新疆磁海铁矿区镁铁质岩及正长岩锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学特征:对成岩、成矿作用的制约*

陈博[1,2,3] 秦克章[1**] 唐冬梅[1] 毛亚晶[1] 冯宏业[4] 薛胜超[1,2] 姚卓森[1,2]

CHEN Bo[1,2,3], QIN KeZhang[1**], TANG DongMei[1], MAO YaJing[1], FENG HongYe[4], XUE ShengChao[1,2] and YAO ZhuoSen[1,2]

1. 中国科学院矿产资源研究重点实验室,中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029
2. 中国科学院大学,北京 100049
3. 中铁资源集团投资有限公司,北京 100039
4. 华北理工大学,唐山 063009

1. *Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3. *China Railway Resources Investment Ltd, Beijing* 100039, *China*
4. *North China University of Science and Technology, Tangshan* 063009, *China*

2014-11-11 收稿, 2015-01-18 改回.

Chen B, Qin KZ, Tang DM, Mao YJ, Feng HY, Xue SC and Yao ZS. 2015. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Cihai iron deposit, Eastern Xinjiang: Constraints on genesis of mafic-ultramafic and syenite intrusions and mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8):2156 – 2174

Abstract Interpretation of the relationship between mafic-ultramafic rocks and iron mineralization, as well as the relationship between syenite and mafic rocks in Cihai iron district is the key to understand the diagenesis, metallogenetic process and tectonic settings. SIMS Zircon U-Pb dating for diabase, gabbro-diabase in Cihai, gabbro in Cinan, and amphibole-quartz-syenite in Cibei yields results of 275.1 ± 2.2Ma, 281.9 ± 3.2Ma, 273.0 ± 1.9Ma and 273.0 ± 1.8Ma respectively, which is coincident with the age of mafic-ultramafic rocks containing nickel, copper and V-Ti-magnetite in Beishan and Xinjiang regions. Characteristics of rock geochemistry show the process that from peroxenite to gabbro then to diabase, the Ti enriches gradually and the value of $Mg^{\#}$ and m/f first increase and then decrease. The amphibole-quartz-syenite, with signature of A-type granite, has complementary relation with gabbro and diabase in rock genesis. The features of geochronology and geochemistry indicate that pyroxenite, gabbro in Cinan, diabase, gabbro-diabase in Cihai and amphibole-quartz-syenite in Cibei belong to the comagmatic evolutionary series. The magma evolution is slightly contaminated by crust. During the early stage of magma evolution, the fractional crystallization of magnetite dominates the change of magma component. While the magma developed to the gabbro stage, crystallization differentiation plays the key role. Fractional crystallization of magnetite is earlier than ilmenite. Magmatic sulphide is the transitional product of magnetite and ilmenite crystallization. The diagenesis and metallogeny of mafic-ultramafic rocks in Cihai iron district may be temporarily and spatially associated with the Early-Permian Tarim Large Igneous Province.

Key words Cihai Fe deposit; Mafic-ultramafic intrusions; Syenite; Zircon U-Pb age; Petro-geochemsity; Beishan

摘 要 对新疆磁海铁矿区镁铁-超镁铁质岩与铁成矿关系、正长岩与镁铁质岩关系的解剖,是认识磁海矿区成岩、成矿过程及构造背景的关键。本文利用 SIMS 锆石 U-Pb 测年法,获得磁海辉绿岩、辉长辉绿岩、磁南辉长岩、磁海北角闪石英正长岩的 $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和年龄分别为 275.1 ± 2.2Ma、281.9 ± 3.2Ma、273.0 ± 1.9Ma 和 273.0 ± 1.8Ma,这与北山乃至北疆地区主要含铜镍-钒钛磁铁矿的镁铁-超镁铁质岩年龄一致。岩石地球化学特征研究显示,从辉石岩到辉长岩,再到辉绿岩,经历

* 本文受国家自然科学重点基金项目(41030424)资助.

第一作者简介:陈博,男,1977 年生,工程师,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: cb@crri.cn

** **通讯作者**:秦克章,男,1964 年生,研究员,从事造山带与成矿作用研究,E-mail: kzq@mail.iggcas.ac.cn

了 Ti 逐渐富集、$Mg^{\#}$和 m/f 值先增加后降低的过程，角闪石英正长岩具有 A 型花岗岩特征，与辉长岩、辉绿岩在成因上存在互补关系。综合年代学和地球化学特征，磁南辉石岩、辉长岩、磁海辉绿岩、辉长辉绿岩以及磁海北边的角闪石英正长岩为同源岩浆演化的产物，岩浆演化过程中受地壳混染作用微弱，在岩浆演化的早期，磁铁矿的结晶分离主导着岩浆成分的改变，当岩浆演化到辉长岩阶段，岩浆开始以结晶分异作用为主；磁铁矿的分离结晶时间早于钛铁矿，岩浆型的金属硫化物为磁铁矿和钛铁矿结晶过渡阶段的产物。磁海镁铁-超镁铁质岩石在成岩及成矿作用上可能与在时间和空间上相邻近的塔里木早二叠世大火成岩省有密切关系。

关键词　磁海铁矿；镁铁-超镁铁岩；正长岩；锆石 U-Pb 测年；岩石地球化学；北山

中图法分类号　P588.122；P588.124；P597.3

磁海铁矿区位于塔里木陆块东北缘北山构造-成矿带的西段。北山的北侧为天山-中亚造山带南缘，在东天山和北山地区因产出大量镁铁-超镁铁岩体及相伴的矿床而成为地质界关注的焦点，这些岩体年龄主要集中在早二叠世，所形成的矿化以独立的铜镍矿（如黄山铜镍矿、葫芦铜镍矿、图拉尔根铜镍矿等）或多伴有岩浆铜镍硫化物矿物或显示具有一定的铜镍硫化物成矿潜力。近年来，随着工作的深入，在香山岩体中发现了中型铜镍矿床和大型钛铁矿床共生产出（秦克章，2000；王玉往等，2006b；肖庆华等，2010）。北山镁铁-超镁铁岩体主要由纯橄岩、辉橄岩、橄长岩、橄榄辉长岩和辉长岩组成，各岩相之间呈渐变过渡关系（苏本勋等，2010）。无论在北山还是东天山地区，镁铁-超镁铁岩作为容矿围岩时主要以辉长岩-苏长岩-橄辉岩-辉橄岩为主。位于北山西段磁海铁矿区的镁铁-超镁铁岩石同样为二叠纪岩浆活动的产物，但却以产出磁铁矿为主，伴生少量金属硫化物，且矿体围岩为辉绿岩（唐萍芝等，2010；Huang *et al.*，2013；齐天骄，2013；孟庆鹏等，2014），矿体与围岩的接触界线截然，明显不同于区域上其它矿区。由于磁海单个磁铁矿体围岩为辉绿岩，磁海露天采坑内的铁矿石多为致密块状-半块状磁铁矿石，且矿石中磁铁矿与脉石矿物的粒度均非常细小，导致肉眼难以清晰辨别磁铁矿的含矿岩性，有不少学者就将单矿体围岩辉绿岩作为磁铁矿的含矿岩石，然而通过本次详细的野外观察、室内大量的光薄片鉴定及电子探针分析，在辉绿岩中并未发现磁铁矿，辉石岩才是磁铁矿的主要含矿岩石，遗憾的是前人将更多的研究集中在围岩辉绿岩，对辉石岩的研究显得非常薄弱，更缺乏对整个矿区（磁海、磁南、磁西）主要镁铁-超镁铁岩及磁海周边的正长岩的系统测年、岩相之间的演化关系、不同镁铁-超镁铁岩的含矿性及成矿作用的研究，导致矿床成因认识争议较大，有次火山岩热液型（薛春纪等，2000）、次火山岩-矿浆贯入-热液交代型（赵玉社，2000）、岩浆分异-矿浆贯入-热液交代复合成因（王玉往等，2006a）、矽卡岩型（赵一鸣等，2012）等。目前在国内外发现的岩浆型钛铁氧化物矿床和铜镍硫化物矿床共生的现象非常有限，国内仅有攀西的新街、红格岩体以及近年来在东天山发现的香山岩体中可见，其中，攀西地区的岩体呈大型层状产出，含矿岩体以辉长岩为主，辉石岩次之，矿体与岩体呈整合接触，钛铁氧化物矿体位于岩体上部，含铜镍硫化物的矿层位于岩体下部；香山岩体不具有典型层状岩体特征，含矿岩体为辉长岩，钛铁氧化物与铜镍硫化物并无明显层序或形成的先后关系（肖庆华等，2010）；磁海矿区岩体多呈岩株状产出，含矿岩体为辉石岩，磁铁矿体（有时见少量金属硫化物）呈脉状穿插辉绿岩，与围岩接触界线截然，金属硫化物与磁铁矿存在过渡共生；显然，磁海铁矿在成岩、成矿特征方面与前两者存在明显差异。因此，深入研究磁海铁矿不仅可以探讨矿床成因及成矿机理，对于丰富镁铁-超镁铁岩成矿理论也具有重要意义。本文以磁海矿区主要镁铁-超镁铁质岩及磁海外围北侧的角闪石英正长岩作为研究对象，通过对岩体和矿体的野外地质调查、岩体地质、岩相学及含矿性、年代学和岩石地球化学及区域综合对比研究，试图分析磁海各岩相之间的演化关系、对成岩成矿作用的制约，并探讨其形成的构造动力学背景。

1　区域及矿区地质

磁海矿区大地构造位置位于北山-构造成矿带的西段，北与天山中间隆起带毗邻，南与塔里木地台相靠。在北山构造-成矿带、天山构造-成矿带和塔里木陆块中与幔源岩浆活动有关的镁铁-超镁铁岩体广泛分布：在北山构造-成矿带中磁海、坡北、旋窝岭、红柳河、红石山、笔架山等地出露有大量的镁铁-超镁铁岩体；在其北侧的天山构造-成矿带中有土墩、二红洼、黄山、黄山东、黄山南、香山、葫芦、图拉尔根、圪塔山口、四顶黑山等大量的镁铁-超镁铁岩体出露；在其南侧的塔里木陆块，由二叠纪地幔柱活动形成大火成岩省，在中新生界盖层之下广泛分布溢流玄武岩。区域上这些镁铁-超镁铁岩体呈跨构造单元展布（图 1），前人做了大量的研究工作（秦克章等，2001，2012；韩宝福等，2004；顾连兴等，2006；毛启贵等，2006；周鼎武等，2006；李金祥等，2007；李勇等，2007；潘金花等，2008；李华芹等，2009；Yu *et al.*，2011；苏本勋等，2010；肖庆华等，2010；Qin *et al.*，2011；Tang *et al.*，2011；齐天骄等，2012；Hou *et al.*，2013；冯宏业等，2014；毛亚晶等，2014），确定了其形成时限集中在早二叠世。

磁海矿区由磁海、磁南、磁西 3 个矿段组成（图 2），矿区出露地层主要为元古代蓟县系平头山群及不整合于其上的下二叠统。元古代蓟县系平头山群主要由长英质片岩和大理岩组成，分布在磁海和磁西矿段北部及磁南矿段东部；下

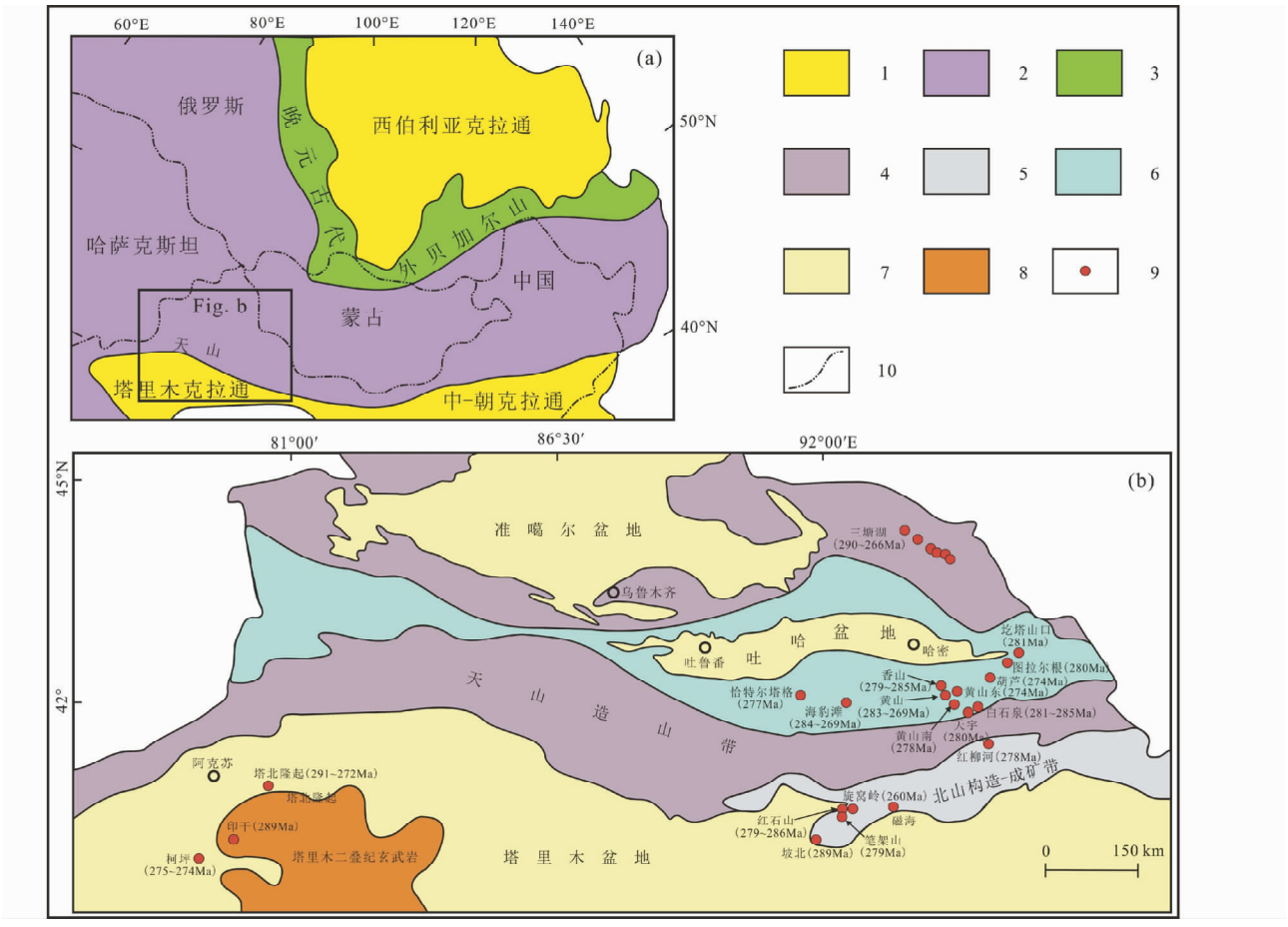

图 1 磁海铁矿所在区域及二叠纪镁铁-超镁铁岩浆岩分布(a, 据 Hou *et al.*, 2013; b,据齐天骄等, 2012 补充修改)

1-克拉通;2-中亚造山带;3-晚元古代 trans-Baiklia;4-天山造山带;5 北山造山带;6-石炭-二叠纪火山岩;7-中新生界盆地;8-塔里木大火成岩省;9-二叠纪基性岩;10-地质界线

Fig. 1 The region of the Cihai iron deposit and the distribution of the Permian basic igneous rock (a, after Hou *et al.*, 2013; b, after Qi *et al.*, 2012)

1-Caron; 2-Central Asia orogenic belt; 3-Late Proterozoic trans-Baiklia; 4-Tianshan terrane; 5-Beishan terrane; 6-Carboniferous-Permian volcanics; 7-Meso-Cenozoic basin; 8-Tarim Large Igneous Province; 9-Pemian mafic-ultranmafice complex; 10-geological boundary

二叠统由老到新为双堡塘组滨-浅海相基性-中性连续火山岩建造和菊石滩组浅海相碎屑岩建造(薛春纪等, 2000),主要分布在矿区的西部。矿区的岩浆活动表现为二叠纪从火山溢流到基性岩浆侵入,形成了区内巨厚火山岩层及辉绿岩、辉绿辉长岩、辉长岩、橄榄辉长岩、辉石岩侵入岩相。

2 岩体地质、岩相学及含矿性

磁海矿区镁铁-超镁铁岩发育,南东-北西向延伸可达10km,北东-南西向宽约 1km,面积约 10km^2。在每个矿段(磁海、磁南、磁西)均有相应的镁铁质岩体分布及相应的铁矿产出。其中磁海矿段为露天开采,磁南和磁西矿段为井工开采,因此只有在磁海矿段(图 3)便于观察岩体的产出形态,采坑内以岩株状产出的辉绿岩-辉长辉绿岩为主;含矿辉石岩或块状-半块状磁铁矿体主要呈板状、脉状、透镜状穿插于辉绿岩或辉长辉绿岩中,矿体总体近直立或略向北倾斜,矿体与围岩辉绿岩-辉长辉绿岩的接触界线截然,呈突变关系。整个磁海矿区的镁铁-超镁铁岩体由辉石岩、橄长岩、橄榄辉长岩、辉长岩、辉长辉绿岩和辉绿岩组成。辉石岩作为磁铁矿主要含矿岩石,在磁海、磁南、磁西均有产出,辉绿岩作为单个磁铁矿体的围岩在各个矿段广泛发育。橄长岩、橄榄辉长岩、辉长岩地表出露有限,主要分布在磁南及磁海与磁南之间。野外观察发现,磁南较磁海的岩相种类更多,岩石基性程度更高,同一岩相矿物结晶程度更好、粒度更大,岩石也较为新鲜,磁西矿段主要岩石类型为辉绿岩,结晶程度最差、粒度最小,岩石蚀变较强,似乎显示出磁南、磁海、磁西镁铁-超镁铁岩体露头剥蚀程度依次减弱、蚀变依次增强的特征。在磁海矿区的北侧见角闪石英正长岩岩体,由于岩体周围均为第四系覆盖,未见其与镁铁质岩石的直接接触关系,岩体风化破碎严重,呈低缓的小山丘产出。

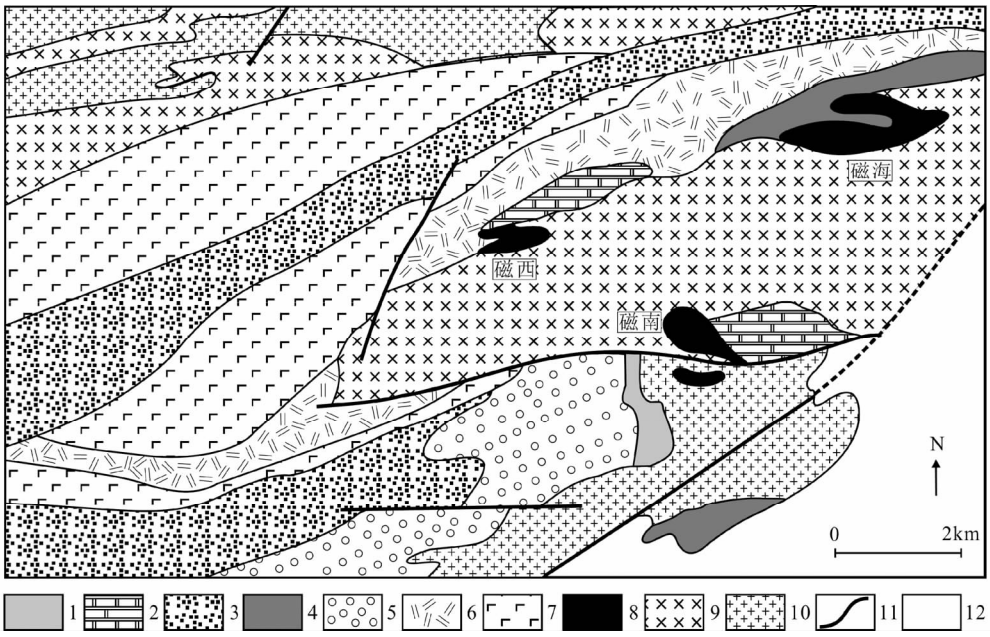

图 2　磁海矿区地质简图(据冶金工业部西北地质勘查局五队, 1999①修改)

1-新元古代片岩;2-新元古代大理岩;3-二叠纪砂砾岩;4-二叠纪凝灰岩;5-二叠纪火山角砾岩;6-二叠纪安山岩;7-二叠纪玄武岩;8-辉绿岩;9-辉长岩;10-花岗岩;11-断层;12-第四系

Fig. 2　Simplified geological map of Cihai iron district

1-Neoproterozoic schist; 2-Neoproterozoic marble; 3-Permian glutenite; 4-Permian tuff; 5-Permian volcanic breccia; 6-Permian andesite; 7-Permian basalt; 8-diabase; 9-gabbro; 10-granite; 11-fault; 12-Quaternary

辉石岩多呈自形等粒结构,块状构造,主要由钙铁辉石和透辉石组成,粒径约 200 ~ 800μm,有时可见少量角闪石、黑柱石、方解石等矿物;新鲜的辉石岩主要在磁南出露(图 4a),矿化的辉石岩以含磁铁矿为主,可见海绵陨铁状磁铁矿石(图 4f),随着矿化程度加强,形成半块状-块状矿石,有时与少量金属硫化物共生(图 4h),有时金属硫化物又独立于磁铁矿而单独形成矿化,如:海绵陨铁状磁黄铁矿化(图 4g)。

辉长岩呈细粒结构,块状构造,主要矿物为单斜辉石(20% ~30%)和斜长石(70% ~80%),其中单斜辉石呈短柱状,半自形-他形,粒径约 100 ~ 800μm,斜长石多呈短柱状,与辉石粒度相当,另见少量磷灰石等副矿物(<1%);新鲜的辉长岩(图 4b)同样在磁南出露,矿化的辉长岩见少量钛铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿,偶见镍黄铁矿。

辉绿岩(图 4d)与辉长辉绿岩在磁海采坑可以采集,辉绿岩具有典型的辉绿结构,块状构造,暗色矿物以单斜辉石(15% ~25%)为主,有时可见少量角闪石及黑云母,单斜辉石粒径多小于 200μm,浅色矿物主要为斜长石(75% ~ 85%),呈自形长柱状,长轴长 200 ~ 600μm,可见少量呈星点状、或星散状分布的针柱状钛铁矿或榍石(图 4c)等副矿物(含量 <1%),辉绿岩通常具有不同程度的蚀变,可见有晚期热液特征形成的黄铜矿、黄铁矿细脉。辉长辉绿岩与辉绿岩渐变过渡,无明显接触界限,与辉绿岩的主要区别在于辉石的自形程度。

值得注意的是,对于钛铁氧化物而言,辉石岩中仅含有单一磁铁矿,不含钛铁矿,而辉长岩、辉绿岩仅含钛铁矿,不含磁铁矿。

在磁海矿区北侧的角闪石英正长岩(图 4e)呈肉红色、中粗粒结构、块状构造,主要矿物成分为碱性长石(80% ~ 85%)、石英(5% ~15%)、角闪石(3% ~5%)。

3　样品采集及分析方法

3.1　样品采集

本次共采集样品 4 件,在磁海矿坑采集样品 2 件,其中 CH1(辉绿岩)采自矿坑标高 1090m 平台,CH59(辉长辉绿岩)采自矿坑标高 1100m 平台;在磁南主采矿井旁采集样品 1 件,即 CHN-10(辉长岩),采样位置为 41°06′30.25″N,93°18′56.08″E,标高 1215m;在磁海矿区外围的北侧方向采集样品 1 件,即 CHB-1(角闪石英正长岩),采样位置为 41°11′13.14″N,93°18′34.22″E,标高 1180m。

3.2　主量元素分析

主量元素分析在中国核工业北京地质研究院分析测试

① 冶金工业部西北地质勘查局五队. 1999. 新疆维吾尔自治区哈密市磁海铁矿Ⅱ期露天采区地质勘探报告

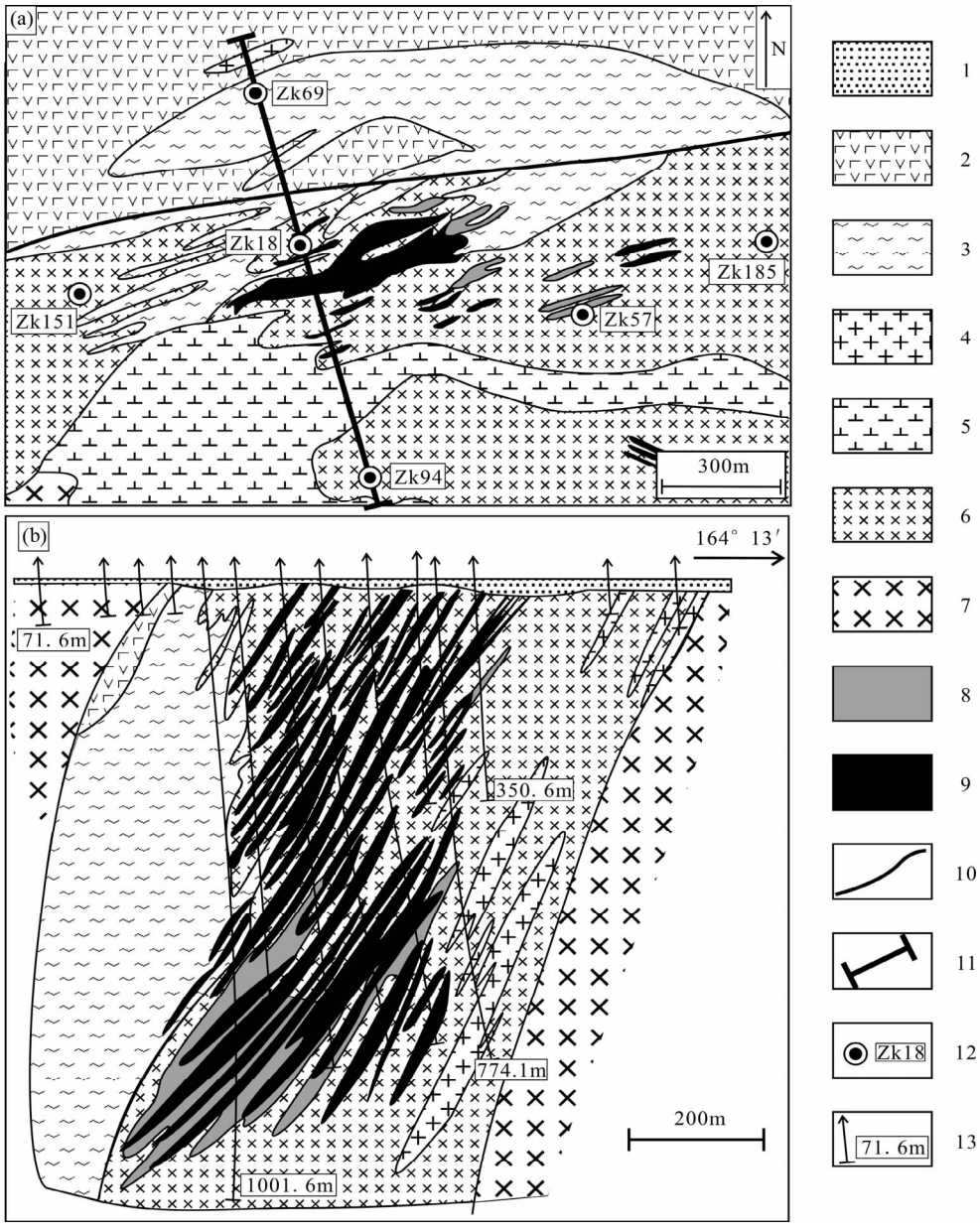

图 3 磁海矿体地质图(a)和勘探线剖面图(b)(据薛春纪等, 2000 修改)

1-第四系盖层;2-下二叠火山岩-火山碎屑岩;3-前寒武变质岩;4-花岗岩;5-闪长岩;6-辉绿岩;7-辉长岩;8-蚀变带;9-铁矿体;10-断层;11-勘探线;12-钻孔;13-钻孔深度

Fig. 3 Geological map of ore bodies at the Cihai iron cluster (a) and cross-section diagram (b) (modified after Xue *et al.*, 2000)

1-Quaternary sediment; 2-Lower Permian volcanic-sedimentary rocks; 3-Precambrain metamorphic rocks; 4-granite; 5-diorite; 6-diabase; 7-gabbro; 8-alteration zone; 9-Fe orebody; 10-fault; 11-exploration line; 12-drill hole; 13-depth of drill hole

研究中心完成。分析方法为:使用 Philips PW2404 型 X 射线荧光光谱法(XRF 法)。将样品在低温下(105℃)烘干,准确称取 0.5000 ~ 0.5007g 样品,将样品加热至 1100℃,测得样品烧失量,然后加入 5.0000 ~ 5.0007g 无水高纯四硼酸锂($Li_2B_4O_7$),在玛瑙研钵中混合均匀,转移到白金坩锅中,在 TR-1000S 熔炉(SHIMSDZU)中加热至 1100℃熔样 10min,迅速取出混合均匀,制成玻璃片,最后在 Shimadzu XRF-1700 上采用外标法测定氧化物含量,分析采用国家一级岩石标样 GBW07101-07114 为基体效应校正,每 10 个样品带一个平行样,以检测试验结果的可靠性,利用标准曲线法校正,分析误差小于 3%。

3.3 微量和稀土元素分析

微量和稀土元素分析在中国核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。测试采用 Finnigan Element 型 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪):首先称取 200 目样品 40mg,放

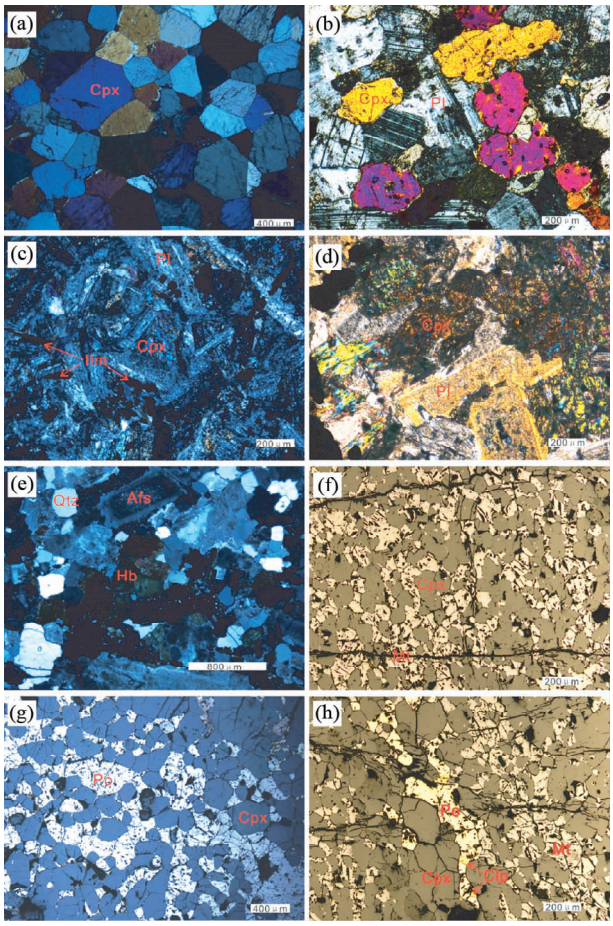

图 4　磁海矿区镁铁-超镁铁岩、角闪石英正长岩及矿石显微照片

(a)磁南辉石岩(正交偏光)；(b)磁南辉长岩(正交偏光)；(c)磁海辉绿岩(正交偏光)；(d)磁海辉长辉绿岩(正交偏光)；(e)角闪石英正长岩(正交偏光)；(f)海绵陨铁状磁铁矿石(反射光)(g)海绵陨铁状磁黄铁矿(反射光)；(h)磁铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿共生(反射光). Cpx-单斜辉石；Hb-普通角闪石；Pl-斜长石；Afs-碱性长石；Qtz-石英；Mt-磁铁矿；Ilm-钛铁矿；Po-磁黄铁矿；Clp-黄铜矿

Fig. 4　Microphotograph of mafic-ultramafic rocks, hornblende quartz syenite and ores in Cihai iron district

(a) Cinan pyroxenit (crossed polar); (b) Cinan gabbro (crossed polar); (c) Cihai diabase (crossed polar); (d) Cihai gabbro-diabase (crossed polar); (e) hornblende quartz syenite (crossed polar); (f) sideronitic magnetite (reflecting microscope); (g) sideronitic Pyrrhotite (reflecting microscope); (h) symbiotic relationship of magnetite, pyrrhotite and chalcopyrite (reflecting microscope). Cpx-clinopyroxene; Hb-hornblende; Pl-plagioclase; Afs-alkalifeldspar; Qtz-quartz; Mt-magnetite; Ilm-ilmenite; Po-pyrrhotite; Clp-chalcopyrite

入洗净并烘干的 Teflon 溶样罐中，加入 0.5mL（1∶1）HNO_3 和 1mL HF，加盖，超声振荡 10～15min，加盖并套上热缩管，放入不锈钢套中拧紧，放入烤箱内，逐渐升温到 200℃，保温 5 天后将样品从钢套中取出，在电热板上蒸至近干。加入 2.0mL(1∶1) HNO_3，再次套上热缩管和钢套，盖紧罐盖，置于 150℃烤箱内保温 5h，以确保样品全溶，再将样品溶液转移到 50mL 容量瓶中，加入 1.0mL 的 500×10^{-9} In 内标，用 1% HNO_3 稀释至 50mL 刻度，摇至均匀，待测。测试过程中，每间隔 10 个待测样品选取一个样作为平行样，一批样品中带做 1～2 个空白样。以 GRS1、GRS2、GRS3 为标样来进行质量监控，采用标准曲线法(外标法)来校正，相对标准偏差一般小于 10%。一般微量元素含量大于 10×10^{-6} 的样品分析误差小于 5%，含量小于 10×10^{-6} 的样品分析的误差小于 10%。

3.4　SIMS 锆石 U-Pb 定年

用于 SIMS 锆石 U-Pb 定年的岩石样品为磁海的辉绿岩、辉长辉绿岩，磁南的辉长岩和磁海北边的角闪石英正长岩。首先用常规的重选和磁选技术分选出待测年样品中的锆石矿物。将锆石样品颗粒以及锆石标样 91500 粘贴在环氧树脂靶上，然后对其抛光直至锆石露出一半晶面。对锆石进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光图象分析，以检查锆石的内部结构、帮助选定最佳的待测锆石部位。样品靶在真空下镀金以备分析。

U、Th、Pb 的测定在中国科学院地质与地球物理研究所 CAMECA IMS-1280 二次离子质谱仪(SIMS)上进行。锆石标样与锆石样品以 1∶3 比例交替测定。锆石样品的 U-Th-Pb 同位素比值及浓度用标准锆石 91500 校正获得(Wiedenbeck *et al.*，1995)，详细的分析方法见 Li *et al.*（2009）。在 Pb/Pb 和 Pb/U 同位素比值测定中所用的质谱分辨率为 5400。普通 Pb 校正采用实测 ^{204}Pb 值。由于测得的普通 Pb 含量非常低，可以认为普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染，因此用现代地壳的平均 Pb 同位素组成(Stacey and Kramers，1975)作为普通 Pb 组成进行校正。单点分析的同位素比值及年龄误差为 1s，U/Pb 和 Pb/Pb 平均年龄误差为 95% 置信度。数据结果采用 ISOPLOT 软件进行处理(Ludwig，2001)。

4　分析结果

4.1　SIMS 锆石 U-Pb 测年结果

CH1(辉绿岩)中的锆石多呈椭圆状，少数颗粒呈短柱状，粒径多在 100μm 左右，部分锆石阴极发光图像中可见结晶环带(图 5)。CH59(辉长辉绿岩)中的锆石多呈短柱状或椭圆状，粒径多在 50～100μm 之间，个别锆石粒径大于 100μm，部分锆石结晶环带清晰(图 5)。CHN-10(磁南辉长岩)中的锆石多呈短柱状或椭圆状，粒径多在 100～200μm 之间，阴极发光图像显示清晰的结晶环带(图 5)。CHB-1(角闪石英正长岩)中锆石多呈短柱状，粒径多在 100～150μm 之间，阴极发光图像显示清晰的结晶环带(图 5)

锆石的 U-Pb 同位素结果分别列于表 1。锆石的 Th、U、Pb 含量，Th/U 比值(0.17～2.29)均较高，U、Th 含量之间呈

表 1 磁海辉绿岩、辉长辉绿岩、磁南辉长岩及磁海北角闪石英正长岩锆石 U、Th、Pb 含量及 U-Pb 同位素特征

Table 1 Concentrations of U, Th and Pb, and U-Pb isotopes of zircon from the Cihai diabase and gabbro-diabase, Cinan gabbro and Cihaibei amphibole-quartz-syenite

Spot No.	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Pb ($\times10^{-6}$)	Th/U	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	±1σ (%)	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	±1σ (%)	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	±1σ (%)	$t_{206/238}$ (Ma)	±1σ
磁海辉绿岩												
CH1-1	465	473	27	1.02	0.29638	3.36	0.0425	1.50	0.05056	3.00	268.4	3.9
CH1-2	641	1076	43	1.68	0.31234	2.56	0.0427	1.60	0.05303	2.00	269.6	4.2
CH1-3	1566	3487	116	2.23	0.30840	2.77	0.0427	1.51	0.05234	2.32	269.8	4.0
CH1-4	540	868	35	1.61	0.29980	5.70	0.0428	1.62	0.05078	5.47	270.3	4.3
CH1-5	314	229	17	0.73	0.30425	3.50	0.0429	1.61	0.05139	3.10	271.0	4.3
CH1-6	597	880	38	1.47	0.28718	5.45	0.0431	1.51	0.04836	5.24	271.8	4.0
CH1-7	443	490	27	1.11	0.31772	3.25	0.0435	1.53	0.05295	2.87	274.6	4.1
CH1-8	484	501	29	1.04	0.29499	3.16	0.0435	1.51	0.04920	2.78	274.4	4.1
CH1-9	1087	2490	84	2.29	0.31826	2.36	0.0438	1.51	0.05273	1.81	276.2	4.1
CH1-10	575	506	34	0.88	0.30306	4.76	0.0441	1.51	0.04981	4.52	278.3	4.1
CH1-11	2241	4452	164	1.99	0.31636	2.11	0.0443	1.50	0.05180	1.48	279.4	4.1
CH1-12	760	738	46	0.97	0.31803	2.99	0.0445	1.51	0.05179	2.58	280.9	4.1
CH1-13	3347	3517	202	1.05	0.32087	2.53	0.0447	1.53	0.05209	2.01	281.8	4.2
CH1-14	1824	2074	115	1.14	0.33102	1.84	0.0452	1.50	0.05308	1.06	285.2	4.2
磁海辉长辉绿岩												
CH59-1	780	638	45	0.82	0.29752	2.82	0.0436	1.53	0.04952	2.37	274.9	4.1
CH59-2	1034	544	55	0.53	0.31236	2.05	0.0435	1.50	0.05213	1.40	274.2	4.0
CH59-3	1280	1703	86	1.33	0.32014	2.19	0.0447	1.50	0.05197	1.60	281.7	4.1
CH59-4	1247	1583	82	1.27	0.31933	3.66	0.0458	1.53	0.05061	3.32	288.4	4.3
CH59-5	1430	516	76	0.36	0.32527	1.87	0.0454	1.50	0.05200	1.12	286.0	4.2
CH59-6	370	375	23	1.01	0.32448	2.15	0.0448	1.51	0.05255	1.53	282.4	4.2
CH59-7	1790	1895	114	1.06	0.32027	2.17	0.0459	1.50	0.05065	1.57	289.0	4.2
CH59-8	559	181	28	0.32	0.29748	2.94	0.0441	1.50	0.04897	2.53	277.9	4.1
CH59-9	1560	893	84	0.57	0.31250	2.22	0.0440	1.53	0.05150	1.61	277.6	4.2
磁南辉长岩												
CHN-10-1	1305	224	64	0.17	0.32316	2.23	0.0442	1.51	0.05304	1.64	278.7	4.1
CHN-10-2	1443	894	78	0.62	0.31269	2.41	0.0440	1.53	0.05153	1.87	277.7	4.2
CHN-10-3	532	266	28	0.50	0.33667	4.75	0.0434	1.51	0.05623	4.50	274.0	4.0
CHN-10-4	288	113	14	0.39	0.31221	3.23	0.0427	1.50	0.05300	2.86	269.7	4.0
CHN-10-5	883	612	48	0.69	0.31859	2.69	0.0439	1.50	0.05266	2.23	276.8	4.1
CHN-10-6	1026	1316	63	1.28	0.31090	2.69	0.0438	1.50	0.05152	2.23	276.2	4.1
CHN-10-7	450	312	24	0.69	0.30792	4.42	0.0431	1.50	0.05181	4.16	272.1	4.0
CHN-10-8	541	510	30	0.94	0.29123	4.58	0.0426	1.51	0.04960	4.32	268.8	4.0
CHN-10-9	231	236	13	1.02	0.29392	6.53	0.0429	1.50	0.04968	6.36	270.8	4.0
CHN-10-10	531	161	25	0.30	0.28715	4.23	0.0418	1.51	0.04979	3.95	264.2	3.9
CHN-10-11	694	152	34	0.22	0.30590	4.27	0.0445	1.51	0.04989	3.99	280.5	4.2
CHN-10-12	1055	763	58	0.72	0.30279	3.03	0.0433	1.51	0.05070	2.63	273.4	4.0
CHN-10-13	193	154	11	0.80	0.30095	6.33	0.0428	1.50	0.05102	6.15	270.0	4.0
CHN-10-14	242	174	13	0.72	0.32548	4.66	0.0432	1.52	0.05467	4.40	272.5	4.1
CHN-10-15	685	661	39	0.97	0.30979	3.38	0.0432	1.51	0.05201	3.03	272.6	4.0
CHN-10-16	458	289	24	0.63	0.28551	4.22	0.0427	1.51	0.04853	3.94	269.4	4.0
CHN-10-17	855	460	45	0.54	0.30947	2.69	0.0433	1.51	0.05187	2.23	273.1	4.0
CHN-10-18	378	300	21	0.79	0.29142	4.59	0.0440	1.52	0.04809	4.34	277.3	4.1
磁海北角闪石英正长岩												
CHB-1-1	395	347	23	0.88	0.32427	2.80	0.0438	1.50	0.05366	2.36	276.5	4.1
CHB-1-2	216	180	12	0.83	0.33623	4.01	0.0440	1.56	0.05537	3.69	277.8	4.2
CHB-1-3	403	394	24	0.98	0.30821	3.24	0.0442	1.51	0.05058	2.87	278.8	4.1
CHB-1-4	248	224	15	0.91	0.31485	3.99	0.0440	1.51	0.05190	3.70	277.5	4.1
CHB-1-5	229	197	13	0.86	0.30473	4.42	0.0425	1.55	0.05198	4.14	268.4	4.1

续表 1

Continued Table 1

Spot No.	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Pb ($\times10^{-6}$)	Th/U	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	±1σ (%)	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	±1σ (%)	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	±1σ (%)	$t_{206/238}$ (Ma)	±1σ
CHB-1-6	590	583	33	0.99	0.29127	3.18	0.0416	1.52	0.05077	2.79	262.8	3.9
CHB-1-7	116	72	6	0.62	0.30985	3.80	0.0426	1.53	0.05278	3.47	268.8	4.0
CHB-1-8	655	747	40	1.14	0.30056	2.46	0.0431	1.51	0.05061	1.95	271.8	4.0
CHB-1-9	238	181	13	0.76	0.29125	2.77	0.0427	1.50	0.04945	2.33	269.7	4.0
CHB-1-10	708	616	41	0.87	0.31318	2.06	0.0432	1.50	0.05254	1.40	272.8	4.0
CHB-1-11	179	140	10	0.78	0.30947	3.34	0.0427	1.52	0.05260	2.97	269.4	4.0
CHB-1-12	271	205	15	0.76	0.32423	2.70	0.0432	1.51	0.05441	2.24	272.8	4.0
CHB-1-13	205	173	12	0.85	0.29838	2.96	0.0431	1.50	0.05022	2.55	272.0	4.0
CHB-1-14	200	184	12	0.92	0.30898	2.84	0.0430	1.52	0.05212	2.39	271.4	4.0
CHB-1-15	315	241	18	0.77	0.30048	2.60	0.0424	1.52	0.05139	2.11	267.7	4.0
CHB-1-16	246	209	14	0.85	0.30963	2.69	0.0438	1.50	0.05127	2.23	276.3	4.1
CHB-1-17	946	1015	60	1.07	0.31666	1.81	0.0449	1.53	0.05113	0.97	283.3	4.2
CHB-1-18	333	280	20	0.84	0.30839	2.17	0.0444	1.51	0.05042	1.56	279.8	4.1
CHB-1-19	510	403	29	0.79	0.31627	1.92	0.0435	1.50	0.05272	1.20	274.5	4.0
CHB-1-20	307	234	17	0.76	0.30982	2.44	0.0434	1.50	0.05175	1.92	274.0	4.0

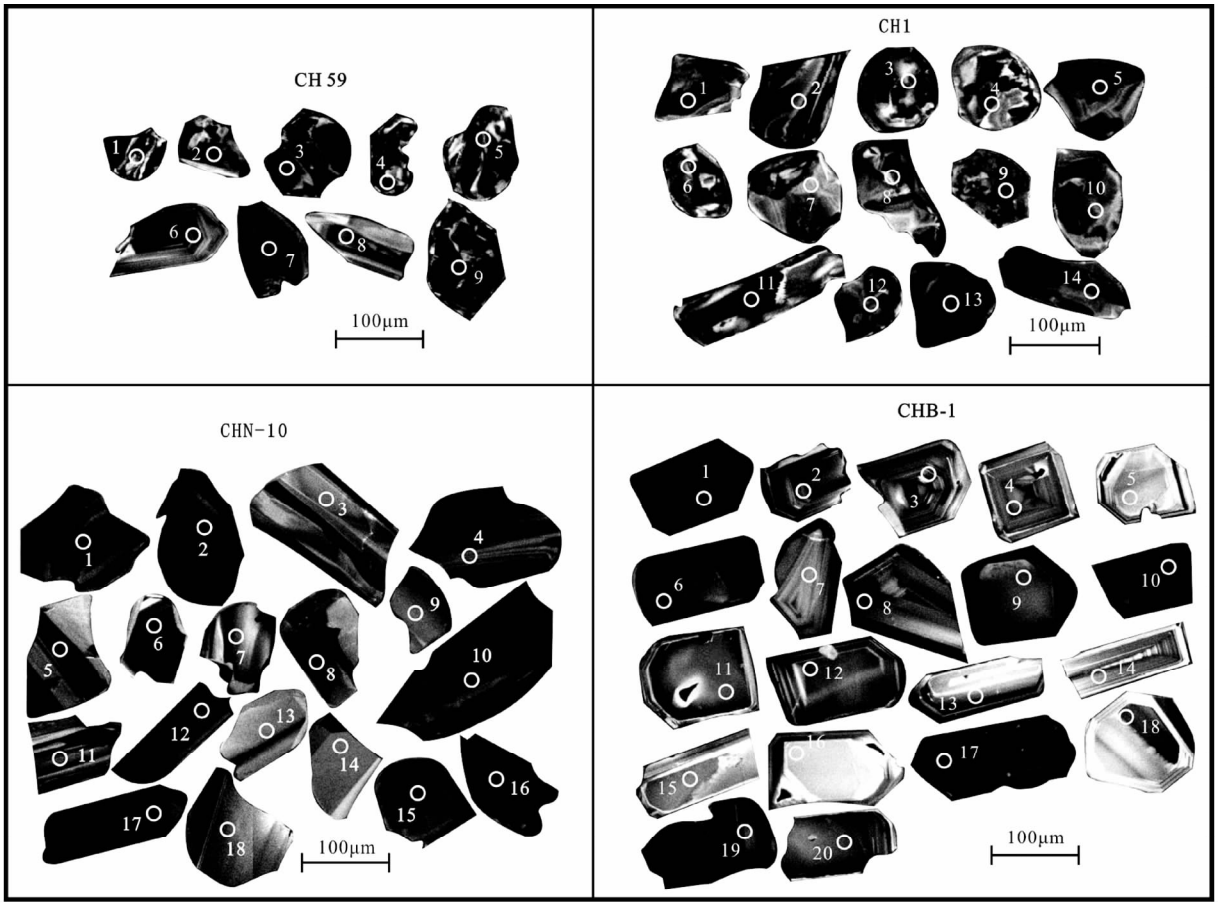

图 5 磁海辉长辉绿岩、辉绿岩、磁南辉长岩及磁海北角闪石英正长岩锆石的阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescene images of zircons from Cihai gabbro-diabase, diabase, Cinan gabbro and Cibei hornblende quartz syenite

现良好的线性关系，$^{207}Pb/^{235}U$、$^{206}Pb/^{238}U$ 比值变化比较小；上述特征都说明所测定的锆石是从岩浆中结晶形成的（Pidgeon *et al.*, 1998; Claesson *et al.*, 2000; Belousova *et al.*, 2002），其年龄可以代表岩体的形成时代。磁海辉绿岩

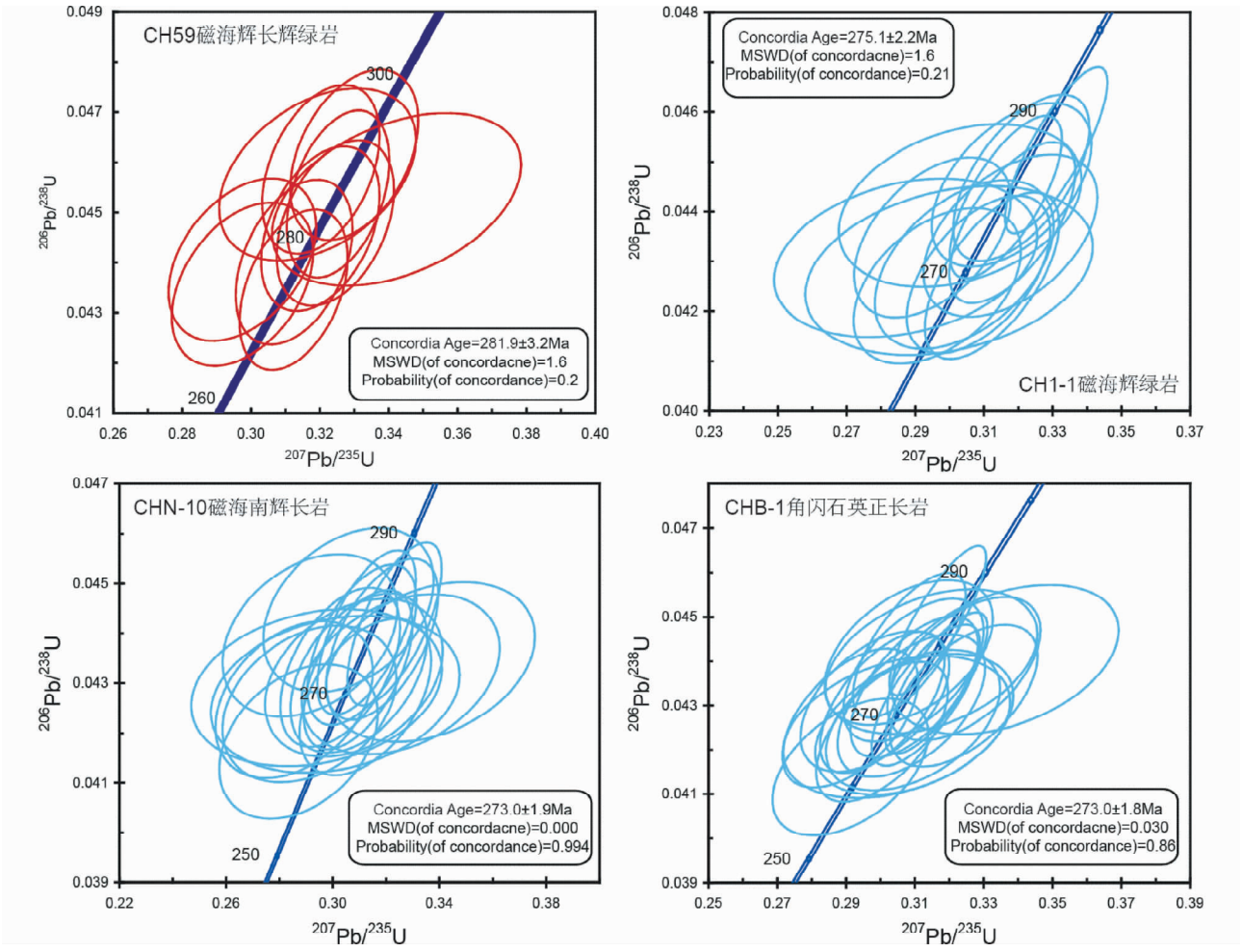

图 6 磁海辉长辉绿岩、辉绿岩、磁南辉长岩及磁海北角闪石英正长岩$^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ 谐和图

Fig. 6 The $^{207}Pb/^{235}U$-$^{206}Pb/^{238}U$ concordia diagram of zircon from Cihai gabbro-diabase, diabase, Cinan gabbro and Cihaibei hornblende quartz syenite

(CH1)14 颗锆石的分析结果显示 U、Th 和 Pb 的含量分别为 $314\times10^{-6}\sim3347\times10^{-6}$、$229\times10^{-6}\sim4452\times10^{-6}$ 和 $17\times10^{-6}\sim202\times10^{-6}$; Th/U 比值为 0.73 ~ 2.29; 辉长辉绿岩(CH59)9 颗锆石的分析结果显示 U、Th 和 Pb 的含量分别为 $370\times10^{-6}\sim1790\times10^{-6}$、$181\times10^{-6}\sim1895\times10^{-6}$ 和 $23\times10^{-6}\sim114\times10^{-6}$; Th/U 比值为 0.32 ~ 1.33; 磁南辉长岩(CHN-10)的 18 颗锆石的 U 含量 $193\times10^{-6}\sim1443\times10^{-6}$, Th 含量 $113\times10^{-6}\sim1316\times10^{-6}$, Pb 含量 $11\times10^{-6}\sim78\times10^{-6}$, Th/U 比值 0.17 ~ 1.28; 磁海北角闪石英正长岩(CHB-1)的 20 颗锆石的 U 含量 $116\times10^{-6}\sim946\times10^{-6}$, Th 含量 $72\times10^{-6}\sim1015\times10^{-6}$, Pb 含量 $6\times10^{-6}\sim60\times10^{-6}$, Th/U 比值 0.62 ~ 1.14。

锆石的 U-Pb 同位素比值显示数据点均集中在谐和线上(图 6)。分别可获得磁海辉绿岩、辉长辉绿岩、磁南辉长岩及磁海北角闪石英正长岩的谐和年龄分别为 275.1 ± 2.2Ma、281.9 ± 3.2Ma、273.0 ± 1.9Ma 和 273.0 ± 1.8Ma。磁海的辉绿岩和辉长辉绿岩的年龄在误差范围内一致,磁南辉长岩的形成时代略晚于磁海的辉绿岩和辉长辉绿岩。磁海北的角闪石英正长岩的谐和年龄为 273.0 ± 1.8Ma,与磁海三个岩体中最年轻的磁南辉长岩非常一致,略晚于磁海辉绿岩-辉长辉绿岩的形成时代。

4.2 主量元素

主量元素测定结果见表 2。

磁海辉绿岩及辉长辉绿岩 SiO_2 含量为 46.63% ~ 55.34%, TiO_2 含量为 1.67% ~ 2.64%, 平均值 2.14%, Al_2O_3 含量为 13.67% ~ 15.05%, $Fe_2O_3^T$ 含量为 5.26% ~ 9.45%, FeO 含量为 4.3% ~ 7.15%, MgO 含量为 3.80% ~ 5.38%, 平均值 4.66%, CaO 含量为 8.63% ~ 12.76%, Na_2O 含量为 3.22% ~ 6.32%, K_2O 含量为 0.567% ~ 1.72%;

磁南辉石岩 SiO_2 含量为 34.48% ~ 47.39%, TiO_2 含量为 0.012% ~ 0.083%, 平均值 0.057%, Al_2O_3 含量为 0.77% ~ 1.99%, $Fe_2O_3^T$ 含量为 28.73% ~ 40.36%, FeO 含量为 22.79% ~ 25.39%, MgO 含量为 2.44% ~ 4.65%, 平均值 3.78%,

表 2 磁海镁铁-超镁铁岩、角闪石英正长岩的全岩主要氧化物(wt%)、微量及稀土元素($\times10^{-6}$)含量

Table 2 Major (wt%), rare earth and trace elements ($\times10^{-6}$) compositions of mafic-ultramafic rocks and amphibole-quartz-syenite from Cihai

Sample No.	CH1	CH27	CH38	CH39	CH44	CH70	CH59	CH72	CH48	CH53
岩性	辉绿岩						辉长辉绿岩			
SiO_2	50.97	51.37	50.2	46.63	53.18	48.09	55.34	53.76	51.05	52.66
Al_2O_3	14.16	14.75	14.31	15.05	14.32	13.67	14.06	14.19	14.39	14.54
$Fe_2O_3^T$	6.66	8	8.01	7.48	5.26	9.45	6.21	6.99	7.33	7.94
MgO	4.8	5.23	4.48	5.38	4.52	5.13	3.8	4.59	4.24	4.43
CaO	10.27	10.25	12.76	12.12	10.58	12.16	8.63	8.72	9.7	9.07
Na_2O	4.97	4.39	3.25	3.58	5.29	3.22	6.32	5.56	5.39	5.26
K_2O	1.18	0.87	1.72	0.72	0.85	0.98	0.57	0.91	0.57	0.73
MnO	0.13	0.19	0.14	0.17	0.14	0.17	0.11	0.13	0.14	0.12
TiO_2	1.97	2	2.12	1.86	1.67	2.36	2.27	2.32	2.64	2.23
P_2O_5	0.18	0.28	0.57	0.29	0.16	0.26	0.46	0.38	0.47	0.37
烧失量	4.67	2.58	2.31	6.66	3.93	4.45	2.16	2.43	4.08	2.62
FeO	5.17	6.25	6.17	5.81	4.30	7.15	4.93	5.21	5.89	5.97
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
总量	99.96	99.90	99.87	99.93	99.90	99.94	99.93	99.97	100.00	99.97
Li	10.9	22.6	12.9	15.8	7.76	18.7	11.7	10.7	10.2	14.1
Be	1.39	1.33	2.39	1.59	1.48	1.26	2.09	1.45	1.62	1.78
Sc	32	32.6	19.4	32.5	25.6	31.5	26.7	25	29.9	30.3
V	260	271	103	219	248	255	207	218	264	266
Cr	45.1	84.7	26.8	160	26.4	85.9	33.2	43.4	23.9	58.2
Co	17.3	21.5	19.1	21.6	14.1	25.3	29.8	19.6	16.3	27.5
Ni	12.3	26.9	12.3	22.1	13.7	18.6	25.7	20.1	10.5	19.7
Cu	13.4	11.5	9.58	19.5	10.7	15.2	48.5	17.5	16	53.9
Zn	36.3	41.3	40.2	54.8	32.8	45.2	35	36.7	36.8	38.4
Ga	15.6	19.2	31.1	18.9	17.1	14.6	21.3	16.3	21	21.5
Rb	42.5	34.6	57.5	26.7	36.1	33.8	20	23.4	27.6	27.1
Sr	528	539	492	411	511	308	471	273	601	318
Y	39.1	45.3	97	49	42	34.7	67.8	41.8	54.7	62.8
Nb	5.39	6.83	12.9	6.74	5.68	5.63	10.1	7.55	8.86	8.48
Mo	0.412	0.425	0.655	0.589	0.287	0.146	0.222	0.209	0.238	0.315
Cd	0.056	0.038	0.063	0.069	0.049	0.033	0.051	0.037	0.047	0.047
In	0.065	0.07	0.101	0.08	0.077	0.079	0.084	0.06	0.066	0.076
Sb	0.433	0.301	0.217	0.411	0.497	0.371	0.424	0.331	0.246	0.372
Cs	0.553	0.734	0.821	0.644	0.361	0.351	0.12	0.217	0.361	0.317
Ba	295	196	246	63.2	130	161	129	118	75.2	183
La	8.26	13.9	51.6	16.9	9.44	7.99	15.6	9.58	14.5	10.9
Ce	18.9	34.6	140	43.9	23.3	20.3	38	24.9	35.8	29
Pr	2.83	5.05	19	6.37	3.51	3.07	5.66	3.85	5.28	4.82
Nd	14	23.5	85.4	28.7	16.8	15.1	28.6	20.1	25.9	25.7
Sm	4.34	6.49	17.4	7.27	4.82	4.56	7.96	5.67	7.39	7.7
Eu	1.11	1.94	5.03	2.31	2.23	0.978	3.06	1.5	2.09	2.19
Gd	5.6	7.04	17.7	7.93	6.02	5.28	9.76	6.58	8.46	9.52
Tb	1.21	1.45	3.27	1.71	1.31	1.11	2.05	1.38	1.79	1.95
Dy	7.21	8.31	19	9.8	7.62	6.5	12.2	8.04	9.68	11.3
Ho	1.62	1.89	3.9	2.14	1.77	1.46	2.75	1.77	2.21	2.61
Er	4.86	5.31	10.8	6.02	5.14	4.23	8.19	4.95	6.43	7.58
Tm	0.863	0.931	1.82	1.02	0.91	0.705	1.38	0.888	1.1	1.35
Yb	4.78	5.34	10	5.93	5.6	4.15	8.1	5.09	6.21	7.48
Lu	0.736	0.723	1.27	0.833	0.853	0.58	1.22	0.765	0.952	1.09
Ta	0.435	0.496	0.638	0.457	0.491	0.379	0.759	0.529	0.619	0.621
W	0.902	0.373	0.274	1.51	3.69	0.237	2.42	0.957	0.341	0.796
Re	0.019	0.014	0.026	0.018	0.012	0.011	0.028	0.014	0.017	0.019
Tl	0.142	0.084	0.267	0.088	0.116	0.091	0.076	0.087	0.051	0.067
Pb	1.64	1.76	0.883	2.87	2.2	0.857	1.13	1.52	0.983	1.41
Bi	0.396	0.052	0.024	0.037	0.031	0.019	0.067	0.034	0.032	0.049
Th	1.71	2.04	4.9	1.71	5.23	1.17	3.33	1.93	2.56	3.12
U	0.319	0.487	2.89	0.825	0.945	0.331	0.851	0.33	0.702	0.937
Zr	73.3	125	193	77.6	132	104	245	94.3	135	198
Hf	2.13	3.4	5.63	2.66	3.62	2.81	6.35	2.49	3.46	5.32

续表 2

Continued Table 2

Sample No.	CHN-10	CHN-8	CXN1	CXN2	CXN3	CHN-1	CHN-2	CHN13	CHB-1
岩性			辉长岩				辉石岩		角闪石英正长岩
SiO_2	47.52	41.76	49.12	50.76	51.77	38.58	34.48	47.39	72.16
Al_2O_3	17.48	17.06	14.31	16.25	14.86	1.28	1.99	0.77	14.00
$Fe_2O_3^T$	5.65	10.01	7.90	7.30	7.59	35.09	40.36	28.73	2.60
MgO	9.01	14.33	6.00	4.44	4.88	4.65	4.24	2.44	0.41
CaO	14.57	9.08	16.90	15.20	14.91	16.18	13.92	19.49	1.20
Na_2O	1.69	0.81	1.59	3.02	2.88	0.13	0.15	0.29	4.75
K_2O	0.29	0.17	1.30	0.73	1.11	0.01	0.01	0.02	3.85
MnO	0.11	0.182	0.25	0.22	0.22	0.45	0.44	0.60	0.04
TiO_2	0.55	0.33	1.22	1.23	0.81	0.08	0.08	0.01	0.29
P_2O_5	0.03	0.06	0.05	0.06	0.16	0.28	0.25	0.06	0.05
烧失量	3.01	5.99	1.27	0.69	0.70	2.74	3.50	0.11	0.54
FeO	4.24	7.25	5.65	5.25	5.58	25.27	25.39	22.79	1.19
S	0.03	0.82	0	0	0	2.10	1.46	0.13	0
总量	99.94	100.59	99.92	99.90	99.89	101.56	100.88	100.04	99.89
Li	9.03	18.2	8.41	7.19	7.02	2.55	3.12	2.47	1.85
Be	0.266	0.151	0.779	0.498	0.54	1.29	0.73	0.798	3.13
Sc	39.9	10	35.6	23.4	25.8	1.55	1.29	0.781	5.77
V	161	59	254	242	236	21.9	20.1	8.76	11
Cr	849	350	25.3	23.3	67	8.24	6.97	2.7	3.33
Co	34.4	142	26.4	21.9	22.2	184	112	55.9	1.73
Ni	119	1322	25.2	15.7	22.5	54.2	44.1	15.1	2.24
Cu	172	1757	9.99	19.4	8.98	215	248	32	4.08
Zn	36.6	93.8	62.4	64.9	57.4	134	125	198	36.6
Ga	9.5	7.61	13.1	13.1	11.6	8.58	9.66	6.58	27.2
Rb	6.51	4.44	36.6	14.2	25.5	0.759	1.25	1.71	69.6
Sr	257	268	226	482	372	41.4	39.1	49.2	87
Y	10.5	6	22.4	20.8	16.5	10.8	28.6	9.1	51.3
Nb	0.843	0.776	1.69	1.71	0.993	2.46	4.28	0.138	13.6
Mo	0.08	0.934	0.19	0.194	0.08	1.04	1.46	0.146	0.619
Cd	0.113	0.677	0.058	0.044	0.057	0.184	0.215	0.225	0.057
In	0.035	0.051	0.114	0.071	0.087	0.493	0.546	0.572	0.051
Sb	0.276	28.1	0.194	0.15	0.13	3.1	2.55	1.1	0.153
Cs	1.04	1.85	0.428	0.686	0.783	1.18	1.73	1.97	0.772
Ba	39.9	38.2	141	107	187	12.3	13	4.01	746
La	2.2	1.77	5.69	3.83	3.99	21	18.5	12.1	50.5
Ce	5.2	3.96	14	10.6	9.76	42.8	39.5	24.2	107
Pr	0.812	0.531	2.16	1.92	1.49	5.23	5	2.92	11.6
Nd	4.05	2.58	10.6	10	7.22	19.4	22	10.8	46.2
Sm	1.19	0.769	3.24	2.64	2.18	3.29	5.31	1.72	8.31
Eu	0.532	0.404	0.981	1.25	0.892	0.492	0.908	0.257	1.44
Gd	1.58	0.908	3.72	3.57	2.71	3.1	5.8	1.68	8.48
Tb	0.351	0.19	0.74	0.74	0.547	0.51	1.19	0.32	1.67
Dy	1.94	1.15	4.32	3.89	2.92	2.5	6.38	1.74	9.14
Ho	0.448	0.268	0.921	0.882	0.612	0.46	1.27	0.39	2.1
Er	1.23	0.764	2.6	2.38	1.79	1.09	3.13	1.07	5.88
Tm	0.226	0.129	0.453	0.421	0.329	0.189	0.471	0.196	1.12
Yb	1.21	0.778	2.71	2.36	2.21	1.08	2.26	1.34	6.82
Lu	0.182	0.12	0.394	0.374	0.353	0.177	0.301	0.199	0.983
Ta	0.066	0.067	0.177	0.256	0.109	0.105	0.177	0.01	0.793
W	0.135	0.308	0.243	0.149	0.14	0.35	0.327	0.093	0.297
Re	<0.002	0.009	0.004	0.004	0.002	0.007	0.01	0.005	0.022
Tl	0.045	0.092	0.174	0.099	0.15	0.014	0.028	0.008	0.318
Pb	1.43	9.52	1.19	1.75	1.33	1.33	2.25	0.647	10.9
Bi	0.149	0.855	0.028	0.046	0.025	1.72	10.8	0.771	0.029
Th	0.401	0.233	0.986	0.505	0.572	2.51	2.41	0.621	10.4
U	0.119	0.055	0.487	0.256	0.259	1.91	2.31	0.591	1.77
Zr	24.9	14.7	99.5	77.4	51.1	7.3	14.4	3.81	210
Hf	0.911	0.504	3.44	2.72	1.83	0.234	0.381	0.113	6.87

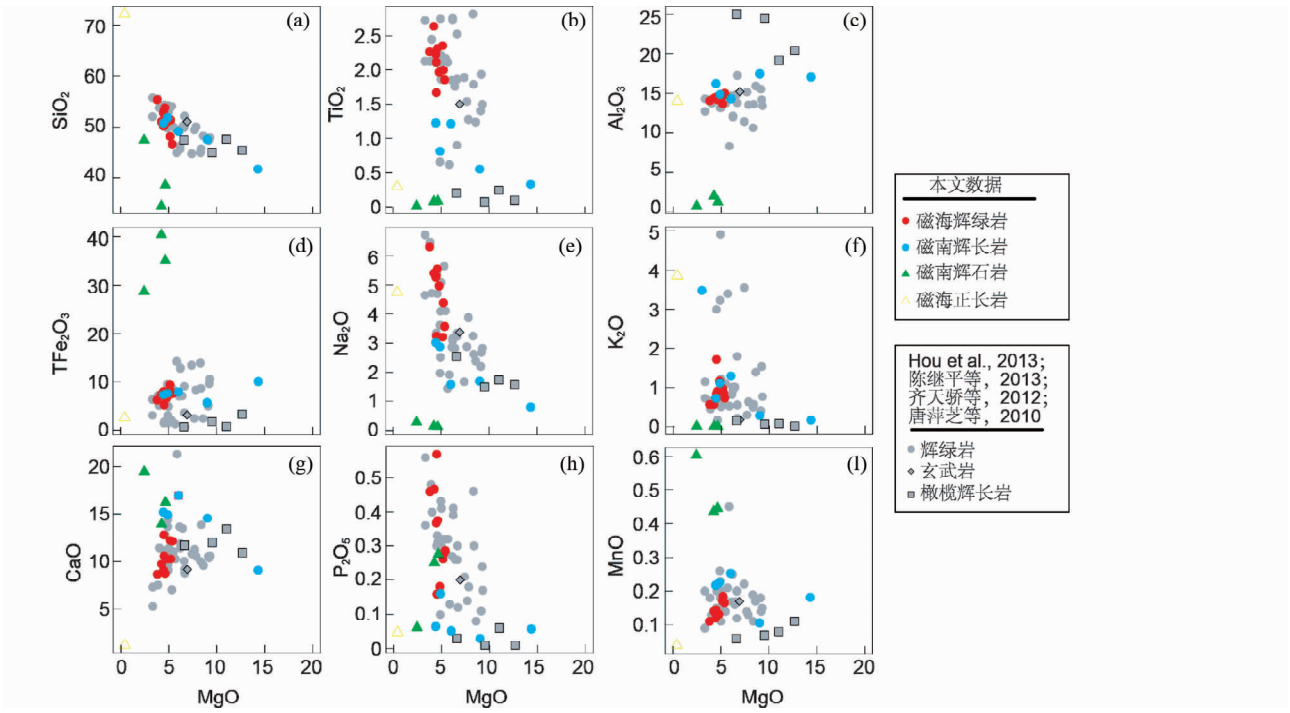

图 7　磁海、磁南主要岩性的主量元素氧化物与 MgO 相关性图

Fig. 7　Diagrams of oxides vs. MgO of the Cihai and Cinan mafic-ultramafic rocks

CaO 含量为 13.92% ~ 19.49%，Na_2O 含量为 0.128% ~ 0.287%，K_2O 含量为 0.01% ~ 0.017%；

磁南辉长岩 SiO_2 含量为 41.76% ~ 51.77%，TiO_2 含量为 0.33% ~ 1.23%，平均值 0.83%，Al_2O_3 含量为 14.31% ~ 17.48%，$Fe_2O_3^T$ 含量为 5.65% ~ 10.01%，FeO 含量为 4.24% ~ 7.25%，MgO 含量为 4.44% ~ 14.33%，平均值 7.73%，CaO 含量为 9.08% ~ 16.9%，Na_2O 含量为 0.807% ~ 3.02%，K_2O 含量为 0.172% ~ 1.30%。

由表 2 可知，磁海所有辉绿岩、辉长辉绿岩的 TiO_2 含量均 > 1%（1.67% ~ 2.64%，平均值 2.14%），而磁南辉石岩的 TiO_2 远低于前者（0.01% ~ 0.08%，平均值 0.057%），两者相差超过 1 个数量级。这与辉石岩仅含磁铁矿，而辉绿岩仅含钛铁矿不含磁铁矿的岩相学特征相对应。辉长岩的 TiO_2 含量 0.33% ~ 0.55%，介于含钛铁矿的磁海辉绿岩和含磁铁矿的磁南辉石岩之间。

从辉石岩到辉长岩，再到辉绿岩，经历了 $Mg^{\#}$ 和 m/f 值先增加后降低的过程，辉长岩具有最高的 $Mg^{\#}$ 和 m/f 值，辉石岩 $Mg^{\#}$ 和 m/f 值低于辉长岩，这是由于辉石岩含磁铁矿而显示出高 FeO（22.79% ~ 25.39%）和 $Fe_2O_3^T$（28.73% ~ 40.36%），低 MgO（2.44% ~ 4.65%），从辉石岩到辉长岩这种 $Mg^{\#}$ 值增加的过程显然不符合岩浆正常结晶分异的演化过程，而是由于早期磁铁矿的结晶分离使得残余岩浆的 $Mg^{\#}$ 值不断升高，随着磁铁矿在辉石岩中的结晶结束，岩浆逐渐演化到辉长岩，因此辉长岩具有最高 $Mg^{\#}$ 值和 m/f 值，从图 7 可以看出，如果不考虑辉石岩，辉长岩、辉长辉绿岩虽然与 Al_2O_3、CaO 含量相关趋势不十分明显，但 MgO 与 SiO_2、Na_2O、K_2O 含量呈负相关，可能由相对富 Mg 的矿物分离结晶作用引起，总体显示出由辉长岩到辉绿岩经历了结晶分异的过程。

4.3　微量元素

磁海辉绿岩的稀土总含量 ∑REE 介于 76.01×10^{-6} ~ 386.2×10^{-6} 之间，辉绿岩 ∑REE 值明显高于磁南辉长岩样品（14.32×10^{-6} ~ 21.15×10^{-6}），而磁南辉长岩的稀土含量低于辉石岩（58.93×10^{-6} ~ 112.0×10^{-6}）。

除 1 个辉绿岩样品（CH38，成矿后的辉绿岩）相对其他样品含量高，轻稀土富集、轻重稀土分异较明显外，磁海其余的辉绿岩样品（成矿前的辉绿岩）和磁南辉长岩样品的球粒陨石标准化稀土元素配分模式特征类似，均显示轻稀土略有富集，轻、重稀土分异不明显，Eu 表现出无异常或弱的正异常（图 8b），与前人的研究结果一致。而磁南的辉石岩样品轻、重稀土分异程度高于上述两者，表现出 Eu 的负异常（图 8b），可能与无斜长石堆晶有关。新疆北山地区其他含铜镍硫化物的镁铁-超镁铁岩体中，基性岩的稀土元素标准配分模式显示较平坦的形式，轻重稀土分异不明显，而超基性岩显示轻重稀土分异明显（图 8d），与磁南地区的辉长岩和辉石岩显示同样的特征。

原始地幔标准化微量元素配分图上，磁海 CH38（成矿后的辉绿岩）的 Nb、Ta、Zr、Hf 相对于其他元素显示出明显的负异常（图 8a），磁海其他辉绿岩样品（成矿前的辉绿岩）和磁

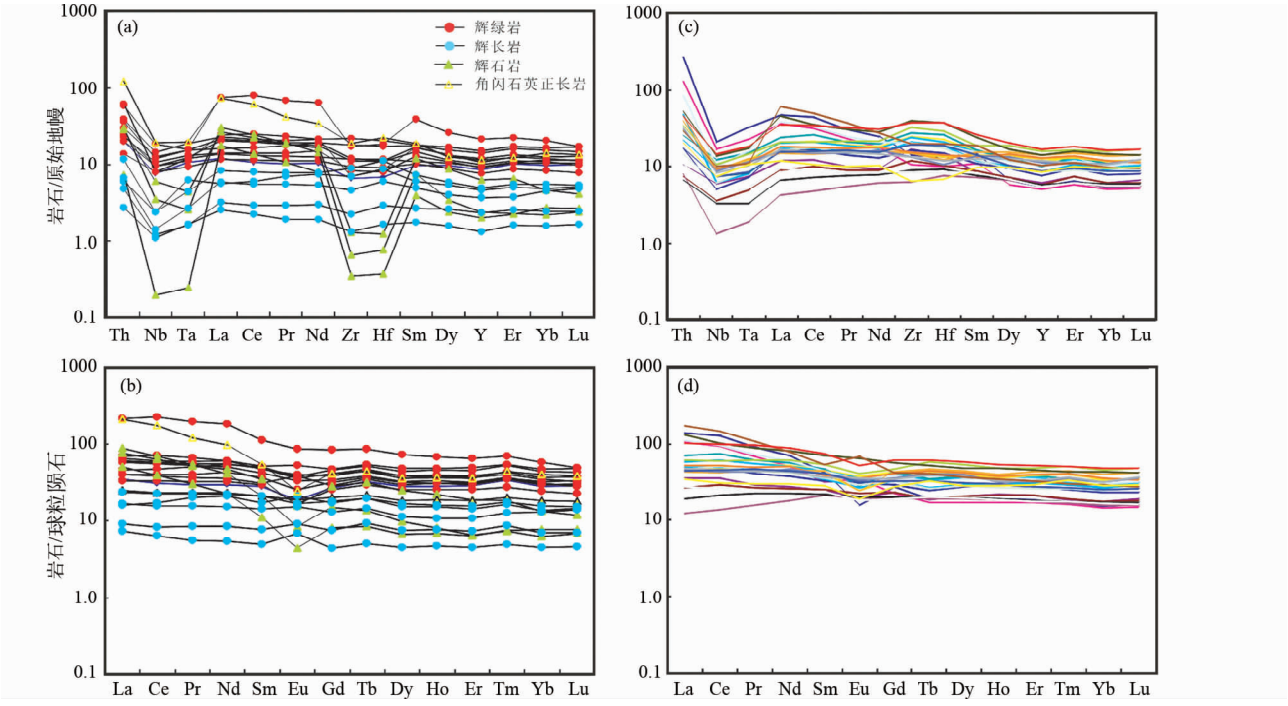

图 8 磁海、磁南主要岩性的原始地幔标准化微量元素蛛网图(a、c)及球粒陨石标准化稀土元素配图分(b、d)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

前人数据据唐萍芝等, 2010; 齐天骄等, 2012; Hou *et al.*, 2013; 陈继平等, 2013

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace elements patterns (a, c) and chondrite-normalized REE patterns (b, d) of the Cihai and Cinan mafic-ultramafic rocks (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

Other data from Tang *et al.*, 2010; Qi *et al.*, 2012; Hou *et al.*, 2013 and Chen *et al.*, 2013

南辉长岩样品均显示弱的 Nb、Ta 负异常,Zr、Hf 无异常或弱负异常,富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、U、Sr),与前人研究结果一致(图 8a, c)。磁南辉石岩样品显示明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 负异常。

磁南的辉长岩和辉石岩的微量、稀土元素分配趋势不同,辉长岩表现出轻重稀土分异不明显,Nb、Ta、Zr、Hf 等高场强元素弱亏损的特征,辉石岩的轻重稀土分异相对明显,相对重稀土轻稀土较富集,强烈亏损 Nb、Ta、Zr 和 Hf 等元素,辉长岩的微量稀土元素含量低于辉石岩(图 8a, b)。

5 讨论

5.1 磁海镁铁-超镁铁岩及角闪石英正长岩的形成时代及其意义

前人先后针对磁海成矿前、成矿期和成矿后的辉绿岩、辉长岩进行了锆石 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 年龄测试,获得了 268~294.8Ma 及黄铁矿 Re-Os 模式年龄 262.3Ma(薛春纪等, 2000; 齐天骄等, 2012; 陈继平等, 2013; Huang *et al.*, 2013; 孟庆鹏等, 2014; 郑佳浩等, 2014)(除 Hou *et al.*, 2013 磁海穿插矿体的晚期辉绿岩脉的年龄为 128.5Ma 之外)的成岩成矿结果,但未系统地测试磁海辉绿岩、磁海辉长辉绿岩、磁南辉长岩、磁南辉石岩、磁海北侧的角闪石英正长岩年龄。磁海辉绿岩赋含钛铁矿,而磁南辉长岩含钛铁矿和少量铜镍硫化物,磁南的辉石岩含磁铁矿、海绵陨铁状的磁黄铁矿及少量铜的硫化物,这些岩体是否为同时代同期岩浆演化的产物,与磁海外围北侧的角闪石英正长岩有无成因联系,这些问题均尚未查明。

磁海采坑不同位置的辉绿岩和辉长辉绿岩样品的测年结果分别为 281.9±3.2Ma 和 275.1±2.2Ma,磁南辉长岩的锆石年龄为 273.0±1.9Ma,磁海外围北侧的角闪石英正长岩锆石年龄为 273.0±1.8Ma,另外课题组测得磁南辉石岩的磷灰石年龄为 273.6±2.3Ma(另文发表),表明它们均属于早二叠世岩浆活动的产物,与东天山觉罗塔格造山带、北山构造-成矿带等区域基性-超基性岩以及二叠纪的塔里木玄武岩具有相同的时代。

磁海的辉绿岩和磁南辉长岩具有相似的微量和稀土元素标准化配分模式,显示了同源岩浆结晶分异,分别侵位的特征,而磁南的辉石岩相对与磁南辉长岩,有明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 的亏损、较高的微量、稀土含量,且 MgO 和 TiO_2 含量也明显低于磁南辉长岩,这些特征看起来好像说明磁南辉石岩与磁南辉长岩不是同源岩浆演化的结果,实则造成 Nb、Ta、Zr、Hf 亏损的原因应考虑以下两种因素:①由于磁南辉石岩相对于磁南辉长岩、磁海辉绿岩亏损钛铁矿而造成 Nb、Ta、

Zr、Hf 的相对亏损，因为在玄武质岩浆系统中 Nb、Ta、Zr、Hf 与钛铁矿具有相容性（Nielsen *et al.*，1992）；②由于磁南的辉石岩与辉长岩受壳源物质的混染程度不同，从而导致 Nb、Ta、Zr、Hf 的亏损程度不同，即磁南辉石岩与辉长岩为同源岩浆不同期次、不同演化路径的结果。而磁南辉石岩比磁南辉长岩微量元素、稀土元素含量高的原因是由于磁南辉石岩所含较多磷灰石相对富集微量元素、稀土元素所致。

另外，磁海外围北侧的角闪石英正长岩与磁海的所有镁铁-超镁铁岩年龄在误差范围内一致，岩石地球化学特征显示具有富硅（SiO_2 = 72.16%）、富碱（$K_2O + Na_2O$ = 8.6%）、贫钙（CaO = 1.2%），较高 Ga/Al 比值（3.68），稀土元素配分曲线呈现“海鸥式”分布特征（负 Eu 异常），在微量元素原始地幔标准化蛛网图上显示 Sr、P、Eu 和 Ti 的负异常，推测为与磁海岩体同期演化稍晚期侵位的 A 型花岗岩，反映了磁海岩浆演化的时限及北山地区当时无水、非造山的环境，与磁海辉绿岩、辉长辉绿岩、磁南辉长岩在微量配分模式上相似，在稀土配分模式上存在 Eu 互补，结合主量元素特征，认为磁南辉石岩、辉长岩、磁海辉绿岩、辉长辉绿岩、磁海外围北侧角闪石英正长岩应为同源岩浆演化的结果，角闪石英正长岩与辉长岩、辉绿岩为同期且成因上互补关系，同为北山裂谷带中的坡北地区坡一镁铁-超镁铁岩体与邻近的碱性花岗岩（251.4 ± 1.8Ma，Qin *et al.*，2011，Su *et al.*，2011b）、坡一早二叠世镁铁-超镁铁岩体与邻近的 A 型花岗岩（272.0 ± 1.9Ma；薛胜超等，2016）时代相近，也反映了二者为同期且成因上互补关系，因此，磁海角闪石英正长岩与辉长岩、辉绿岩共同构成双峰式侵入岩系列，可能与早二叠世塔里木地幔柱的岩浆活动密切相关。

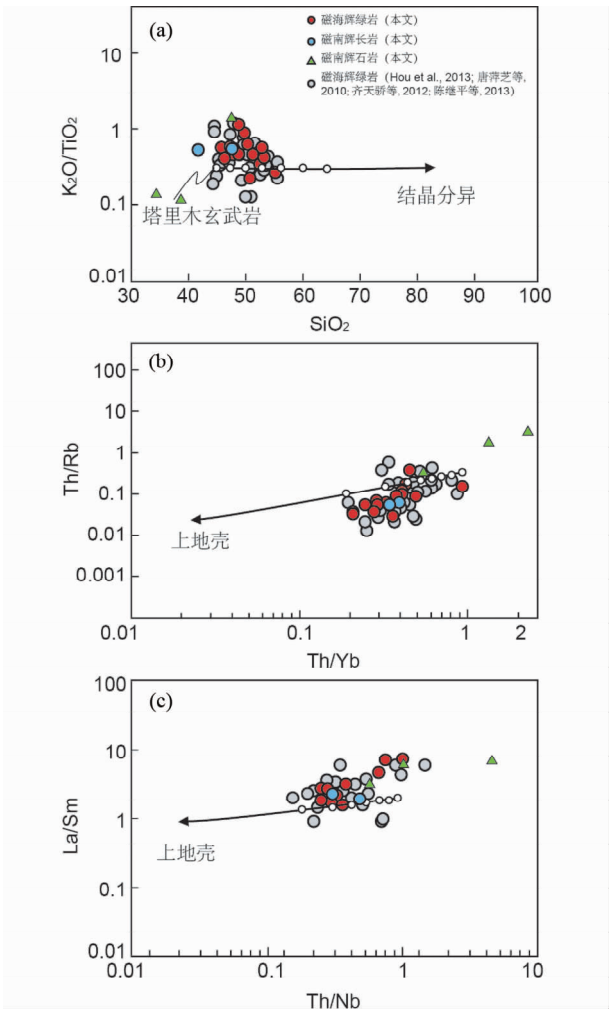

图 9　磁海、磁南基性-超基性岩的 SiO_2-K_2O/TiO_2（a）、Th/Yb-Th/Rb（b）和 Th/Nb-La/Sm（c）相关性图

塔里木玄武岩数据据 Zhou *et al.*，2009（样品 AQ3-10），上地壳数据据 Talyor and McLennan，1995，模拟过程据 Ersoy and Helvaci，2010

Fig. 9　Plot of SiO_2 vs. K_2O/TiO_2（a），Th/Yb vs. Th/Rb（b）and Th/Nb vs. La/Sm（c）for Cihai and Cinan mafic-ultramafic rocks

Data for the Tarim basalts are from Zhou *et al.*，2009，Upper crust data are from（UC）Talyor and McLennan，1995，modelling process after Ersoy and Helvaci，2010

5.2　分离结晶和同化混染

前人针对磁海辉绿岩的结晶分异和同化混染进行过较多研究，Hou *et al.*（2013）认为磁海大多数辉绿岩具有低 $Mg^{\#}$ 的特征，为岩浆演化的产物，岩石是在相对低氧逸度的环境下结晶的，在演化过程中经历了橄榄石和单斜辉石的结晶分异，少量的地壳混染作用。唐萍芝等（2012）通过磁海辉绿岩微量和稀土元素分析，认为岩浆上升侵位过程中局部遭受陆壳混染。孟庆鹏等（2014）根据磁海的角闪辉长岩和磁南的粗晶辉长岩的全岩主、微量成分不同的特征，认为两者为不同成分的原始岩浆经不同演化过程的产物。

由于磁海矿区位于塔里木盆地的东北缘，且磁海镁铁-超镁铁岩在时间上也与塔里木大火成岩省岩浆活动相一致，利用 Ersoy and Helvaci（2010）的软件，模拟磁海辉绿岩和磁南辉长岩的结晶分异（fractional crystallization，FC）和地壳混染过程（assimilation，混合端元为上地壳；Talyor and McLennan，1995）。选择塔里木玄武岩（Zhou *et al.*，2009）$Na_2O + K_2O$、SiO_2 含量最低，Al_2O_3 含量较低，MgO 含量和 $Mg^{\#}$ 均最高的样品做为结晶分异的初始值，同样选择 $Mg^{\#}$ 为 58.8、SiO_2 含量为 49.99%（除去 LOI 重新 100% 之后）的 CH39（辉绿岩）样品作为上地壳混染的端元。模拟结果显示，磁海辉绿岩和磁南辉长岩的主量元素显示受结晶分异作用控制（图 9a），可能与塔里木玄武岩有成因联系，同时 Th/Yb、Th/Rb、Th/Nb、La/Sm 微量元素比值显示，上述两个岩石均经历了少量的上地壳混染作用（图 9b，c）。而磁南的辉石岩无法用塔里木玄武岩进行拟合，可能由于在岩浆演化的早期阶段，岩浆演化主要受磁铁矿分离结晶控制。

5.3　钛铁氧化物及金属硫化物成矿作用

氧逸度（f_{O_2}）对岩浆的演化趋势和岩浆型 Ti-Fe 氧化物

矿床都起着至关重要的作用(Hunter and Sparks, 1987; McBirney and Naslund, 1990; Tegner, 1997; Duchesne, 1999; Cawthorn, 2001; 徐义刚等, 2003; Pang *et al.*, 2008)。氧逸度高会导致磁铁矿早结晶,从而导致岩浆中硅的富集和铁的亏损(Obsorn, 1959; Toplis and Carroll, 1995),且在氧逸度较高的情况下,磁铁矿先于钛铁矿结晶(Toplis and Carroll, 1995)。磁海矿区辉石岩中仅含磁铁矿,辉长岩及辉绿岩中仅含钛铁矿,显然磁铁矿结晶早于钛铁矿,这说明磁铁矿结晶时岩浆初始的氧逸度较高,随着磁铁矿的结晶,Ti 不断在残余岩浆中富集,这与显微镜下观察到的磁南辉长岩及磁海辉绿岩中开始出现钛铁矿化且在磁海辉绿岩钛铁矿化最强相一致,然而由于整个岩浆的 Ti 含量总体偏低,时间上岩浆又已经演化到辉绿岩相(次火山岩),终究未能形成独立的钛铁矿石;尽管随着磁铁矿的结晶,将消耗岩浆中大量的氧,氧逸度逐渐降低,开始逐渐形成金属硫化物,如:在磁南辉石岩中开始出现了海绵陨铁状的磁黄铁矿,在磁南辉长岩中同样含有金属硫化物,但辉长岩中钛铁矿的出现说明当时岩浆并不处于相对还原的状态,并不十分有利于硫化物的结晶,加之稀土、微量特征显示岩浆受壳源混染作用微弱,这就限制了大量壳源硫的带入,未能使岩浆中硫达到饱和,这与磁海矿区的磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿 3 种硫化物中的硫具有幔源特征(薛春纪等, 2000)相一致,上述因素可能是磁海铁矿仅含少量硫化物,而未形成独立的、上规模的金属硫化物矿体的主要原因。

5.4 构造意义

前人对于北山这套与岩浆铜镍硫化物和磁铁矿矿床有关的镁铁-超镁铁岩石所产出的构造环境有不同认识,主要观点有俯冲作用(Xiao *et al.*, 2004),造山后伸展(李锦轶等, 2002; Mao *et al.*, 2008; 袁峰等, 2010; Zhang *et al.*, 2011; 孟庆鹏等, 2014),以及近年受到越来越多关注的地幔柱模式(Zhou *et al.*, 2004; Pirajno *et al.*, 2008, 2011; Zhang *et al.*, 2010)和地幔柱与造山带的叠置作用(Qin *et al.*, 2011; Su *et al.*, 2011a, b)等模式。

陈升平和朱云海(1992)详细研究了新疆北山地区石炭纪、二叠纪火山岩的岩石化学,认为二叠纪火山岩具有裂谷型双峰式特点,得出新疆北山地区早二叠世以强烈拉张为特征的结论。前人对磁海早二叠世镁铁质岩石研究同样认为其形成于拉张环境,如陈继平等(2013)研究认为磁海辉绿岩为板内拉张环境的产物,唐萍芝等(2010)、Hou *et al.* (2013)和 Huang *et al.* (2013)通过对磁海矿区基性岩的地球化学研究,得出了磁海铁矿形成于后碰撞拉张环境的认识,陈毓川等(2008)和 Huang *et al.* (2013)认为磁海含矿辉绿岩形成于二叠纪伸展背景,是与区内早二叠世火山活动有关的次火山岩体。齐天骄(2013)认为磁海矿区辉绿岩等基性岩浆可能为地幔柱的一支。

北疆地区的镁铁-超镁铁岩体大多沿着区域断裂分布,但是又在不同的构造单元均有出露(阿尔泰造山带南缘、东天山觉罗塔格构造带、中天山地块、北山地区等),同时代岩体跨不同构造单元产出。北疆三塘湖盆地(266 ~ 273Ma, Zhou *et al.*, 2006)、吐哈盆地(272 ~ 291Ma, Zhou *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2013)、塔里木盆地(272 ~ 291Ma, Tian *et al.*, 2010; Xia *et al.*, 2012; 杨树峰等, 1996, 2005; Yang *et al.*, 2006; Yu *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2008, 2010)和柳园/红柳河地区(278 ~ 300Ma, Pan *et al.*, 2008)广泛出露二叠纪玄武岩,东天山地区还存在晚石炭纪与自然铜矿化有关的玄武岩(袁峰等, 2007; 张达玉等, 2012),造山作用/造山后伸展机制无法解释侵入岩并不完全受断裂构造控制和区域上大量发育的二叠纪同期同源玄武岩。

塔里木盆地高的航磁异常从盆地西端玄武岩出露地区沿着盆地的覆盖区一直延伸到北山地区(杨文采等, 2012)。北山地区发育很多南北向的基性岩墙,穿切地层和二叠纪镁铁-超镁铁岩(Pirajno *et al.*, 2008)。上述特征都说明北山地区的镁铁-超镁铁岩可能与塔里木大火成岩省的岩浆活动有关。位于北山地区的磁海矿区同时发育辉绿岩、辉长岩、辉石岩、玄武岩等岩相,且磁海辉绿岩、磁南辉长岩和磁海北侧的角闪石英正长岩近于一致的形成时代,形成了一套完整的大规模岩浆活动造成的火山岩-次火山岩(275.1 ± 2.2Ma)-侵入岩(273.0 ± 1.9Ma)-晚期碱性岩(273.0 ± 1.8Ma)的成岩次序。因此北山地区的磁海镁铁-超镁铁岩的成岩、成矿作用可能均与在时间和空间上与其最接近的塔里木大火成岩省有密切关系。

6 结论

(1)新疆北山地区磁海铁矿区辉绿岩、辉长辉绿岩、磁南辉长岩及磁海北侧角闪石英正长岩 SIMS 锆石 U-Pb 年龄分别为 281.9 ± 3.2Ma、275.1 ± 2.2Ma、273.0 ± 1.9Ma 和 273.0 ± 1.8Ma,显示出磁海地区次火山岩-侵入岩-晚期碱性岩具有相似的形成时代,均形成于早二叠世。

(2)磁南辉石岩、辉长岩、磁海辉绿岩、辉长辉绿岩及磁海北边的角闪石英正长岩为同源岩浆演化的产物。在岩浆的演化过程中受地壳混染的作用微弱,在岩浆演化的早期,磁铁矿的分离结晶主导着岩浆成分的改变,当磁铁矿分离结晶完成后,从辉长岩演化阶段开始,岩浆以结晶分异作用为主。

(3)辉石岩是磁海铁矿区的主要含矿岩石,对于钛铁氧化物而言,辉长岩和辉绿岩不含磁铁矿,仅含极少量钛铁矿,含量未达到钛铁矿化;磁铁矿先于钛铁矿结晶,磁海岩浆熔离型的金属硫化物结晶介于两者之间,但时间上非常接近,三者随岩浆演化而存在过渡共生。

(4)磁海镁铁-超镁铁岩的母岩浆性质可能与塔里木玄武岩类似,在成岩及成矿作用上可能均与其在时空上最近的塔里木大火成岩省有密切关系。

致谢 论文野外工作得到了宝钢集团新疆八钢公司雅满苏矿业有限责任公司磁海铁矿相关工作人员的支持与帮助；SIMS 锆石 U-Pb 年龄测试得到中国科学院地质与地球物理研究所李献华研究员、李秋立研究员等的支持；主微量分析得到中国核工业北京地质研究院分析测试研究中心修群业研究员等工作人员的支持与帮助；同时论文成文过程中得到课题组诸位同仁的有益建议，使作者的思路得到了开阔；承蒙审稿专家薛春纪教授、王玉往研究员提出中肯建议，使文稿得以提升。在此一并致以衷心的感谢。

References

Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Fisher NI. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(5): 602 – 622

Cawthorn RG. 2001. Genesis of magmatic oxide deposits: A view from the Bushveld Complex. Norwegian Geol. Survey (NGU) Report, 42: 21 – 28

Chen JP, Liao QA, Luo T, Zhang XH, Guo DB, Zhu HL and Liu XM. 2013. Zircon U-Pb geochronology and genesis study on the mafic complex from diabase-type iron deposit in Cihai, Beishan area. Geological Science and Technology Information, 32(4): 76 – 83 (in Chinese with English abstract)

Chen SP and Zhu YH. 1992. Rock chemistry and analysis of its structural environment for Carboniferous-Permian volcanic in Beishan, Xinjiang. Earth Science, 17(6): 647 – 656 (in Chinese with English abstract)

Chen YC, Liu DQ, Tang YL *et al*. 2008. Mineral Resources and Mineralization System in Tianshan, China. Beijing: Geological Publishing House, 313 – 322 (in Chinese with English abstract)

Claesson S, Vetrin V, Bayanova T and Downes H. 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola Peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. Lithos, 51(1 – 2): 95 – 108

Duchesne JC. 1999. Fe-Ti deposits in Rogaland anorthosites (South Norway): Geochemical characteristics and problems of interpretation. Mineralium Deposita, 34(2): 182 – 198

Ersoy Y and Helvaci C. 2010. FC-AFC-FCA and mixing modeler: A Microsoft excel spreadsheet program for modeling geochemical differentiation of magma by crystal fractionation crustal assimilation and mixing. Computers and Geosciences, 36(3): 383 – 390

Feng HY, Xu YX, Qin KZ, Tang DM, Guo HB, San JZ and Mao YJ. 2014. Geochemistry and zircon U-Pb geochronology of Getashankou mafic-ultramafic intrusions, eastern Tianshan, and its implication for Ni-Cu mineralization. Acta Petrologica Sinica, 30(6): 1558 – 1574 (in Chinese with English abstract)

Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Wang YX, Tang JH, Wang CS, Xi AH and Zheng YC. 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1103 – 1120 (in Chinese with English abstract)

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP zircon U-Pb ages of Kalatongke No. 1 and Huangshandong Cu-Ni-bearing mafic-ultramafic complexes, North Xinjiang and geological implications. Chinese Science Bulletin, 49(22): 2324 – 2328 (in Chinese)

Hou T, Zhang ZC, 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. Journal of Asian Earth Sciences, 70 – 71: 231 – 249

Huang XW, Zhou MF, Qi L, Gao JF and Wang YW. 2013. Re-Os isotopic ages of pyrite and chemical composition of magnetite from the Cihai magmatic-hydrothermal Fe deposit, NW China. Mineralium Deposita, 48(8): 925 – 946

Hunter RH and Sparks RSJ. 1987. The differentiation of the Skaergaard intrusion. Contrib. Mineral. Petrol., 95(4): 451 – 461

Li HQ, Mei YP, Qu WJ, Cai H and Du GM. 2009. SHRIMP zircon U-Pb and Re-Os dating of No. 10 intrusive body and associated ores in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and its significance. Mineral Deposit, 28(5): 633 – 642 (in Chinese with English abstract)

Li JX, Qin KZ, Xu XW, Sun H, Cheng SL, Wu H and Mo XH. 2007. Geochemistry of Baishiquan Cu-Ni-earing mafic-ultramafic complex in East Tianshan, Xinjiang: Constraints on ore genesis and tectonic setting. Mineral Deposits, 26(1): 43 – 57 (in Chinese with English abstract)

Li JY, Wang KZ, Li WQ, Guo HC, Song B, Wang Y, Mo SG, Zhao ZR, Zhu ZX and Pan CZ. 2002. Tectonic evolution since the Late Paleozoic and mineral prospecting in the eastern Tianshan Mountains, NW China. Xinjiang Geology, 20(4): 295 – 301 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Presise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. Geochem. Geiphys. Geosyst., 10: Q04010, doi: 10.1029/2009GC002400

Li Y, Su W, Kong P, Qian YX, Zhang KY, Zhang ML, Chen Y, Cai XY and You DH. 2007. Zircon U-Pb ages of the Early Permian magmatic rocks in the Tazhong-Bachu region, Tarim basin by LA-ICP-MS. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 1097 – 1107 (in Chinese with English abstract)

Ludwig KR. 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. Berkeley Geochronology Centre Special Publication. No. 1a, 1 – 55

Mao JW, Pirajno F, Zhang ZH, Chai FM, Wu H, Chen SP, Cheng SL, Yang JM and Zhang CQ. 2008. A review of the Cu-Ni sulfide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes. Journal of Asian Earth Sciences, 32(2 – 4): 184 – 203

Mao QG, Xiao WJ, Han CM, Sun M, Yuan C, Yan Z, Li JL, Yong Y and Zhang JE. 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the eastern Tianshan, Xinjiang Province: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 153 – 162 (in Chinese with English abstract)

Mao YJ, Qin KZ, Tang DM, Xue SC, Feng HY and Tian Y. 2014. Multiple stages of magma emplacement and mineralization of eastern Tianshan, Xinjiang: Examplified by the Huangshan Ni-Cu deposit. Acta Petrologica Sinica, 30(6): 1575 – 1594 (in Chinese with English abstract)

McBirney AR and Naslund HR. 1990. The differentiation of the Skaergaard intrusion: A discussion of Hunter and Sparks. Contrib. Mineral. Petrol., 104(2): 235 – 240

Meng QP, Chai FM, Li Q, Zheng JH, Shao FZ, Geng XX and Han WQ. 2014. Zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes and the petrogenesis of mafic intrusions in the Cihai Fe (-Co) deposit, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 30(1): 109 – 124 (in Chinese with English abstract)

Nielsen RL, Gallahan WE and Newberger F. 1992. Experimentally determined mineral-melt partition coefficients for Sc, Y and REE for olivine, orthopyroxene, pigeonite, magnetite and ilmenite: Contributions to Mineralogy and Petrology, 110(4): 488 – 499

Obsorn EF. 1959. Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magmas. Am. J. Sci, 257: 609 – 647

Pan JH, Guo ZJ, Liu C and Zhao ZH. 2008. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of Permian basalts in Hongliuhe area on the border between Xinjiang and Gansu. Acta Petrologica Sinica, 24(4): 793 – 802 (in Chinese with English abstract)

Pang KN, Li C, Zhou MF and Ripley EM. 2008. Abundant Fe-Ti oxide inclusions in olivine from the Panzhihua and Hongge layered

intrusions, SW China: Evidence for early saturation of Fe-Ti oxides in ferrobasaltic magma. Contrib. Mineral. Petrol., 156(3): 307 – 321

Pidgeon RT, Nemchin AA and Hitchen GJ. 1998. Internal structures of zircons from Archaean granites from the Darling Range batholith: Implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. Contributions to Mineralogy and Petrology, 132(3): 288 – 299

Pirajno F, Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Chai FM. 2008. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tianshan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits. Journal of Asian Earth Sciences, 32(2 – 4): 165 – 183

Pirajno F, Seltmann R and Yang YQ. 2011. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China. Geoscience Frontiers 2(2):157 – 158

Qi TJ, Xue CJ, Zhang ZC, Wang YH and Shao FZ. 2012. Basic igneous rock in Cihai giant iron district, Hami, Xinjiang, and its indication to the metallogenic setting. Earth Sciences, 37(6): 1315 – 1326 (in Chinese with English abstract)

Qi TJ. 2013. The Large-scale metallogetic process of iron in the Cihai iron district, Xinjiang Province. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 1 – 64 (in Chinese with English summary)

Qin KZ. 2000. Metellogeneses in relation to Central-Asia style orogeny of northern Xinjiang. Post-Doctor Research Report. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, CAS, 1 – 194 (in Chinese with English summary)

Qin KZ, Sun S, Li JL, Hao J, Xiao WJ and Wang ZH. 2001. Temporal-spatial distribution pattern of metallic deposits as criteria of tectonic environment of northern Xinjiang. In: Proceedings of China Post-doctor Symposium (Solid Earth Sciences Volume). Beijing: Science Press, 540 – 545 (in Chinese with English abstract)

Qin KZ, Su BX, Sakyi PA, Tang DM, Li XH, Sun H, Xiao QH and Liu PP. 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. 280Ma mantle plume. American Journal of Science, 311(3): 237 – 260

Qin KZ, Tang DM, Su BX, Mao YJ, Xue SC, Tian Y, Sun H, San JZ, Xiao QH and Deng G. 2012. The tectonic setting, style, basic feature, relative erosion degree, ore-bearing evacuation sign, potential analysis of mineralization of Cu-Ni-bearing Permian mafic-ultramafic complexes, northern Xinjiang. Northwestern Geology, 45(4): 83 – 116 (in Chinese with English abstract)

Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. Earth Planet. Sci. Lett., 26(2): 207 – 221

Su BX, Qin KZ, Sun H and Wang H. 2010. Geochronological, petrological, mineralogical and geochemical studies of the Xuanwoling mafic-ultramafic intrusion in Beishan area, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 26(11): 3283 – 3294 (in Chinese with English abstract)

Su BX, Qin KZ, Sakyi PA, Li XH, Yang YH, Sun H, Tang DM, Liu PP, Xiao QH and Malaviarachchi SPK. 2011a. U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircons from Late Paleozoic mafic-ultramafic units in the southern Central Asian Orogenic Belt: Tectonic implications and evidence for an Early Permian mantle plume. Gondwana Research, 20(2 – 3): 516 – 531

Su BX, Qin KZ, Sakyi PA, Liu PP, Tang DM, Malaviarachchi SPK, Xiao QH, Sun H, Dai YC and Hu Y. 2011b. Geochemistry and geochronology of acidic rocks in the Beishan region, NW China: Petrogenesis and tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 41(1): 31 – 43

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 – 345

Talyor SR and McLennan SM. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell Publications, 1 – 312

Tang DM, Qin KZ, LI CS, Qi L, Sun BX and Qun WJ. 2011. Zircon dating, Hf-Sr-Nd-Os isotopes and PGE geochemistry of the Tianyu sulfide-bearing mafic-untramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China. Lithos, 126(1 – 2): 84 – 98

Tang DM, Qin KZ, Su BX, Sakyi PA, Liu YS, Mao Q, Santosh M and Ma YG. 2013. Magma source and tectonics of the Xiangshanzhong mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China, traced from geochemical and isotopic signatures. Lithos, 170 – 171: 144 – 163

Tang PZ, Wang JB, Wang YW and Long LL. 2010. Geochemical characteristics of mafic-ultramafic rocks in the Cihai ore district, Xinjiang, and their geological significance. Geochimica, 39(6): 542 – 552 (in Chinese with English abstract)

Tang PZ, Wang YW, Wang JB, Long LL and Liao Z. 2012. Geochemical characteristics of cobalt from the Cihai ore district, Xinjiang, and their significance. Acta Mineralogica Sinica, 32(3): 379 – 385 (in Chinese with English abstract)

Tegner C. 1997. Iron in plagioclase as a monitor of the differentiation of the Skaergaard intrusion. Contrib. Mineral. Petrol., 128(1): 45 – 51

Tian W, Campbell IH, Allen CM, Guan P, Pan WQ, Chen MM, Yu HJ and Zhu WP. 2010. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from Northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis. Contrib. Mineral. Petrol., 160(3): 407 – 425

Toplis MJ and Carroll MR. 1995. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic systems. J. Petrol., 36(5): 1137 – 1170

Wang YW, Sha JM and Cheng C. 2006a. Composition of magnetite from the Cihai Fe(Co) deposit, Xinjiang, and its genetic significance. Mineral Deposits, 25(Suppl.): 321 – 324 (in Chinese with English abstract)

Wang YW, Wang JB, Wang LJ, Peng XM, Hui WD and Qin QX. 2006b. A intermediate type of Cu-Ni sulfide and V-Ti magnetite deposit: Xiangshanxi deposit, Hami, Xinjiang, China. Acta Geologica Sinica, 80(1): 61 – 73 (in Chinese with English abstract)

Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Driffin WL, Meier M, Oberli F, Vonquadt A, Roddick JC and Speigel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. Geostand. Newsl., 19(1): 1 – 23

Xia LQ, Xu XY, Li XM, Ma ZP and Xia ZC. 2012. Reassessment of petrogenesis of Carboniferous-Early Permian rift-related volcanic rocks in the Chinese Tianshan and its neighboring areas. Geoscience Frontiers, 3(4): 445 – 471

Xiao QH, Qin KZ, Tang DM, Su BX, Sun H, San JZ, Cao MJ and Hui WD. 2010. Xiangshanxi composite Cu-Ni-Ti-Fe deposit belongs to comagmatic evolution product: Evidences from ore microscopy, zircon U-Pb chronology and petrological geochemistry, Hami, Xinjiang, NW China. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 503 – 522 (in Chinese with English abstract)

Xiao WJ, Zhang LC, Qin KZ, Sun S and Li JL. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implication for the continental growth of central Asia. American Journal of Science, 304(2 – 4): 370 – 395

Xu YG, Mei HJ, Xu JF, Huang XL, Wang YJ and Chung SL. 2003. Origin of two differentiation trends in the Emeishan flood basalts. Chinese Science Bulletin, 48(4): 383 – 387 (in Chinese)

Xue CJ, Ji JS and Yang QJ. 2000. Subvolcanic hydrothermal metallogeny of the Cihai iron (cobalt) deposit, Xinjiang. Mineral Deposits, 19(2): 156 – 164 (in Chinese with English abstract)

Xue SC, Qin KZ, Tang DM, Mao YJ, Yao ZS and Kang Z. 2015. Origin of Early Permian A-type granite in Poyi area, NE Tarim plate: Constrains from mineralogy, geochronology, zircon Hf-O isotopes and

geochemistry. Acta Petrologica Sinica, in review (in Chinese with English abstract)
Yang SF, Chen HL, Dong CW, Jia CZ and Wang ZG. 1996. The discovery of Permian syenite inside Tarim basin and its geodynamic significance. Geochimica, 25(2): 121 – 128 (in Chinese with English abstract)
Yang SF, Chen HL, Ji DW, Li ZL, Dong CW, Jia CZ and Wei GQ. 2005. Geological process of early to middle Permian magmatism in Tarim Basin and its geodynamic significance. Geological Journal of China Universities, 11(4): 504 – 511 (in Chinese)
Yang SF, Li ZL, Chen HL, Chen W and Yu X. 2006. ^{40}Ar-^{39}Ar dating of basalts from Tarim Basin, NW China and its implication to a Permian thermal tectonic event. Journal of Zhejiang University-Science A, 7(Suppl. II): 320 – 324
Yang WC, Wang JL, Zhong HZ and Chen B. 2012. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim Basin. Chinese Journal of Geophysics, 55(4): 1278 – 1287 (in Chinese with English abstract)
Yu X, Yang SF, Chen HL, Chen ZQ, Li ZL, Batt GE and Li YQ. 2011. Permian flood basalts from the Tarim basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. Gondwana Research, 20(2 – 3): 485 – 497
Yuan F, Zhou TF, Fan Y, Tan LG, Cooke D, Meffre S, Wang QM and Wang WJ. 2007. LA-ICPMS U-Pb age of zircon from basalt of Matoutan Group in Shilipo native copper mineralized area, eastern Tianshan, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 23(8): 1973 – 1980 (in Chinese with English abstract)
Yuan F, Zhou TF, Zhang DY, Fan Y, Liu S, Peng MX and Zhang JD. 2010. Geochemical characteristics of the basalt from the native copper mineralization area in Eastern Tianshan, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 533 – 546 (in Chinese with English abstract)
Zhang DY, Zhou TF, Yuan F, Liu S, Lu YJ, Xu C and Ning FQ. 2012. Geochronology and geological indication of the native copper mineralized basalt formation in Jueluotage area, Eastern Tianshan, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 28(8): 2392 – 2400 (in Chinese with English abstract)
Zhang YT, Liu JQ and Guo ZF. 2010. Permian basaltic rocks in the Tarim basin, NW China: Implications for plume-lithosphere interaction. Gondwana Research, 18(4): 596 – 610
Zhang YY, Dosta J, Zhao ZH, Liu C and Guo ZJ. 2011. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of mafic and ultramafic rocks from southern Beishan area, NW China: Implications for crust-mantle interaction. Gondwana Research, 20(4): 816 – 830
Zhang ZH, Mao JW, Du AD, Pirajno F, Wang ZL, Chai FM, Zhang ZC and Yang JM. 2008. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance. Journal of Asian Earth Sciences, 32(2 – 4): 204 – 217
Zhao YM, Lin WW, Bi CS, Li DX and Jiang CJ. 2012. China Skarn Deposit. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 411 (in Chinese)
Zhao YS. 2000. The geological feature and genesis of Cihai iron deposit, Xinjiang. Northwestern Geology, 33(1): 31 – 38 (in Chinese with English abstract)
Zheng JH, Meng QP, Liu HL, Wu B, Liu F, Li Q and Han WQ. 2014. Geochronology of intrusive rocks and their constraint on formation age of Cihai iron deposit, Eastern Tianshan Mountains, Xinjiang. Mineral Deposits, 33(2): 271 – 285 (in Chinese with English abstract)
Zhou DW, Liu YQ, Xing XQ, Hao JR, Dong YP and Ouyang ZJ. 2006. Paleotectonic settings reconstruction and tracing of regional structural background of Permian basalts in Tu-Ha and Santanghu basins in Xinjiang. Science in China (Series D), 32(2): 143 – 153 (in Chinese)
Zhou MF, Lesher CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. Chemical Geology, (209): 233 – 257
Zhou MF, Zhao JH, Jiang CY, Gao JF, Wang W and Yang SH. 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. Lithos, 113(3 – 4): 583 – 594

附中文参考文献

陈继平，廖群安，罗婷，张雄华，郭东宝，朱和林，柳小明. 2013. 北山磁海辉绿岩型铁矿区基性杂岩锆石 U-Pb 年代学及岩石成因. 地质科技情报，32(4)：76 – 83
陈升平，朱云海. 1992. 新疆北山石炭纪、二叠纪火山岩岩石化学及其构造环境分析. 地球科学，17(6)：647 – 656
陈毓川，刘德权，唐延龄等. 2008. 中国天山矿产及成矿体系. 北京：地质出版社，313 – 322
冯宏业，许英霞，秦克章，唐冬梅，郭海兵，三金柱，毛亚晶. 2014. 东天山圪塔山口镁铁-超镁铁质岩体地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其对 Ni-Cu 成矿的指示. 岩石学报，30(6)：1558 – 1574
顾连兴，张遵忠，吴昌志，王银喜，唐俊华，汪传胜，郗爱华，郑远川. 2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识. 岩石学报，22(5)：1103 – 1120
韩宝福，季建清，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. 科学通报，49(22)：2324 – 2328
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 同位素定年及其意义. 矿床地质，28(5)：633 – 642
李金祥，秦克章，徐兴旺，孙赫，程松林，吴华，莫新华. 2007. 新疆东天山白石泉 Cu-Ni 硫化物矿床杂岩体的地球化学特征及其对矿床成因和构造背景的制约. 矿床地质，26(1)：43 – 57
李锦轶，王克卓，李文铅，郭华春，宋彪，王瑜，莫申国，赵子然，朱志新，潘成泽. 2002. 东天山晚古生代以来大地构造与矿产勘查. 新疆地质，20(4)：295 – 301
李勇，苏文，孔屏，钱一雄，张克银，张明利，陈跃，蔡习尧，尤东华. 2007. 塔里木盆地塔中-巴楚地区早二叠世岩浆岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. 岩石学报，23(5)：1097 – 1107
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. 岩石学报，22(1)：153 – 162
毛亚晶，秦克章，唐冬梅，薛胜超，冯宏业，田野. 2014. 东天山岩浆铜镍硫化物矿床的多期次岩浆侵位与成矿作用——以黄山铜镍矿床为例. 岩石学报，30(6)：1575 – 1594
孟庆鹏，柴凤梅，李强，郑佳浩，邵发志，耿新霞，韩文清. 2014. 新疆磁海铁(钴)矿区镁铁质岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及岩石成因. 岩石学报，30(1)：109 – 124
潘金花，郭召杰，刘畅，赵泽辉. 2008. 新甘交界红柳河地区二叠纪玄武岩年代学、地球化学及构造意义. 岩石学报，24(4)：793 – 802
齐天骄，薛春纪，张招崇，王银宏，邵发志. 2012. 新疆磁海超大型铁矿区基性岩及其成矿背景指示. 地球科学，37(6)：1315 – 1326

齐天骄. 2013. 新疆磁海大规模铁成矿过程研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1 – 64

秦克章. 2000. 新疆北部中亚型造山与成矿作用. 博士后研究工作报告. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1 – 194

秦克章, 孙枢, 李继亮, 郝杰, 肖文交, 王志洪. 2001. 金属矿床时空分布样式作为大地构造环境的标志——以北疆为例. 见: 中国博士后学术大会论文集(固体地球科学). 北京: 科学出版社, 540 – 545

秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 毛亚晶, 薛胜超, 田野, 孙赫, 三金柱, 肖庆华, 邓刚. 2012. 北疆二叠纪镁铁-超镁铁岩铜、镍矿床的构造背景、岩体类型、基本特征、相对剥蚀程度、含矿性评价标志及成矿潜力分析. 西北地质, 45(4): 83 – 116

苏本勋, 秦克章, 孙赫, 王恒. 2010. 新疆北山地区旋窝岭镁铁-超镁铁岩体的年代学、岩石矿物学和地球化学研究. 岩石学报, 26(11): 3283 – 3294

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. 地球化学, 39(6): 542 – 552

唐萍芝, 王玉往, 王京彬, 龙灵利, 廖震. 2012. 新疆哈密磁海铁矿床中钴的地球化学及其地质意义. 矿物学报, 32(3): 379 – 385

王玉往, 沙建明, 程春. 2006a. 新疆磁海铁(钴)矿床磁铁矿成分及其成因意义. 矿床地质, 25(S): 321 – 324

王玉往, 王京彬, 王莉娟, 彭晓明, 惠卫东, 秦全新. 2006b. 岩浆铜镍矿与钒钛磁铁矿的过渡类型——新疆哈密香山西矿床. 地质学报, 80(1): 61 – 73

肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 三金柱, 曹明坚, 惠卫东. 2010. 新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物——矿相学、锆石 U-Pb 年代学及岩石地球化学证据. 岩石学报, 26(2): 503 – 522

徐义刚, 梅厚钧, 许义峰, 黄小龙, 王岳军, 钟孙霖. 2003. 峨眉山大火成岩省中两类岩浆分异趋势及其成因. 科学通报, 48(4): 383 – 387

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. 矿床地质, 19(2): 156 – 164

薛胜超, 秦克章, 唐冬梅, 毛亚晶, 姚卓森, 康珍. 2015. 塔里木东北缘早二叠世坡一 A 型花岗岩的成因: 来自矿物学、年代学、锆石 Hf-O 同位素与地球化学的制约. 岩石学报, 评审中

杨树峰, 陈汉林, 董传万, 贾承造, 汪振国. 1996. 塔里木盆地二叠纪正长岩的发现及其地球动力学意义. 地球化学, 25(2): 121 – 128

杨树峰, 陈汉林, 冀登武, 厉子龙, 董传万, 贾承造, 魏国齐. 2005. 塔里木盆地早-中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义. 高校地质学报, 11(4): 504 – 511

杨文采, 王家林, 钟慧智, 陈冰. 2012. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构. 地球物理学报, 55(4): 1278 – 1287

袁峰, 周涛发, 范裕, 谭绿贵, Cooke D, Meffre S, 王庆民, 王卫江. 2007. 新疆东天山十里坡自然铜矿化区马头滩组玄武岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄及其意义. 岩石学报, 23(8): 1973 – 1980

袁峰, 周涛发, 张达玉, 范裕, 刘帅, 彭明兴, 张建滇. 2010. 东天山自然铜矿化带玄武岩的起源、演化及成岩构造背景. 岩石学报, 26(2): 533 – 546

张达玉, 周涛发, 袁峰, 刘帅, Lu YJ, 许超, 宁福泉. 2012. 新疆东天山觉罗塔格地区自然铜矿化玄武岩的成岩年代及其地质意义. 岩石学报, 28(8): 2392 – 2400

赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 李大新, 蒋崇俊. 2012. 中国矽卡岩矿床. 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矿床成因. 西北地质, 33(1): 31 – 38

郑佳浩, 孟庆鹏, 刘海龙, 武斌, 刘锋, 李强, 韩文清. 2014. 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. 矿床地质, 33(2): 271 – 285

周鼎武, 柳益群, 刑秀娟, 郝建荣, 董云鹏, 欧阳征健. 2006. 新疆吐-哈、三塘湖盆地二叠纪玄武岩形成古构造环境恢复及区域构造背景示踪. 中国科学(D 辑), 32(2): 143 – 153