

文章编号: 0258-7106(2014)02-0271-15

新疆东天山磁海铁矿区侵入岩年龄及其对 矿床形成时代的制约*

郑佳浩^{1,2}, 孟庆鹏³, 刘海龙⁴, 武斌⁵, 刘锋¹, 李强¹, 韩文清³

(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 北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 3 新疆大学地质与矿业工程学院新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 乌鲁木齐 830049; 4 河北省地质矿产局探矿技术研究院, 河北 廊坊 065201; 5 宝钢集团八钢公司新疆钢铁雅满苏矿业有限责任公司, 新疆 哈密 839000)

摘要 新疆东天山是中国重要铁铜多金属成矿带之一, 磁海大型铁矿床位于该成矿带南缘的北山裂谷带内。铁矿体赋存于早期辉绿岩和矽卡岩中, 呈透镜状、脉状近平行排列, 后期辉绿岩脉穿切早期辉绿岩和矿体。在野外地质调查的基础上, 文章对早期辉绿岩和成矿期后辉绿岩脉进行了年代学研究。锆石 LA-MC-ICP MS U-Pb 测年结果表明, 赋矿辉绿岩的形成时代为 $(286.5 \pm 1.8) \text{ Ma}$ 和 $(284.8 \pm 1.3) \text{ Ma}$, 辉绿岩脉形成于 $(275.8 \pm 2.2) \text{ Ma}$, 由此限定磁海铁矿床的形成年龄在 $286 \sim 275 \text{ Ma}$, 属于早二叠世成矿。结合区域岩浆和构造活动研究成果认为, 磁海铁矿床成矿作用与东天山地区早二叠世大规模镁质-超镁质岩浆作用密切相关, 形成于碰撞后伸展构造环境中。

关键词 地球化学; LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄; 辉绿岩; 磁海铁矿床; 成矿时代; 东天山

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Geochronology of intrusive rocks and their constraint on formation age of Cihai iron deposit, Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang

ZHENG JiaHao^{1,2}, MENG QingPeng³, LIU HaiLong⁴, WU Bin⁵, LIU Feng¹,
LI Qiang¹ and HAN WenQing³

(1 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037, China; 2 Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3 Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of Central Asian Orogenic Belt, College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 4 Institute of Prospecting Technology Research, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Langfang 065201, Hebei, China; 5 Xinjiang Yamansu Mining Company of Bagang Company, Baosteel Group, Hami 839000, Xinjiang, China)

Abstract

The eastern Tianshan metallogenic belt is one of the most important iron-copper polymetallic belts in China, and the large-size Cihai iron deposit is hosted in Beishan rift of the southern part of the eastern Tianshan metallogenic belt. The direct wall rocks of iron orebodies are diabase and skarn, and the major iron orebodies are banded

* 本文为国土资源部公益性行业科研专项经费项目(编号: 201211073-03)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(编号: 2012CB416803)联合资助的成果

第一作者简介 郑佳浩, 男, 1987 年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: joey-zen@163.com

收稿日期 2013-04-18; 改回日期 2014-02-23。秦思婷编辑。

and nearly parallel in form. The iron orebodies are hosted in the early diabase and skarn, and there are some diabase veins cutting through the early formed iron orebodies and diabase. The diabase as host rock of iron orebodies and the diabase veins formed after the ore deposit were chosen as the study objects. The LA-MC-ICP MS zircon U-Pb dating of these two samples yielded ages of (286.5 ± 1.8) Ma and (284.8 ± 1.3) Ma for ore-hosting diabase while the diabase vein cutting through the former diabase and iron orebodies gave an age of (275.8 ± 2.2) , indicating that the ore-forming age of the Cihai deposit is between 286 and 275 Ma in Early Permian. It is held that the mineralization of the Cihai iron ore deposit was closely related to the massive mafic-ultramafic magmatism of eastern Tianshan region in the Early Permian and occurred in a post-collisional extensional tectonic environment.

Key words: geochemistry, LA-MC-ICP MS zircon U-Pb age, diabase, Cihai iron deposit, ore-forming age, Eastern Tianshan Mountains

中国天山造山带位于中亚造山带南缘,铁矿、铜镍矿、金矿等矿产资源丰富,是新疆主要的富铁矿集中区,铁矿床分布广、富矿多,以东天山和西天山阿吾拉勒地区最为集中(Mao et al., 2005; 朱永峰等, 2007; 陈毓川等, 2008; Zhang et al., 2014)。东天山已发现的铁矿床类型包括火山-沉积型、岩浆型(V-Ti 磁铁矿型)和矽卡岩型,其中,大型矿床 4 处、中型 17 处、小型 48 处,矿(化)点 500 多处,成矿作用从中元古代、古生代延续到中生代(王登红等, 2007; 陈毓川等, 2008)。东天山地区广泛发育的铜镍硫化物矿床和与镁铁质-超镁铁质岩有关的铁矿床形成时代多集中于二叠纪—三叠纪。研究表明,东天山地区镁铁质-超镁铁质岩浆侵入活动及其有关的铜镍硫化物矿床主要形成于 298~282 Ma(Mao et al., 2003, 2008),而与镁铁质-超镁铁质岩相关的铁矿床形成时代为 292~220 Ma(薛春纪等, 2000; Li et al., 2005; Zhang et al., 2005; Huang et al., 2013)。

磁海铁矿床位于东天山成矿带南缘的北山裂谷带内,是产在辉绿岩中的大型铁矿床,控制储量已达 1 亿吨(王登红等, 2007)。此类铁矿床在中国仅此一处,在世界上也是非常罕见的,仅在美国宾夕法尼亚州的 Cornwall 地区发现,命名为 Cornwall 型铁矿床(Eugster et al., 1979; Rose et al., 1985)。前人对磁海铁矿床的岩石地球化学、矿床地质、矿物学、矿床成因及成矿机制等进行了研究(张明书等, 1980; 盛继福, 1985; 薛春纪等, 1999; 赵玉社, 2000; 左国朝等, 2004; 王玉往等, 2006; 唐萍芝等, 2010),然而对磁海铁矿床成矿时代存在比较大的争议,如蚀变角闪石 K-Ar 年龄为 260.3~196.6 Ma(张明书等, 1980),而与矿体密切相关的辉绿岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 (268 ± 7) Ma(薛春纪等, 2000),辉绿玢岩

的形成时代为 (268 ± 25) Ma(李华芹等, 2004),磁海铁矿石中黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄为 (262 ± 34) Ma(Huang et al., 2013)。由于早期测试仪器或测试方法的局限性,上述年龄结果较宽泛,精度较差。锆石的 U-Pb 同位素体系是目前已知矿物同位素体系封闭温度最高的(超过 900℃, Lee et al., 1997),很难被后期地质作用破坏。利用锆石 U-Pb 同位素体系开展成岩成矿时代研究已成为目前最普遍和成熟的手段。鉴于磁海铁矿床年代学研究方面存在的问题,本文采用高精度 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 测年方法对矿区内辉绿岩和后期辉绿岩脉进行年代学研究,以期精确限定磁海铁矿床形成时代,为磁海铁矿床模型构建和区域铁成矿作用探讨及成矿规律总结提供年代学资料。

1 区域地质背景

天山山系位于欧亚大陆腹地,跨越多国、东西延长超过 2500 km,中国新疆境内一般以乌鲁木齐-库勒公路为界划为东天山和西天山(何国琦等, 2004; 王登红等, 2006)。东天山位于吐哈盆地南缘和塔里木盆地的东北缘之间,包括博格达-哈尔里克地块、觉罗塔格构造带、中天山地块、南天山地块东段和北山裂谷等单元(图 1),其中,觉罗塔格构造带又可分为大南湖火山岛弧带、小热泉子弧内盆地、康古尔-黄山韧性剪切带和雅满苏弧后盆地。东天山被认为是在古生代由不同地块逐渐拼接而成(Xiao et al., 2004; 王义天等, 2006; Yang et al., 2009; Han et al., 2010; Charvet et al., 2011),这些地块之间大规模发育二叠纪的走滑断层(Wang et al., 2010)。晚古生代东天山存在的大规模岩浆活动,也

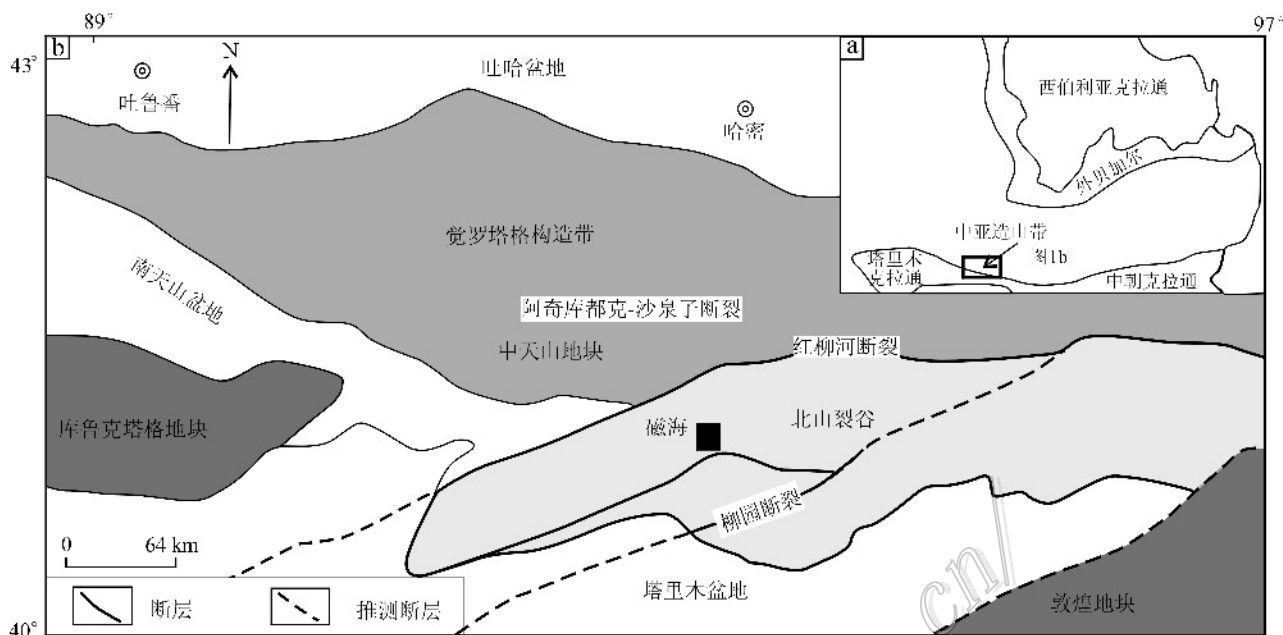


图1 东天山区域地质图(据 Su et al., 2012 修改)

Fig. 1 Geological map of Eastern Tianshan Mountains (modified after Su et al., 2012)

是 Cu-Ni-Fe 矿的成矿爆发期,如 Cu-Ni 硫化物矿床(黄山东为 282 Ma,毛景文等,2002;香山为 285 Ma,秦克章等,2002;白石泉为 284 Ma, Su et al., 2011)、Fe 矿床(268 Ma,薛春纪等,2000)等。

北山地区位于东天山南缘,塔里木盆地的东北缘,总体呈北东东向展布,二叠纪被认为是一个裂谷(Xiao et al., 2010)。北山地区具前寒武纪结晶基底,出露地层包括古元古界北山岩群低角闪岩相变质岩、中元古界长城系古铜井岩群和红柳泉岩组黑云母斜长变粒岩和黑云母石英片岩、下寒武统双鹰山组灰岩和含碳泥质页岩、下石炭统红柳园组火山-陆源碎屑岩、下二叠统红柳河组中基性火山岩、下二叠统因尼卡拉塔格组碎屑岩、上二叠统骆驼沟组砾岩和砂岩、第三系、第四系沉积物。侵入岩发育,主要为石炭纪—二叠纪侵入岩,岩石类型从超镁铁质、镁铁质到长英质岩类均有出露,其中,二叠纪发育中基性火山岩、镁铁质-超镁铁质岩和花岗岩。

2 矿床地质特征

磁海铁矿床位于北山地区 NEE 向红柳河-星星峡断裂和南部的柳园深大断裂之间(图 1)。矿区主要出露蓟县系和二叠系。其中,蓟县系平头山群岩石组合主要为长英质片岩、大理岩、白云岩。下二叠

统由下部的双堡塘组火山岩和上部的菊石滩组碎屑岩组成,主要为浅海相碎屑岩、中基性-中酸性火山岩、长英质砂岩等,其中,菊石滩组为砂砾岩、砂岩夹薄层灰岩,双堡塘组为凝灰岩、火山角砾岩、安山岩和玄武岩。区内侵入岩发育,主要有花岗岩、辉绿岩和辉长岩(图 2)。

磁海铁矿床包括磁海、磁南和磁西 3 个矿段。磁海矿段位于矿区东北部(图 2),为露天开采,规模最大,铁矿石储量超过 1 亿吨(王登红等,2007),占整个磁海铁矿床储量的 90% 以上,其平均全铁品位为 45.7%,而磁南、磁西矿段分别位于磁海矿段的南部、西部,规模相对较小,均为井下开采。磁海矿段是整个矿区最具有代表性的矿段,已圈定的近百个矿体主要呈透镜状、脉状近 EW 向成群产出,单个磁铁矿体的主要直接围岩是辉绿岩和石榴子石透辉石砂卡岩(图 3)。磁铁矿主要呈致密块状、稠密浸染状、稀疏浸染状产出,部分较粗粒自形磁铁矿、发丝状磁黄铁矿呈脉状、浸染状产于细粒磁铁矿中(图 4)。矿石中金属矿物以磁铁矿为主,少量磁黄铁矿、黄铁矿,偶见黄铜矿、辉砷钴矿、钛铁矿、赤铁矿;非金属矿物有石榴子石、辉石、方解石、角闪石、绿泥石、绿帘石、黑云母、石膏、石英、磷灰石等。矿区围岩蚀变发育,主要有钠化和砂卡岩化等。磁海、磁南和磁西 3 个矿段中均发育石榴子石透辉石磁铁

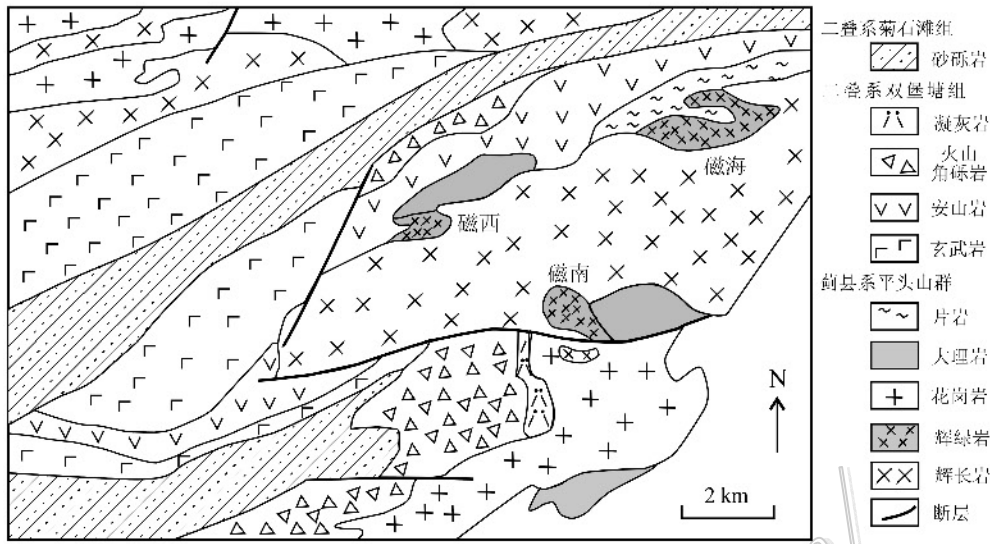


图 2 磁海矿区地质图(据唐萍芝等,2010 修改)

Fig.2 Geological map of the Cihai ore district (modified after Tang et al. , 2010)

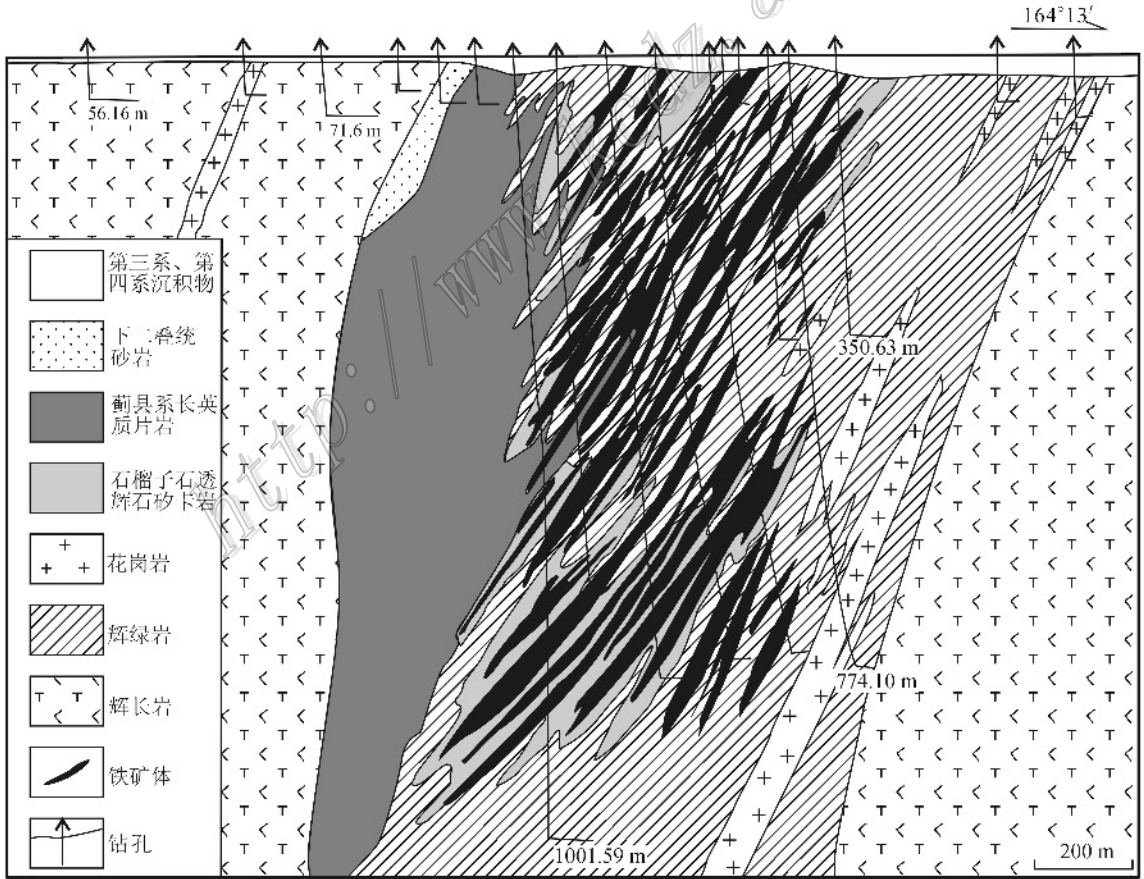


图 3 磁海矿段 V 号勘探线剖面图(据薛春纪等,2000 修改)

Fig.3 Geological section along No. V exploration line in the Cihai ore block (modified after Xue et al. , 2000)

矿矿石(图 4a、b、c)、块状磁铁矿矿石(图 4d、f)和条带状矽卡岩磁铁矿矿石(图 4e),其矿化、蚀变等矿床地质特征基本类似。

磁海矿段铁矿体主要产在辉绿岩和以石榴子石-透辉石为主的矽卡岩中,矿区内出露大量早期辉绿岩、矽卡岩和少量晚期辉绿岩脉。早期辉绿岩均发生不同程度的蚀变,矽卡岩化广泛发育,在矽卡岩中含浸染状磁铁矿,块状磁铁矿体产在矽卡岩中或矽卡岩与辉绿岩的接触部位,矿物组合为磁铁矿-角闪石-绿帘石-方解石。辉绿岩中还发育钠长石化、黑云母化和角闪石化。成矿期后的辉绿岩脉穿切早期形成的辉绿岩和矽卡岩铁矿体(图 5a),其蚀变作用较弱。

3 样品采集与分析方法

3.1 样品采集

在磁海矿段采坑中采集铁矿体直接围岩辉绿岩(CH12-110)和晚期穿切铁矿体的近平行的辉绿岩脉

(CH12-111)用于年代学研究,采样位置见图 5b、c。

辉绿岩(CH12-110)呈浅墨绿色,块状构造(图 6a),辉绿结构。主要矿物为斜长石(50%~55%)和单斜辉石(40%~45%),少量钛铁矿(~2%)。斜长石相对自形,单斜辉石呈他形充填于相对自形的斜长石中。斜长石发生钠化,部分绢云母化,单斜辉石发生黑云母化,部分发生角闪石化(图 6c),副矿物主要为磷灰石、榍石、锆石。

辉绿岩脉(CH12-111)呈灰白色,块状构造(图 6b),辉绿结构。主要矿物为斜长石(50%~55%),单斜辉石(40%~45%)和钛铁矿(~3%)。自形的斜长石颗粒之间充填他形的单斜辉石。斜长石发生钠化,部分绢云母化,辉石较新鲜,未发生明显的黑云母化或角闪石化(图 6d)。副矿物主要为磷灰石和锆石。

3.2 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 分析方法

将样品破碎,经常规的重力和磁选之后,在双目镜下挑选锆石颗粒,将挑选的锆石和锆石标样制靶。结合锆石 CL 图像、透射光和反射光选择合适的锆石进行年龄测试。

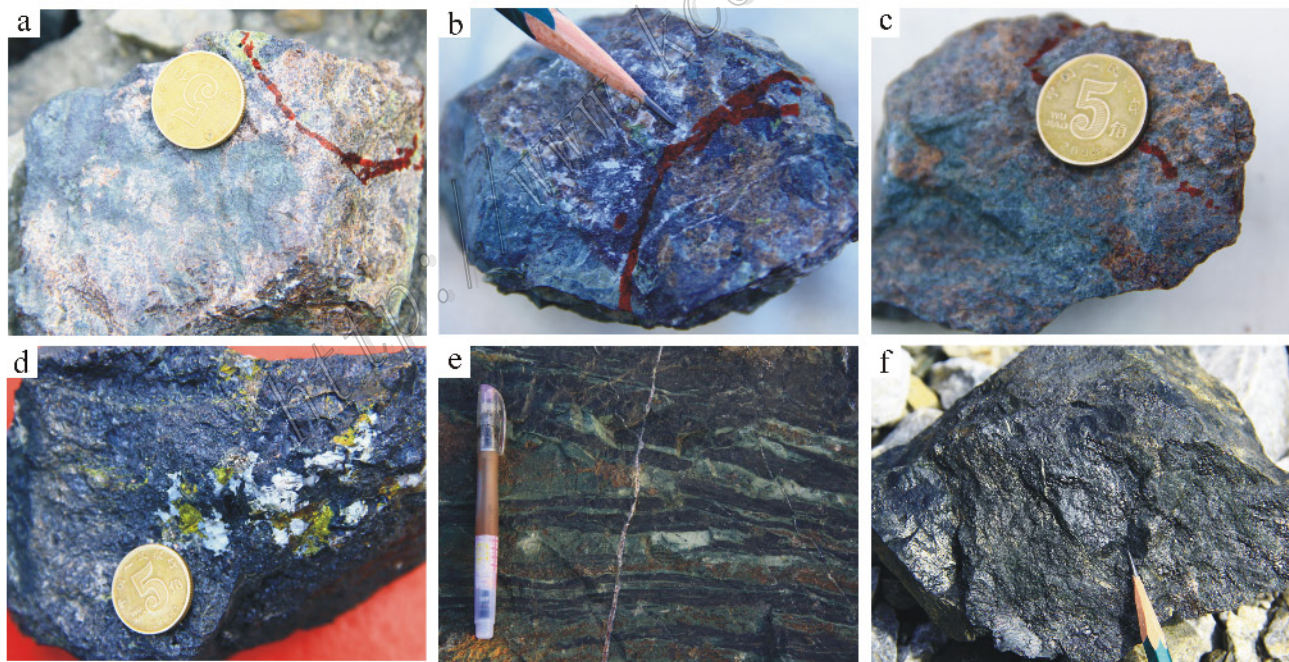


图 4 磁海矿区不同矿段具有代表性的矿石

a. 磁海矿段含石榴子石透辉石浸染状磁铁矿矿石; b. 磁西矿段含石榴子石透辉石浸染状磁铁矿矿石; c. 磁南矿段含石榴子石透辉石浸染状磁铁矿矿石; d. 磁海矿段含角闪石方解石硫化物的块状磁铁矿矿石; e. 磁西矿段条带状矽卡岩磁铁矿矿石; f. 磁南矿段块状磁铁矿矿石

Fig. 4 Representative iron ores from different ore blocks of the Cihai ore district

a. Disseminated magnetite in garnet-pyroxene skarn of the Cihai ore block; b. Disseminated magnetite in garnet-pyroxene skarn of the Cixi ore block; c. Disseminated magnetite in garnet-pyroxene skarn of the Cinan ore block; d. Massive magnetite with amphibole-calcite-sulfide of the Cihai ore block; e. Banded skarn magnetite of the Cixi ore block; f. Massive magnetite of the Cinan ore block

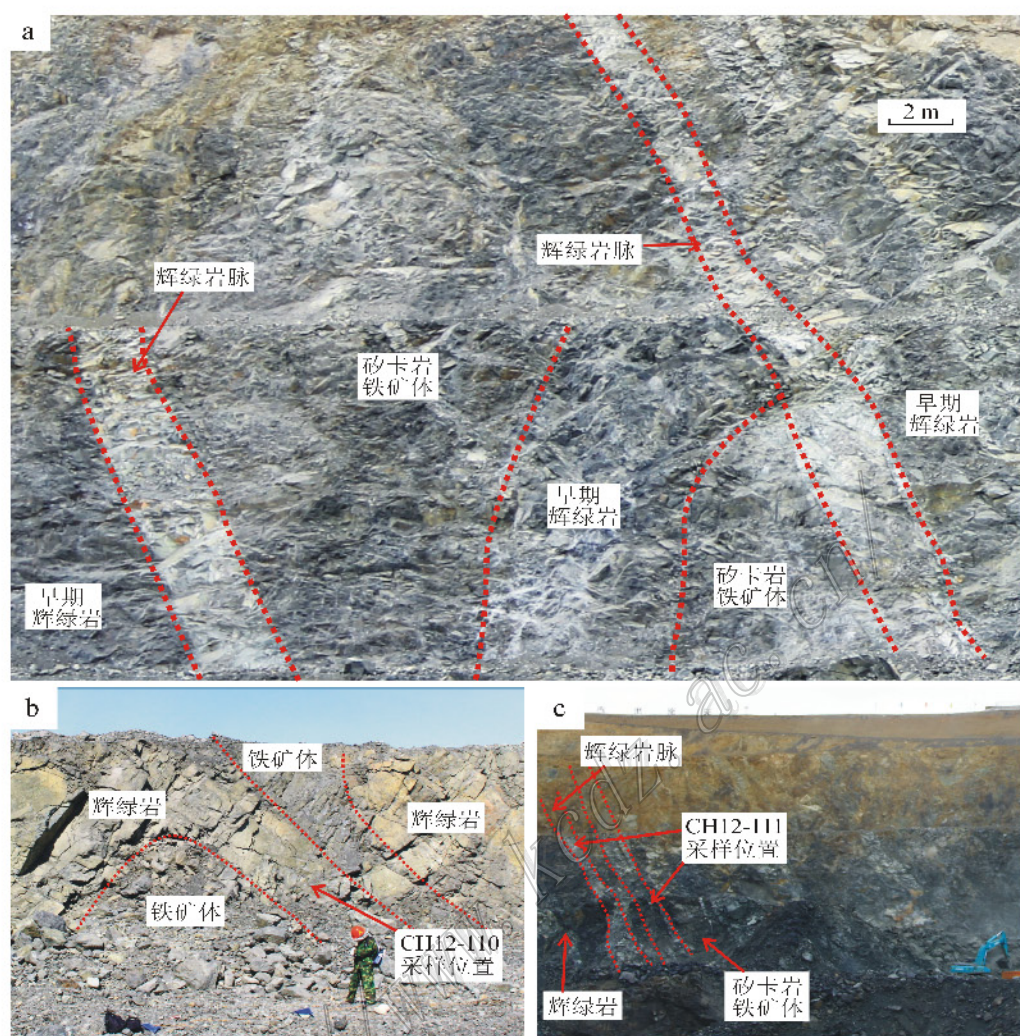


图 5 磁海矿区辉绿岩、矽卡岩铁矿体、辉绿岩脉接触关系及测年样品位置

a. 早期辉绿岩与矽卡岩铁矿体接触, 晚期浅色辉绿岩脉穿切早期辉绿岩和矽卡岩铁矿体; b. 早期辉绿岩与铁矿体接触及早期辉绿岩 CH12-110 采样位置; c. 晚期辉绿岩脉穿切早期辉绿岩和铁矿体及晚期辉绿岩脉 CH12-111 采样位置

Fig. 5 The contact relationship between the early diabase, skarn iron ore and the later diabase vein of the Cihai ore district and the dating sample position

a. Early diabase contact with skarn iron ore; the later diabase cutting through the early diabase and skarn iron ore; b. The relationship of early diabase contact with skarn iron ore and sample position of CH12-110; c. The later diabase cutting through the early diabase and skarn iron ore and sample position of CH12-111

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。锆石定年所用仪器为 Neptune 型 MC-ICP MS 及其配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用的斑束直径为 25 μm , 频率为 10 Hz, 能量密度约为 2.5 J/ cm^2 , 以 He 为载气。信号较小的 ^{207}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{204}Pb (+204Hg)、 ^{202}Hg 用离子计数器接收, 实现了所有目标同位素信号的同时接收, 并且不同质量数的峰基本上都是平坦的, 进而可以获得高精度的数据。锆

石颗粒 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的测试精度 (2σ) 均为 2% 左右, 锆石标准的定年精度和准确度在 1% (2σ) 左右。LA-MC-ICP MS 采用单点剥蚀的方式, 数据分析前用锆石 GJ-1 进行调试仪器, 使之达到最优状态。锆石 U-Pb 定年以锆石 GJ-1 为外标, $w(\text{U})$ 、 $w(\text{Th})$ 以锆石 M127 为外标进行校正。以 Plesovice 锆石标样实时监控仪器的状态以保证测试的精确度。数据处理采用 ICPMSDataCal 4.3 程序 (Liu et al., 2008)。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$ 的分析结果未

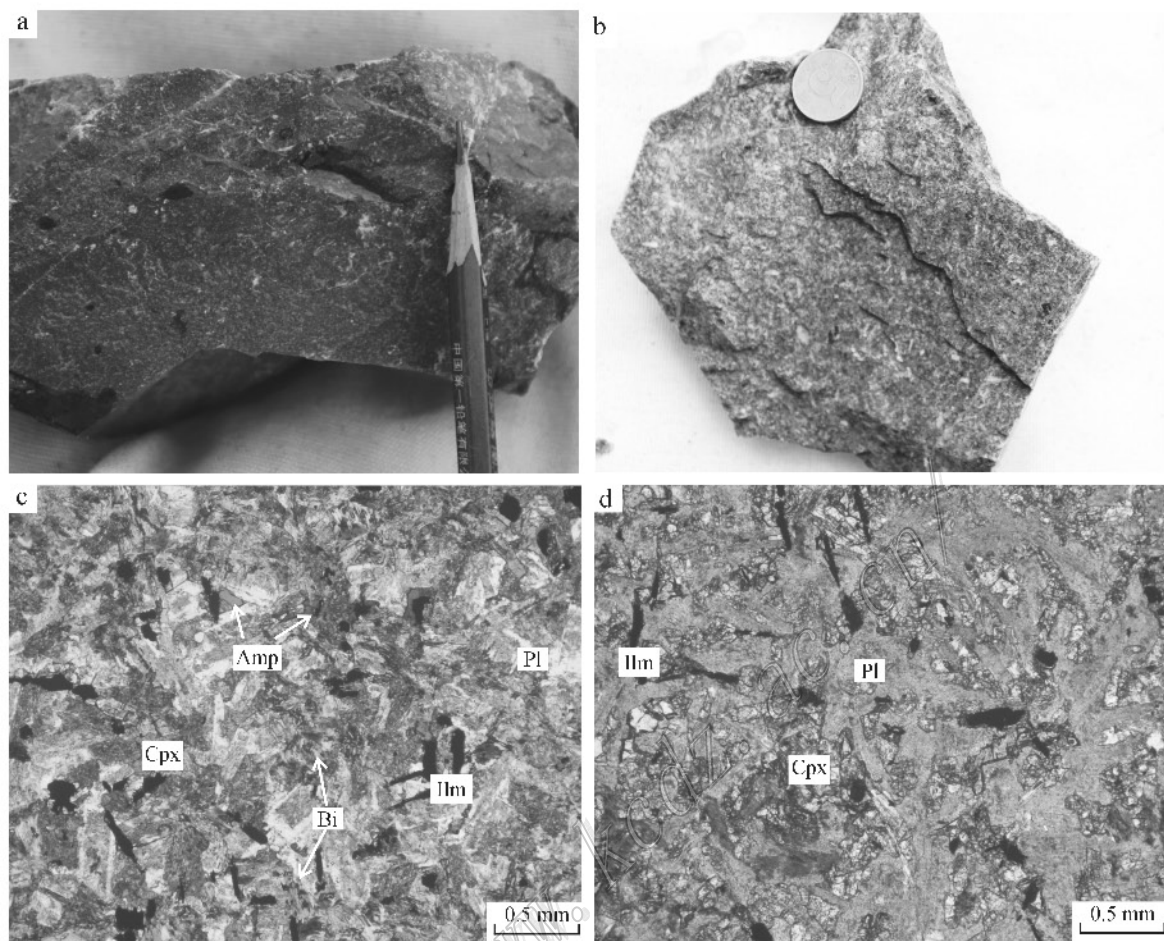


图6 磁海铁矿区辉绿岩和辉绿岩脉特征

a. 辉绿岩手标本呈墨绿色; b. 辉绿岩脉手标本呈灰白色; c. 辉绿岩显微镜下照片, 辉石发生黑云母化和角闪石化; d. 辉绿岩脉显微镜下照片, 辉石较新鲜

Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石; Bi—黑云母; Amp—角闪石; Ilm—钛铁矿

Fig. 6 Photos of diabase and diabase veins in the Cihai iron deposit

a. Dark green early diabase; b. Gray diabase vein; c. Microscope picture of diabase, the Cpx showing biotitization and amphibolization;

d. Microscope picture of diabase vein, the Cpx relatively fresh

Cpx—Clinopyroxene; Pl—Plagioclase; Bi—Biotite; Amp—Amphibole; Ilm—Ilmenite

进行普通铅校正, 可能受包体等普通 Pb 影响的 ^{204}Pb 含量异常高的分析点, 在计算时剔除。年龄计算及谐和图绘制采用 Isoplot 3.0 (Ludwig, 2001)。详细实验过程见侯可军等(2009)。

4 分析结果

辉绿岩(CH12-110)和辉绿岩脉(CH12-111)测年结果见表1, 代表性锆石阴极发光图像及测试位置见图7。

同一岩石中锆石的不同结构构造可具有不同的

成因, Zhu(2011)对新疆天格尔金矿糜棱岩化花岗岩的锆石进行研究, 发现所有岩浆锆石均发育自形的热液边, 部分锆石中捕获的碎屑核、岩浆结晶锆石幔部分和热液成因的边部在阴极发光图像下区别明显, 且同一锆石的碎屑锆石核、岩浆锆石幔和热液锆石边的 U-Pb 年龄和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均不同, 表明同一锆石的不同结构和组成, 代表不同的成因事件和物质来源。

2个样品的阴极发光图像(图7)显示, 所测锆石都未见碎屑成因的核部和热液边, 辉绿岩中锆石大部分呈短柱状, 晶形比较完整, 颗粒大小不一, 部分

续表 1
Cont. Table 1

序号	点号	$w(B)/10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$		$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$		年龄/Ma		年龄/Ma	
		U	Th	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ
11	CH12-111-14	115.85	307.65	0.05202	0.00066	0.32209	0.00470	0.04494	0.00038	283.4	2.4	287.1	32.4	283.5	3.6
12	CH12-111-15	137.90	317.61	0.05196	0.00061	0.31225	0.00463	0.04364	0.00046	275.4	2.8	283.4	25.9	275.9	3.6
13	CH12-111-16	74.56	129.86	0.05204	0.00112	0.30979	0.00721	0.04337	0.00069	273.7	4.3	287.1	52.8	274.0	5.6
14	CH12-111-17	159.08	245.25	0.05199	0.00052	0.31350	0.00360	0.04379	0.00034	276.3	2.1	283.4	24.1	276.9	2.8
15	CH12-111-18	97.07	134.30	0.05238	0.00156	0.32250	0.00932	0.04475	0.00053	282.2	3.3	301.9	68.5	283.8	7.2
16	CH12-111-19	235.81	507.61	0.05305	0.00063	0.33083	0.00433	0.04524	0.00033	285.3	2.0	331.5	30.6	290.2	3.3
17	CH12-111-20	84.11	144.85	0.05275	0.00759	0.32624	0.03548	0.04508	0.00162	284.2	10.0	316.7	300.0	286.7	27.2
18	CH12-111-21	147.84	300.75	0.05201	0.00052	0.32480	0.00375	0.04536	0.00034	285.9	2.1	287.1	24.1	285.6	2.9
19	CH12-111-22	133.10	252.07	0.05241	0.00056	0.31513	0.00385	0.04367	0.00034	275.6	2.1	301.9	24.1	278.2	3.0
20	CH12-111-23	229.81	221.71	0.05476	0.00093	0.33827	0.00843	0.04499	0.00096	283.7	5.9	394.5	32.4	295.9	6.4
21	CH12-111-24	250.96	256.07	0.05484	0.00048	0.34123	0.00369	0.04515	0.00034	284.7	2.1	405.6	23.1	298.1	2.8
22	CH12-111-27	217.65	298.01	0.05770	0.00048	0.36049	0.00377	0.04542	0.00040	286.3	2.4	516.7	50.9	312.6	2.8
23	CH12-111-28	209.67	478.52	0.05319	0.00051	0.32505	0.00329	0.04442	0.00031	280.2	1.9	344.5	22.2	285.8	2.5
24	CH12-111-30	91.82	172.27	0.05285	0.00259	0.33221	0.01737	0.04560	0.00100	287.4	6.2	320.4	113.0	291.3	13.2

注：Pb₀和 Pb* 分别表示普通铅和放射性质铅，应用实测²⁰⁶Pb 校正铀石中的普通铅，采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄。

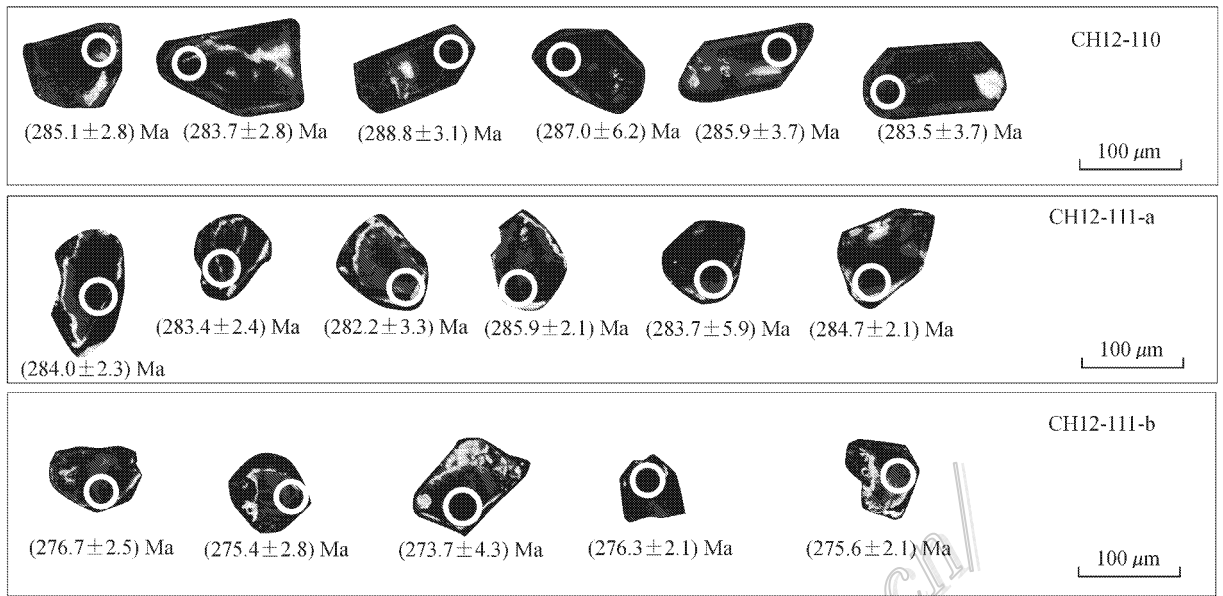


图 7 磁海铁矿床辉绿岩和辉绿岩脉的代表性锆石 CL 图像及测年位置点

Fig. 7 Cathodoluminescence images of zircon and sites of analyzed points from the diabase and diabase veins of the Cihai iron deposit

锆石发育岩浆结晶环带。辉绿岩脉中锆石呈短柱状,可见锆石环带结构。辉绿岩中锆石的 Th/U 比值为 $0.49 \sim 6.35$,辉绿岩脉中锆石的 Th/U 比值为 $0.88 \sim 3.11$,均为岩浆成因锆石,其年龄代表岩浆结晶时间(Belousova et al., 2002; 吴元保等, 2004)。

辉绿岩(CH12-110)中锆石共测定 20 个点,其中点 CH12-110-1、CH12-110-4、CH12-110-8、CH12-110-13、CH12-110-20 的谐和度(Concordance)均小于 90%,不参与年龄的计算;点 CH12-110-3 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 297.1 Ma ,可能为二叠纪火山岩中的锆石;点 CH12-110-11 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 257.1 Ma ,观察透反射光发现有细小包体,可能是导致所测年龄偏年轻的原因,以上数据点不参与年龄的计算。其余 13 个点的年龄均分布于 $280.7 \sim 289.5 \text{ Ma}$,且均落在谐和线上或附近成群分布(图 8a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(286.5 \pm 1.8) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.55),可以代表辉绿岩形成时代。

辉绿岩脉(CH12-111)中锆石共测定 30 个点,其中 CH12-111-2、CH12-111-9、CH12-111-12、CH12-111-25、CH12-111-26、CH12-111-29 的年龄谐和度(Concordance)均小于 90%,不具实际地质意义;点 CH12-111-3 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 303.8 Ma ,可能为岩浆上升过程中捕获的老锆石。其余 23 个点的年龄结果均落在年龄谐和线上及其附近(图 8b),又可

将它们分为 2 组:一组为 5 个测点(CH12-111-11、CH12-111-15、CH12-111-16、CH12-111-17、CH12-111-22)成群分布为一组, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 $273.7 \sim 276.7 \text{ Ma}$,加权平均年龄为 $(275.8 \pm 2.2) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.12)(图 8d);另外一组为 18 个测点成群分布, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在 $279.8 \sim 287.5 \text{ Ma}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(284.8 \pm 1.3) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.67)(图 8c)。值得注意的是,上述代表绝大多数测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $[(284.8 \pm 1.3) \text{ Ma}]$ 与辉绿岩中锆石的加权平均年龄 $[(286.5 \pm 1.8) \text{ Ma}]$ 在误差范围内一致,且二者的锆石形态相似(图 7)。考虑到辉绿岩脉与辉绿岩及铁矿体的野外地质关系,辉绿岩脉应晚于辉绿岩形成,矿区内出露的主要都是辉绿岩,辉绿岩脉所占比例较小。因此,笔者认为虽然大多数锆石年龄在 284 Ma 左右,但并不代表辉绿岩脉的结晶时间,可能是由于辉绿岩脉在上升侵位过程中捕获了早期辉绿岩中大量的锆石所致,而 5 个测点的加权平均年龄则代表辉绿岩脉的形成时代,即 275.8 Ma 左右。

5 讨论

5.1 成矿时代约束

前人对磁海铁矿进行了年代学研究,但争议比

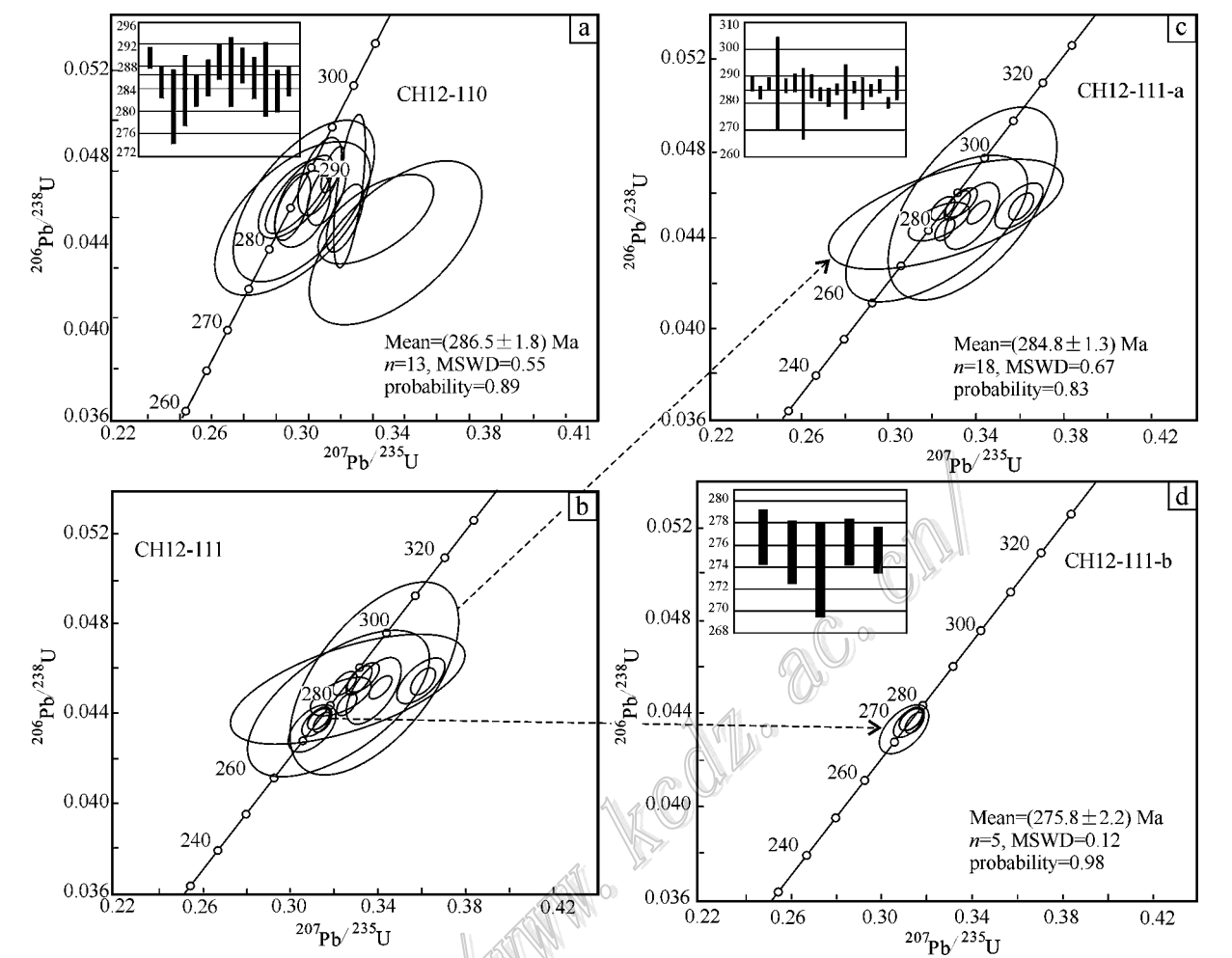


图 8 磁海矿段辉绿岩、辉绿岩脉锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图
a. 辉绿岩锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图；b. 辉绿岩脉锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图；c. 辉绿岩脉第一组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图；d. 辉绿岩脉第二组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图

Fig. 8 Zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram of the diabase and diabase veins in the Cihai iron deposit
a. Diabase zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram ; b. Diabase vein zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram ; c. First group of diabase vein zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram ; d. Second group of diabase vein zircon $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ concordia diagram

较大,如张明书等(1980)用 K-Ar 法测得磁海矿床基性杂岩体蚀变角闪石的形成时代为 196.6 Ma、250.0 Ma 和 260.3 Ma,薛春纪等(2000)获得 5 个辉绿岩样品全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 (268 ± 7) Ma,而李华芹等(2004)测得矿区内辉绿玢岩 Rb-Sr 全岩等时线年龄为 (268 ± 25) Ma;Hou 等(2013)获得磁海辉绿岩的 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄为 (128.5 ± 0.3) Ma;Huang 等(2013)测得黄铁矿平均 Re-Os 模式年龄为 (262.3 ± 5.6) Ma($n=13$,包括磁西矿段),其中,磁海矿段 Re-Os 等时线年龄为 (262 ± 34) Ma($n=4$,MSWD=0.06),误差范围较大。这些年

龄变化的范围较大,从 268 Ma 到 128 Ma,相差 140 Ma。

矿床地质特征表明,铁矿体主要呈致密块状赋存于辉绿岩体和矽卡岩中,部分呈浸染状-稠密浸染状赋存于与辉绿岩接触的矽卡岩中,铁矿主要形成于退化蚀变矽卡岩阶段,成矿期后穿切矿体的辉绿岩脉的年代学也可以限定成矿上限。本文获得辉绿岩 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄为 (286.5 ± 1.8) Ma,误差范围为 0.63%;辉绿岩脉成岩年龄为 (275.8 ± 2.2) Ma,误差范围为 0.80%。与前人获得的辉绿岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄相比,年龄测试

误差小(均小于 1%),具有较高的置信度。前人所获辉绿岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄(268 Ma)比本次获得的(286.5±1.8)Ma 和(284.8±1.3)Ma 年轻,可能是后期较强的构造热事件破坏了 Rb-Sr 体系造成的。因此,本次获得的辉绿岩和辉绿岩脉 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄对磁海铁矿床成矿时代的厘定提供了更为精确的年代学约束。

磁铁矿矿体的围岩——辉绿岩的成岩年龄为(286.5±1.8)Ma 和(284.8±1.3)Ma,可代表成矿年龄的下限,而穿切矿体的辉绿岩脉的成岩年龄为(275.8±2.2)Ma,限定了成矿时代的上限,即限定磁海铁矿床的形成时间为 286~275 Ma,属于早二叠世成矿。

5.2 区域成矿事件

东天山是在古生代由不同地体逐渐拼接形成的(Xiao et al., 2004; Charvet et al., 2011),这些地体之间的界线主要是在二叠纪活动的大规模走滑断层(Wang et al., 2010)。现有的资料和研究结果表明,东天山地区的镁铁质-超镁铁质岩体形成时代多为早-中二叠世。如东天山黄山东岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(274±3)Ma(韩宝福等, 2004);白石泉铜镍矿区镁铁质岩为(284±9)Ma、(284±8)Ma 和(284.8±4.5)Ma(吴华等, 2005; Su et al., 2011),其中矿化辉长岩的锆石 LA-MC-ICP MS 年龄为(281.2±0.9)Ma(毛启贵等, 2006);中天山地块天宇铜镍矿区辉长岩锆石 LA-MC-ICP MS 年龄为(290.2±3.4)Ma(唐冬梅等, 2009);北山地区坡北基性-超基性岩带 10 号岩体的辉长岩锆石 SHRIMP 年龄为(289±13)Ma(李华芹等, 2009)。与之对应的是,东天山与镁铁质-超镁铁质岩密切相关的 Cu-Ni 硫化物矿床的形成年龄也多集中在 298~282 Ma,如黄山东硫化物 Re-Os 等时线年龄分别为(282±20)Ma 和(284±14)Ma(毛景文等, 2002; Zhang et al., 2008);香山磁黄铁矿的 Re-Os 等时线年龄为(298±7.1)Ma(李月臣等, 2006)。

关于这些镁铁质-超镁铁质岩体的成因,目前主要存在以下 3 种认识:①是碰撞后伸展环境下岩浆活动的结果(吴华等, 2005; 陈斌等, 2013);②形成于与俯冲作用有关的岛弧环境或活动大陆边缘环境(Xiao et al., 2004; 毛启贵等, 2006);③可能与塔里木二叠纪玄武岩有关,均为地幔柱活动的相关产物(毛景文等, 2006; Mao et al., 2008; Zhou et al., 2009)。

唐萍芝等(2010)对磁海矿区早二叠世的镁铁质

-超镁铁质岩石进行了地球化学特征分析,认为它属于钙碱性玄武岩系列,形成于相对拉张的构造环境。东天山地区镁铁质-超镁铁质岩体的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、微量元素特征以及锆石 Hf-O 同位素表明,其岩浆源区具有亏损地幔的特征并经历了俯冲板片的改造;其锆石 Hf 亏损地幔模式年龄及区域上蛇绿岩的年代学研究表明,东天山以北的准噶尔洋可能在 600 Ma 左右时开始向南俯冲,至 310 Ma 左右时大洋闭合进入碰撞造山阶段,在 290~269 Ma 期间为造山后伸展阶段(Qin et al., 2011; Su et al., 2011)。塔里木地区 280 Ma 左右的地幔柱活动在东天山与造山后伸展的叠加作用使得幔源岩浆活动广泛发育。Mao 等(2012)获得北山坡北地区穿切与 Cu-Ni 硫化物矿床相关的镁铁质-超镁铁质岩体(290~270 Ma)的碱性岩墙群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为(252±9)Ma,总体与西伯利亚地盾和峨眉山溢流玄武岩 260~250 Ma 二叠纪地幔柱事件一致,认为峨眉山事件与北山地区的岩墙群有联系,而 290~270 Ma 的板内岩浆活动反映了早期阶段的地幔柱活动。

目前,尽管对磁海铁矿床的成因类型和成矿机制还存在争议,主要观点有次火山岩-矿浆贯入-热液交代型(赵玉社, 2000)、次火山热液型(薛春纪等, 2000)、矽卡岩型(赵一鸣等, 2012)和 Cornwall 型(Hou et al., 2013),但其矿床地质特征(张明书等, 1980; 盛继福, 1985)、矿物学特征(王玉往等, 2006)、地球化学特征(唐萍芝等, 2010)等均显示磁海铁矿床的形成与辉绿岩关系密切。本次研究获得磁铁矿矿体直接围岩辉绿岩成岩年龄为(286.5±1.8)Ma 和(284.8±1.3)Ma,穿切矿体的辉绿岩脉成岩年龄为(275.8±2.2)Ma,表明磁海铁矿的主要成矿年龄为 286~275 Ma,属于东天山地区与镁铁质-超镁铁质岩有关的岩浆活动大规模成矿作用的一部分。

综上所述,东天山地区大量的镁铁质-超镁铁质岩浆活动主要发生在早二叠世,形成于伸展环境下,这种伸展环境可能与地幔柱活动有关(毛景文等, 2006; Mao et al., 2008, 2012; Zhou et al., 2009; Qin et al., 2011; Su et al., 2011)。笔者认为,磁海矿区辉绿岩与辉绿岩脉的侵入和铁矿成矿作用是东天山早二叠世大规模镁铁质-超镁铁质岩浆活动和铜镍等成矿事件的重要组成部分。

6 结 论

(1)磁海大型铁矿床赋存于辉绿岩中。辉绿岩

的 LA-MC-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄为 (286.5 ± 1.8) Ma 和 (284.8 ± 1.3) Ma,晚期穿切辉绿岩及铁矿体的辉绿岩脉的年龄为 (275.8 ± 2.2) Ma,表明磁海铁矿床形成于 286~275 Ma,为早二叠世成矿。

(2)磁海铁矿床的形成与东天山地区早二叠世大规模的镁铁质-超镁铁质岩浆活动及铜镍成矿事件密切相关,形成于碰撞后的伸展构造环境中。

志 谢 野外工作得到磁海铁矿崔登献矿长的帮助,两位审稿人对本文提出了建设性的意见,在此一并表示感谢。

参考文献/References

- 陈 斌,贺敬博,陈长键,木合塔尔扎日. 2013. 东天山白石泉镁铁-超镁铁杂岩体的 Nd-Sr-Os 同位素成分及其对岩浆演化的意义[J]. 岩石学报, 29(1): 294-302.
- 陈毓川,刘德全,唐延龄,王登红,董连慧,徐 新,王晓地,等. 2008. 中国天山矿产及成矿体系(上册)[M]. 北京:地质出版社. 1-580.
- 韩宝福,李建清,宋 彪,陈立辉,李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 49(22): 2324-2328.
- 何国琦,徐 新. 2004. 中国新疆天山地质与矿产论文集[M]. 北京:地质出版社. 1-252.
- 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.
- 李华芹,陈富文,等. 2004. 中国新疆区域成矿作用年代学[M]. 北京:地质出版社. 1-332.
- 李华芹,梅玉萍,屈文俊,蔡 红,杜国民. 2009. 新疆坡北基性-超基性岩带 10 号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及意义[J]. 矿床地质, 28(5): 633-642.
- 李月臣,赵国春,屈文俊,潘成泽,毛启贵,杜安道. 2006. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定[J]. 岩石学报, 22(1): 245-252.
- 毛景文,杨建民,屈文俊,杜安道,王志良,韩春明. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义[J]. 矿床地质, 21(4): 323-330.
- 毛景文, Franco P, 张作衡,柴凤梅,杨建民,吴 华,陈世平,程松林,张长青. 2006. 天山-阿尔泰东部地区海西晚期后碰撞铜镍硫化物矿床:主要特点及可能与地幔柱的关系[J]. 地质学报, 80(7): 925-942.
- 毛启贵,肖文交,韩春明,孙 敏,袁 超,闫 臻,李继亮,雍 拥,张继恩. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. 岩石学报, 22(1): 153-162.
- 秦克章,方同辉,王书来,朱宝清,冯益民,于海峰,修群叶. 2002. 东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J]. 新疆地质, 20(4): 302-308.
- 盛继福. 1985. 新疆磁海铁矿蚀变特征[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, 3: 89-109.
- 唐冬梅,秦克章,孙 赫,苏本勋,肖庆华,程松林,李 军. 2009. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征:对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约[J]. 岩石学报, 25(4): 817-831.
- 唐萍芝,王京彬,王玉往,龙灵利. 2010. 新疆磁海铁矿区镁铁超镁铁岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球化学, 39(6): 542-552.
- 王登红,李纯杰,陈郑辉,陈世平,肖克炎,李华芹,梁 婷. 2006. 东天山成矿规律与找矿方向初步研究[J]. 地质通报, 25(8): 910-915.
- 王登红,陈世平,王 虹,孟祥贵,陈郑辉,王成辉,李纯杰. 2007. 成矿谱系研究及其对东天山铁矿找矿问题的探讨[J]. 大地构造与成矿学, 31(2): 186-192.
- 王义天,毛景文,陈 文,杨富全,杨建民. 2006. 新疆东天山康古尔塔格金矿带成矿作用的构造制约[J]. 岩石学报, 22(1): 236-244.
- 王玉往,沙建明,程 春. 2006. 新疆磁海铁(钴)矿床磁铁矿成分及其成因意义[J]. 矿床地质, 25(增刊): 321-324.
- 吴 华,李华芹,莫新华,陈富文,路远发,梅玉萍,邓 岗. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义[J]. 地质学报, 79(4): 498-502.
- 吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 49(16): 1589-1604.
- 薛春纪,姬金生. 1999. 新疆磁海铁矿床成矿无机化学过程研究[J]. 新疆地质, 17(3): 270-276.
- 薛春纪,姬金生,杨前进. 2000. 新疆磁海铁(钴)矿床次火山热液成矿学[J]. 矿床地质, 19(2): 156-164.
- 张明书,张见中,郭介人,陈书章,金浩甲,李世强. 1980. 磁海式铁矿地质特征初步研究[J]. 地质与勘探, 8: 25-32.
- 赵一鸣,林文蔚,毕承思,李大新,蒋崇俊. 2012. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京:地质出版社. 1-411.
- 赵玉社. 2000. 新疆磁海铁矿床地质特征及其矿床成因[J]. 西北地质, 33(1): 31-38.
- 朱永峰,何国琦,安 芳. 2007. 中亚成矿域核心地区地质演化与成矿规律[J]. 地质通报, 26(9): 1167-1177.

- 左国朝, 李邵雄, 于守南, 李秋林. 2004. 新疆磁铁矿床产出特征及构造演化[J]. 西北地质, 37(2): 53-61.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y and Fisher N I. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143: 602-622.
- Charvet J, Shu L, Laurent-Charvet S, Wang B, Faure M, Cluzel D, Chen Y and De Jong K. 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China[J]. Science China Earth Sciences, 54(2): 166-184.
- Eugster H P and Chou I M. 1979. A model for the deposition of Cornwall-type Magnetite deposits[J]. Econ. Geol., 74: 763-774.
- Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, Zhang L, Chen J F and Song B. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China[J]. Geological Society of America Bulletin, 122(3-4): 627-640.
- Hou T, Zhang Z C, Santosh M, Encarnacion J and Wang M. 2013. The Cihai diabase in the Beishan region, NW China: Isotope geochronology, geochemistry and implications for Cornwall-style iron mineralization[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 70-71: 231-249.
- Huang X W, Zhou M F and Qi L. 2013. Re-Os isotopic ages of pyrite and chemical composition of magnetite from the Cihai magmatic-hydrothermal Fe deposit, NW China[J]. Miner Deposita, DOI 10.1007/s00126-013-0467-2.
- Lee J, Williams I and Ellis D. 1997. Pb, U and Th diffusion in nature zircon[J]. Nature, 390(13): 159-162.
- Li H Q, Chen F W, Lu Y F, Yang H M, Guo J and Mei Y P. 2005. New chronological evidence for indosinian diagenetic mineralization in Eastern Xinjiang, NW China[J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 79(2): 264-275.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G and Chen H 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.
- Ludwig K R. 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2. 49[M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication. 1-56.
- Mao J W, Yang J M, Du A D, Han C M and Wang Z L. 2003. Re-Os age of Cu-Ni ores from the Huangshandong Cu-Ni sulfide deposit in East Tianshan and its geodynamic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 77(2): 220-226.
- Mao J W, Goldfarb R J, Wang Y T, Hart C J, Wang Z L and Yang J M. 2005. Late Paleozoic base and precious metal deposits, East Tianshan, Xinjiang, China: Characteristics and geodynamic setting[J]. Episodes, 28(1): 23-36.
- Mao J W, Franco P, Zhang Z H, Chai F M, Wu H, Chen S P, Cheng S L, Yang J M and Zhang C Q. 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes[J]. Journal of Asian Earth Science, 32: 184-203.
- Mao J W, Franco P, Zhang Z H and Wan Y S. 2012. SHRIMP zircon U-Pb dating of alkaline dykes in Pobei area, Beishan Rift, Xinjiang Autonomous region, China: Implications for tectonic setting and mantle plume events[J]. Acta Geologica Sinica, 86(4): 879-884.
- Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, Tang D M, Li X H, Sun H, Xiao Q H and Liu P P. 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. American Journal of Science, 311(3): 237-260.
- Rose A W, Herrick D C and Deines P. 1985. An Oxygen and sulfur isotope study of skarn-type magnetite deposits of the Cornwall type, Southeastern Pennsylvania[J]. Econ. Geol., 80: 418-443.
- Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, Li X H, Yang Y H, Sun H, Tang D M, Liu P P, Xiao Q H and Malaviarachchi S P K. 2011. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early-Permian mantle plume[J]. Gondwana Research, 20: 516-531.
- Su B X, Qin K Z, Sun H, Tang D M, Sakyi P A, Chu Z Y, Liu P P and Xiao Q H. 2012. Subduction-induced mantle heterogeneity beneath Eastern Tianshan and Beishan: Insights from Nd-Sr-Hf-O isotopic mapping of Late Paleozoic mafic-ultramafic complexes[J]. Lithos, 134-135: 41-51.
- Wang Q, Shu L and Charvet J. 2010. Understanding and study perspectives on tectonic evolution and crustal structure of the Paleozoic Chinese Tianshan[J]. Episodes, 33(4): 242-266.
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S and Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. American Journal of Science, 304(4): 370-395.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, Han C M, Qu J F, Zhang J E, Ao S J, Guo Q Q, Clever N R, Lin S F, Shan Y H and Li J L. 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. American Journal of Science, 310(10): 1553-1594.

- Yang F Q, Mao J W, Bierlein F P, Pirajno F, Xia H D, Zhao C S, Ye H S and Liu F. 2009. A review of the geological characteristics and geodynamic mechanisms of Late Paleozoic epithermal gold deposits in North Xinjiang, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 35 :217-234.
- Zhang Z H, Mao J W, Du A D, Pirajno F, Wang Z L, Chai F M, Zhang Z C and Yang J M. 2008. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in the northern Xinjiang, NW China and its geological significance[J]. *Journal of Asia Earth Sciences*, 32 :204-217.
- Zhang Z H, Hong W, Jiang Z S, Duan S G, Li F M and Shi F P. 2014. Geological characteristics and metallogenesis of iron deposits in western Tianshan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 57 :425-440.
- Zhang Z Z, Gu L X, Wu C Z, Li W Q, Xi A H and Wang S. 2005. Zircon SHRIMP dating for the Weiya pluton, eastern Tianshan: Its geological implications[J]. *Acta Geologica Sinica (English edition)*, 79(4):481-490.
- Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y, Gao J F, Wang W and Yang S H. 2009. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province[J]. *Lithos*, 113 :583-594.
- Zhu Y F. 2011. Zircon U-Pb and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the gold-bearing Tianger mylonitized granite, granite, Xinjiang, northwest China: Implications for radiometric dating of mylonitized magmatic rocks[J]. *Ore Geology Reviews*, 40 :108-121.

<http://www.kcdz.ac.cn/>