矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿形成较早,随之钴、金、方铅矿、黄铜矿形成,同时继续形成绿泥石、蛇纹石、石英、萤石、方解石等。表生期表现为浅部硫矿体、铅矿体的氧化作用形成少量赤铁矿、褐铁矿、铜蓝、孔雀石、白铅矿等氧化矿物。

2 二长花岗岩锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素分析

2.1 锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 分析方法

本次研究的二长花岗岩样品采于肯德可克铁多金属矿区 58 号矿体 3975 m 中段坑道内。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试在中国地质科学院矿产资源研究所 LA-MC-ICP-MS 实验室完成。分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 LA-MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP213 激光剥蚀系统。锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的测试精度(2σ)均为 2% 左右,锆石的标准定年精度和准确度均在 1% (2σ) 左右。在锆石 U-Pb 测年实验过程中,以澳大利亚 MacQuarie 大学大陆地球化学与成矿作用研究中心标定的 GJ-1 锆石($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $(610.0 \pm 1.7)\text{Ma}$, Elhlou et al., 2006) 作为标准进行测试样品年龄校正。分析样品 U、Th 含量以标准锆石

M127($U = 923 \times 10^{-6}$, $\text{Th} = 439 \times 10^{-6}$, $\text{Th}/U = 0.475$, Nasdala et al., 2008) 为外标进行校正。分析数据采用 ICPMSDataCal4.3 程序(Liu et al., 2008) 处理,普通铅校正利用 EXCEL 宏程序 ComPbCorr #3-17(Andersen, 2005) 进行校正。测试样品锆石 U-Pb 年龄谱和图用 Isoplot 3.0 程序获得。详细的仪器参数与分析流程参见侯可军等(2009)。

2.2 锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果

实物显微镜下锆石呈浅玫瑰色,依据锆石阴极发光图像(图 4),二长花岗岩中的锆石绝大多数呈短柱状至长柱状,长 $200 \sim 400 \mu\text{m}$,内部发育清晰的韵律环带结构,为典型的岩浆结晶锆石,部分锆石有不规则的锆石残留核。 Th/U 比值较高,介于 $0.51 \sim 0.98$ 之间。

从表 1 及 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谱和图(图 5)中可以看出,对肯德可克矿区二长花岗岩中 19 颗锆石进行 19 次分析,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄较为集中,介于 $229.3 \sim 229.7 \text{Ma}$ 之间,均位于谐和线上或谐和线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(229.5 \pm 0.5)\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.02$) (图 5),代表了二长花岗岩的形成年龄。

2.3 Hf 同位素

本次同时对 U-Pb 定年的二长花岗岩样品进行了锆石 Hf 同位素分析,结果见表 2。18 颗锆石的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.040\ 340 \sim 0.092\ 884$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 $0.000\ 736\ 248 \sim 0.001\ 889\ 806$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 接近或小于 0.002,表明锆石形成后,放射性成因 Hf 的积累较少,可以使用 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值进行地球化学示踪(吴福元等, 2007)。

肯德可克矿区的 18 颗锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0.8 \sim 5.9$, 显示了比较均一的 Hf 同位素组成。所有分析点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均低于 0.002,表明锆石形成后的放射性成因 Hf 积累十分有限,因而测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值应能较好地反映其形成过程中 Hf 同位素的组成特征。

由于锆石是一种非常稳定的矿物,封闭温度高,可以容纳大量的 Hf,而排斥放射性母体 Lu,在其形成后 Hf 同位素组成基本不变,很少受到后期岩浆热事件的影响,所测样品的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本可以代表其形成时体系的 Hf 同位素组成(Amelin et al., 1999; 吴福元等, 2007),而已有的 Hf 同位素研究表

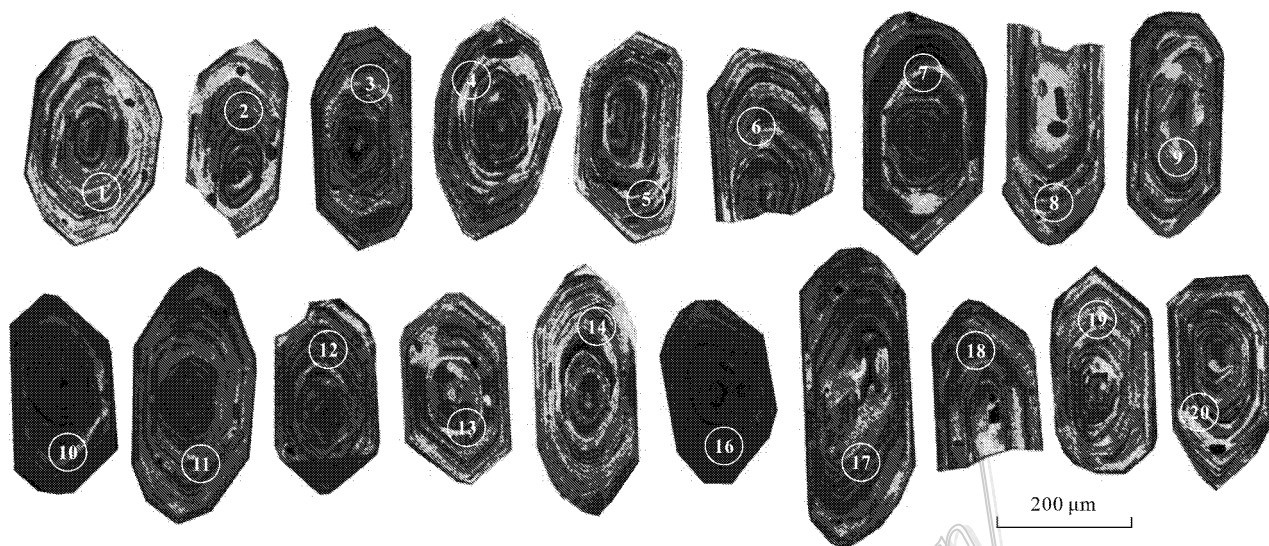


图 4 肯德可克铁多金属矿区二长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 4 CL images of zircons from monzonitic granite in the Kendekeke Fe-polymetallic deposit

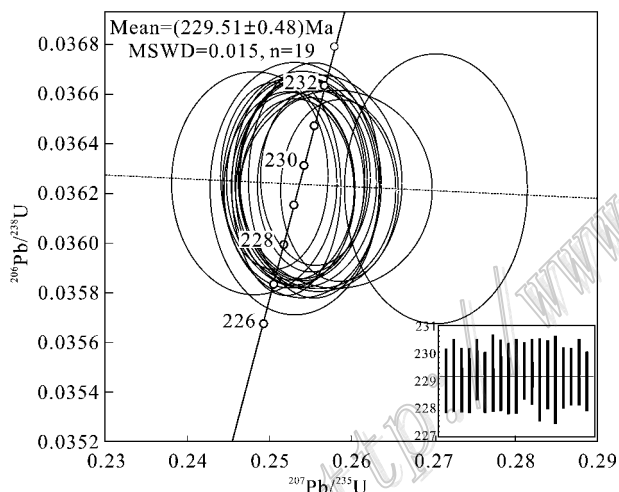


图 5 肯德可克铁多金属矿区二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 U-Pb zircon concordia diagram for monzonitic granite in the Kendekeke Fe-polymetallic deposit

明 $\epsilon_{\text{H}}(t) < 0$ 的岩石主要为地壳物质部分熔融的产物 (Vervoort et al., 2000; Griffin et al., 2004)。

3 硫同位素

3.1 取样及测试方法

本次研究的 7 件样品主要采集于肯德可克铁多金属矿区主要经济矿体两个生产中段 (3960 m 和 3975 m) 沿脉和穿脉巷道内。硫同位素测试在核工业北京

地质研究院测试研究中心完成,以 Cu_2O 做氧化剂制备测试样品,仪器型号为 Finnigan MAT-251 型质谱仪,分析结果采用国际标准 CDT 表达,分析精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

3.2 测试结果

从表 3 中可看出,肯德可克矿床中 $\delta^{34}\text{S}$ 值组成大部分变化于 0 附近,范围为 $-2.0\text{‰} \sim +1.5\text{‰}$,平均为 0.43‰ ,以较小正值为特征。与国内不同类型矿床之硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 相比,本矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 明显有别于砂岩型 ($\delta^{34}\text{S} = -1.0\text{‰} \sim +3.0\text{‰}$) 的组成,与斑岩型 ($\delta^{34}\text{S} = -3.0\text{‰} \sim +5.0\text{‰}$) 和火山岩型 ($\delta^{34}\text{S} = -3.0\text{‰} \sim +10.0\text{‰}$) 相差不大,与矽卡岩型 ($\delta^{34}\text{S} = -2.0\text{‰} \sim +7.5\text{‰}$) 较为一致。从以上硫同位素特征和组成情况看,各类矿石、岩石中 $\delta^{34}\text{S}$ 比值接近,它们似应为同源产物。与国内主要矽卡岩型铁极为相似,显示了后期岩浆侵入形成的矽卡岩的成矿特点。

4 讨论

近年来,随着区域地质调查、区域矿产调查以及相关的研究工作不断深入,发现区域上与矽卡岩型铁、铜、铅锌多金属成矿有关的花岗岩时代多集中于印支期。如,卡而却卡铜铅锌矿床花岗闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(237 \pm 2) \text{Ma}$ (王松等, 2009); 虎头崖铅锌多金属矿区与成矿密切相关的花岗闪长岩和二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 $(235.4 \pm$

表2 肯德可克矿区二长花岗岩的 Hf 同位素分析结果

Table 2 Hf isotopic compositions of monzonitic granite in the Kendekeke Fe-polymetallic deposit

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$
kd32-1	228.56	0.046246	0.000910595	0.282747534	0.000126	-0.9	4.0
kd32-2	225.07	0.040340	0.000936433	0.282672251	0.001303	-3.5	1.3
kd32-3	233.18	0.082413	0.001889806	0.282705863	0.000941	-2.3	2.5
kd32-5	227.06	0.048376	0.000989391	0.282707202	0.000714	-2.3	2.5
kd32-6	229.11	0.058882	0.001055504	0.282723236	0.000633	-1.7	3.1
kd32-7	231.01	0.053412	0.001053289	0.282714027	0.000902	-2.1	2.9
kd32-8	231.44	0.051152	0.001138407	0.28271894	0.000141	-1.9	3.0
kd32-9	228.25	0.078183	0.001734611	0.282723816	0.000558	-1.7	3.0
kd32-10	229.80	0.053420	0.000899274	0.28273308	0.000536	-1.4	3.5
kd32-11	231.13	0.052086	0.000923336	0.282720923	0.001040	-1.8	3.1
kd32-12	229.84	0.070950	0.001563595	0.28265909	0.000449	-4.0	0.8
kd32-13	229.08	0.055767	0.000978805	0.282726295	0.000659	-1.6	3.3
kd32-14	229.75	0.092884	0.00187257	0.282731861	0.000950	-1.4	3.3
kd32-16	242.95	0.053083	0.000895887	0.282747116	0.000436	-0.9	4.3
kd32-17	228.91	0.042758	0.000736248	0.282679565	0.000088	-3.3	1.6
kd32-18	230.67	0.076095	0.001682551	0.282802463	0.000561	1.1	5.9
kd32-19	229.88	0.056399	0.001257301	0.2826864	0.000914	-3.0	1.8
kd32-20	233.50	0.070336	0.001547755	0.282720542	0.001887	-1.8	3.1

表3 肯德可克铁多金属矿区硫同位素分析结果

Table 3 Sulfur isotope composition of the Kendekeke Fe-polymetallic deposit

样号	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$
KD-23	磁黄铁矿	0.7
KD-24	磁黄铁矿	1.2
KDD-0	磁黄铁矿	-2.0
KDD-0	黄铁矿	1.3
KDD-15	黄铁矿	-0.1
KDD-16	黄铁矿	0.4
KDD-17	黄铁矿	1.5

1.8) Ma 和(219.2 ± 1.4) Ma(丰成友等, 2011); 景忍地区与铁、铜多金属有关的花岗岩的 SHRIMP U-Pb 年龄为(204.1 ± 2.6) Ma(刘云华等, 2005); 杂林格大型矽卡岩型铁多金属矿石英二长闪长岩、石英二长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为(228.3 ± 0.5) Ma 和(234.4 ± 0.6) Ma(高永宝等, 2012); 那陵郭勒河以东与铁矿有关的花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(214.2 ± 1.3)~(225.2 ± 1.2) Ma(常有英等, 2009)。前人已对肯德可克矿区成矿的中酸性侵入岩进行了一定的研究, 如辉长岩中斜长石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 坪年龄为(207.8 ± 1.9) Ma, 等时线年龄为(211.1 ± 4.5) Ma(赵财胜等, 2006); 钙矽卡岩中金云母 K-Ar 年龄为 214 Ma(张德全等, 2001)^①等。笔

者本次报道了肯德可克矿区与矽卡岩型铁多金属矿有关的二长花岗岩的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄为(229.5 ± 0.5) Ma(MSWD=0.02), 进一步证明区域上与矽卡岩型铁、铜多金属成矿密切相关的花岗岩集中形成于印支期。

在祁漫塔格地区, 与印支期矽卡岩型多金属矿床相伴常常产出有同期斑岩型矿化。如卡而却卡矿区东北部的斑岩型铜矿(似斑状黑云母二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(227.3 ± 1.8) Ma, 丰成友等, 2012); 鸭子沟斑岩型铜钼矿(矿化钾长花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(224 ± 1.6) Ma, 辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(224.7 ± 3.4) Ma, 李世金等, 2008)。丰成友等(2010)提出不同成矿元素组合的印支期矽卡岩型和斑岩型矿床在空间上常常相伴而生, 其应为区域印支运动同一构造-岩浆活动在不同阶段、不同深度和不同部位发生成矿作用的产物, 印支期为本区成矿强度最大、最具有经济意义的多金属成矿期。

区域上, 已有研究表明, 包括青海祁漫塔格在内的东昆仑地区在晚古生代由于拉张出现阿尼玛卿二叠纪小洋盆, 属于古特提斯洋的一部分。海西晚期—印支早期, 洋盆依次向北俯冲、消减, 在东昆仑南侧形成三叠世前陆堆积, 在其北侧的微板块南缘, 则

① 张德全. 2001. 柴达木盆地南北缘成矿地质环境及找矿远景对比研究. 科研报告. 118-119.

有海西期—印支期花岗岩的大面积侵入,成为古特提斯北部的活动陆缘。之后,随着古特提斯陆缘的不断增生,巴颜喀拉—阿尼玛卿洋向北俯冲,从石炭纪开始陆续有与洋壳俯冲有关的火山喷发和岩浆侵入活动,一直持续到二叠纪末—三叠纪初。巴颜喀拉—阿尼玛卿洋闭合以后,促使陆内造山作用,整个区域上升成陆。在260~230 Ma,东昆仑即处在在大洋板块大规模俯冲碰撞阶段(郭正府等,1998)。综合本区最新获得的花岗质岩体高精度年龄数据(204~237 Ma),恰处在该阶段晚期,形成于后碰撞构造阶段。后碰撞阶段地壳增厚使下地壳物质部分熔融;“相对松弛”的应力背景使下地壳发生拆沉,区内花岗岩普遍发育暗色包体可能源于幔源物质底侵,前人研究发现在中三叠世可能确实发生过底侵作用和幔源基性岩浆混合作用(罗照华等,2002;刘成东等,2004;谌宏伟等,2005)。下地壳物质熔融形成了大量的花岗质岩浆,同时有地幔物质的混染,岩浆在侵入过程中与含碳酸盐岩地层围岩进行了物质交代,形成矽卡岩型铁多金属矿床。

5 结 论

(1)本次测得肯德可克铁多金属矿区二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为(229.5±0.5) Ma,厘定其形成时代为晚三叠世,进一步证明区域上与矽卡岩型铁、铜多金属成矿有关的花岗岩时代多集中于印支期。二长花岗岩锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 0.8~5.9, Hf 同位素组成较均一。

(2)金属硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 组成(-2.0‰~+1.5‰)接近于零值,平均为 0.43‰,表明为岩浆来源,反映该矿床为与岩浆侵入作用有关的矽卡岩型矿床的成矿特征。矿体围岩中的一些成矿矽卡岩与中酸性岩脉关系密切,矿石硫同位素组成与矽卡岩型较为一致,表明与印支期中酸性岩体有关,显示了后期岩浆侵入形成的矽卡岩的成矿特点。

参考文献/References

- 曹德智,王 军,杨伟毅,彭中发,李延庆,汪成萍,赵胜楠. 2012. 东昆仑它温查汉铁多金属矿床控矿因素、找矿前景及方向分析[J]. 西北地质, 45(1):56-62.
- 常有英,李建放,张 军,曹生秀,李萍萍,陈海清. 2009. 青海那陵郭勒河东晚三叠世侵入岩形成环境及年代学研究[J]. 西北地质, 42(1):57-65.
- 陈世顺,付永侠,保广英,李 华,王凤林,文雪峰. 2009. 青海省东昆仑西段杂林格铁多金属矿床特征及成因[J]. 矿产与地质, 23(6):542-546.
- 谌宏伟,罗照华,莫宣学,刘成东,柯 珊. 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合作用花岗岩的岩浆底侵作用机制[J]. 中国地质, 32(3):385-395.
- 丰成友,李东生,吴正寿. 2009. 青海东昆仑成矿带斑岩型矿床的确认及找矿前景分析[J]. 矿物学报, 增刊:171-172.
- 丰成友,李东生,吴正寿,李军红,张占玉,张爱奎,舒晓峰,苏生顺. 2010. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 43(4):10-17.
- 丰成友,王雪萍,舒晓峰,张爱奎,肖 晔,刘建楠,马圣钊,李国臣,李大新. 2011. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(6):1806-1816.
- 丰成友,王 松,李国臣,马圣钊,李东生. 2012. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩:年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 28(2):665-678.
- 高永宝,李文渊,马晓光,张照伟,汤庆艳. 2012. 东昆仑杂林格铁矿床成因年代学及 Hf 同位素制约[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 48(2):36-47.
- 郭正府,邓晋福,许志琴,莫宣学,罗照华. 1998. 青藏东昆仑晚古生代末-中生代中酸性火成岩与陆内造山过程[J]. 现代地质, 12(3):344-352.
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4):481-492.
- 李大新,丰成友,赵一鸣,李泽峰,刘建楠,肖 晔. 2011. 青海卡而却卡铜多金属矿床蚀变矿化类型及夕卡岩矿物学特征[J]. 吉林大学学报, 41(6):1818-1831.
- 李东生,张占玉,苏生顺,郭世珍,张海兰,奎明娟. 2010. 青海卡而却卡铜矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 43(4):239-244.
- 李洪普,宋忠宝,田向东,芦文全. 2010. 东昆仑四角羊铅锌多金属矿床成矿地质特征及找矿意义[J]. 西北地质, 43(4):179-187.
- 李世金,孙丰月,丰成友,刘振宏,赵俊伟,李玉春,王 松. 2008. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿的年代学研究[J]. 地质学报, 82(7):949-955.
- 罗照华,柯 珊,曹永清,邓晋福,谌宏伟. 2002. 东昆仑印支晚期幔源岩浆活动[J]. 地质通报, 21(6):292-297.
- 刘成东,莫宣学,罗照华,喻学惠,谌宏伟,李述为,赵 欣. 2004. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用—来自锆石 SHRIMP 年代学的证据[J]. 科学通报, 49(6):596-602.
- 刘云华,莫宣学,张雪亭,许国武. 2005. 东昆仑野马泉地区矽卡岩矿床地质特征及控矿条件[J]. 华南地质与矿产, 3:19-23.
- 马圣钊,丰成友,李国臣,舒晓峰. 2012. 青海虎头崖铜铅锌多金属矿床硫、铅同位素组成及成因意义[J]. 地质与勘探, 48(2):321-

- 331.
- 潘 彤. 2008. 青海东昆仑肯德可克钴金矿床硅质岩特征及成因 [J]. 地质与勘探, 44(2):51-54.
- 祁俊霞, 叶积龙, 保守礼. 2010. 尕斯库勒多金属矿床地质特征及成因分析 [J]. 青海大学学报(自然科学版), 28(3):42-46.
- 青海省地质矿产局. 1991. 青海省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社.
- 王 松, 丰成友, 李世金, 江军华, 李东生, 苏生顺. 2009. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义 [J]. 中国地质, 36(1):74-84.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. 岩石学报, 23(2):185-220.
- 伊有昌, 焦革军, 张芬英. 2006. 青海东昆仑肯德可克铁钴多金属矿床特征 [J]. 地质与勘探, 42(3):30-35.
- 张爱奎, 莫宣学, 刘光莲, 尚小刚, 王 维. 2010. 野马泉矿床特征及找矿潜力分析 [J]. 矿产与地质, 24(2):97-106.
- 赵财胜, 杨富全, 代军治. 2006. 青海东昆仑肯德可克钴金矿床成矿年龄及意义 [J]. 矿床地质, 25:427-430.
- 张德全, 丰成友, 李大新, 徐文艺, 闫升好, 余宏全, 董英君, 崔艳合. 2001. 柴北缘-东昆仑地区的造山型金矿床 [J]. 矿床地质, 20(2):137-146.
- Amelin Y, Lee D C, Halliday A N and Pidgeon R T. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. Nature, 399:252-255.
- Andersen T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation [J]. Chem. Geol., 216:249-270.
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, Pearson N J and O'Reilly S Y. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70(18):158-158.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J and O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons [J]. Precambrian Res., 131:231-282.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Gunther D, Xu J, Gao C and Chen H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-MC-ICP MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 257(1-2):34-43.
- Nasdala L, Miletich R, Ruschel K and Va'czi T. 2008. Raman study of radiation-damaged zircon under hydrostatic compression [J]. Phys. Chem. Minerals, 35:597-602.
- Vervoort J D, Patchett P J, Albarede F, Blichert-Toft J, Rudnick R and Downes H. 2000. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust [J]. Earth Planet Sci. Lett., 181:115-129.

<http://www.kcdz.com>