

河北高寺台含铬超基性岩杂岩体成岩成矿时代及岩石成因^{*}

李立兴¹ 李厚民¹ 崔艳合¹ 朱明玉¹ 王德忠² 杨秀清³ 刘明军³ 陈靖¹

LI LiXing¹, LI HouMin¹, CUI YanHe¹, ZHU MingYu¹, WANG DeZhong², YANG XiuQing³, LIU MingJun³ and CHEN Jing¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 河北省地质矿产勘查开发局第四地质大队, 承德 067000

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. The 4th Geological Team of Hebei Geology and Mining Bureau, Chengde 067000, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2012-08-05 收稿, 2012-10-07 改回.

Li LX, Li HM, Cui YH, Zhu MY, Wang DZ, Yang XQ, Liu MJ and Chen J. 2012. Geochronology and petrogenesis of the Gaositai Cr-bearing ultramafic complex, Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3757–3771

Abstract Located in the northern margin of the North China Craton (NCC), the concentric zoning Gaositai ultramafic complex show features of chromite-bearing dunite in the core, surrounded subsequently by wehrlite and clinopyroxenite, and minor hornblende in the rim. Chemically, the Gaositai ultramafic complex display systematic decrease of $Mg^{\#}$, negatively sloped REE patterns with no Eu anomalies and high LILEs with low HFSEs such as Nb and Zr from core to rim, implying a fractional crystallization trend during magma evolution. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of three chromite samples and one clinopyroxenite sample show that emplacement of the Gaositai ultramafic complex was 213 ± 1 Ma, which occurred in Late Triassic, implying the geodynamic setting of lithospheric extension after final collision of the Mongolian arc terranes in the NCC. The $\varepsilon_{Hf}(t)$ values of the zircons aged from 214 Ma to 211 Ma for the clinopyroxenite range from -2.0 to $+1.6$, implying that the parental magma was derived from a mixed source composed of depleted mantle source and enriched lithospheric mantle source, with significant crustal contamination during its ascending. Inherited zircons were widespread in the Gaositai ultramafic complex, with ages from 2800 Ma to 244 Ma. Four groups were detected: 2.6 ~ 2.5 Ga, 400 ~ 360 Ma, 300 ~ 280 Ma and 244 Ma, recording Neoproterozoic, Middle Devonian, Early Permian and Late Permian-Middle Triassic magmatism in the northern margin of the NCC.

Key words Chromite; Late Triassic; Ultramafic rocks; Gaositai; North China Craton

摘要 河北高寺台含铬超基性岩杂岩体产于华北克拉通北缘, 具有环状分带的特征, 核部为纯橄岩, 向外依次为辉橄岩、辉石岩、角闪石岩, 各岩相之间为过渡接触关系, 在纯橄岩相中赋存有铬铁矿床。本文对该杂岩体的锆石年龄、Hf 同位素和主量、微量元素进行了测试和研究。结果表明, 随着基性程度的降低, 各岩相岩石在主量元素特征上呈现连续的变化特征, Al_2O_3 、 TiO_2 和 K_2O 逐渐升高, MgO 含量逐渐降低; 微量元素特征上配分曲线形态相似, 具有富集 Ba、K 等 LILEs, 亏损 Nb、Zr 等 HFSEs, 稀土元素具一定程度的分异, 无明显 Eu 异常的特征, 说明各岩相为同源岩浆结晶分异作用的产物。通过对 3 件铬铁矿石和 1 件辉石岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 确定高寺台含铬超基性岩杂岩体的成岩成矿时代为 213 ± 1 Ma, 为晚三叠世, 形成于华北板块和西伯利亚板块碰撞后的伸展阶段; 年龄值介于 214 ~ 211 Ma 之间的锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值介于 0.282589 ~ 0.282693 之间, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 介于 -2.0 ~ $+1.6$ 之间, 说明高寺台含铬超基性岩杂岩体的岩浆源区组成为亏损地幔物质和富集地幔物质的混合, 在岩浆上升过程中有大陆地壳物质的混染, 其侵位时代晚三叠世可能代表了华北克拉通北缘岩石圈减薄的开始。高寺台杂岩体年龄测试样品中广泛存在继承锆石, 其年龄值介于 2800 ~ 244 Ma 之间, 分布范围宽, 但相对集中于 2.6 ~

* 本文受公益性行业专项课题(201111002)和地质大调查项目(1212011121070、1212011120988)联合资助。

第一作者简介: 李立兴, 男, 1984 年生, 博士生, 矿床学专业, E-mail: lilixing1984@sina.com

2. 5Ga、400~360Ma、300~280Ma、244Ma 共 4 个年龄段,很可能是岩浆上升过程中的捕获锆石,记录了区域内在新太古代、中泥盆世、早二叠世、晚二叠世-中三叠世存在的岩浆活动。

关键词 铬铁矿;晚三叠世;超基性岩;高寺台;华北克拉通

中图法分类号 P588.125; P597.3

铬铁矿矿床可分为豆荚状和层状两种类型(Thayer, 1964)。豆荚状铬铁矿产于蛇绿岩中,为我国铬铁矿床的主要类型,以西藏罗布莎和新疆萨尔托海等铬铁矿床为代表(Zhou and Bai, 1992; 鲍佩声等, 1999; 杨经绥等, 2010);层状铬铁矿在我国数量少,规模小,主要分布于华北克拉通,且多数产于同心环状侵入体的纯橄岩相中,其中铬尖晶石以高 Fe 的特征区别于豆荚状铬铁矿床, Zhou and Bai (1992) 称其为高寺台型,以产于高寺台、平顶山、放马峪含铬超基性岩杂岩体中的铬铁矿床为代表。

高寺台含铬超基性岩杂岩体及其中铬铁矿床的成岩成矿年龄长期存在争议,最早的认识是 244Ma 和 248Ma (河北省地质矿产局, 1974^①, 1989), 近年来又获得了 280Ma (辉长岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法, Chen *et al.*, 2009)、<265Ma (辉石岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 法, Zhang *et al.*, 2009) 的年龄数据, 但所获得的年龄值差异较大, 制约了对高寺台超基性岩杂岩体成岩成矿时代和形成构造背景的认识。最新研究认为, 高寺台超基性岩杂岩体为阿拉斯加型岩体, 形成构造背景与弧后环境的伸展作用密切相关, 且明显受到了地壳物质的混染 (Chen *et al.*, 2009; Tian *et al.*, 2011), 这也为岩体中可能形

成岩浆锆石提供了物质条件, 为成岩成矿年龄的精确厘定提供了可能。近年来, 前人对冀东地区东湾子含铬基性-超基性岩体和冀北地区小张家口含铬超基性岩体中辉石岩的锆石 U-Pb 定年都获得了有效的岩体侵位年龄 (Zhao *et al.*, 2007; 田伟等, 2007)。这两个岩体中的辉石岩在矿物组成上都以单斜辉石为主, 并含少量的钛磁铁矿和磷灰石为特征 (陈斌等, 2008; 马旭等, 2009), 与冀东高寺台含铬超基性岩体中的辉石岩的特征一致, 说明继续开展高寺台岩体中辉石岩的锆石定年有可能获得有效的成岩年龄数据。

本文选取高寺台含铬铁矿超基性岩杂岩体中的网环状铬铁矿石(2件)、稠密浸染状铬铁矿石(1件)、辉石岩(1件)挑选锆石做 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年研究, 结合不同岩相岩石地球化学分析, 探讨了高寺台超基性岩杂岩体的岩石成因和成岩成矿时代。

1 地质背景及岩体地质特征

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一, 其结晶基底

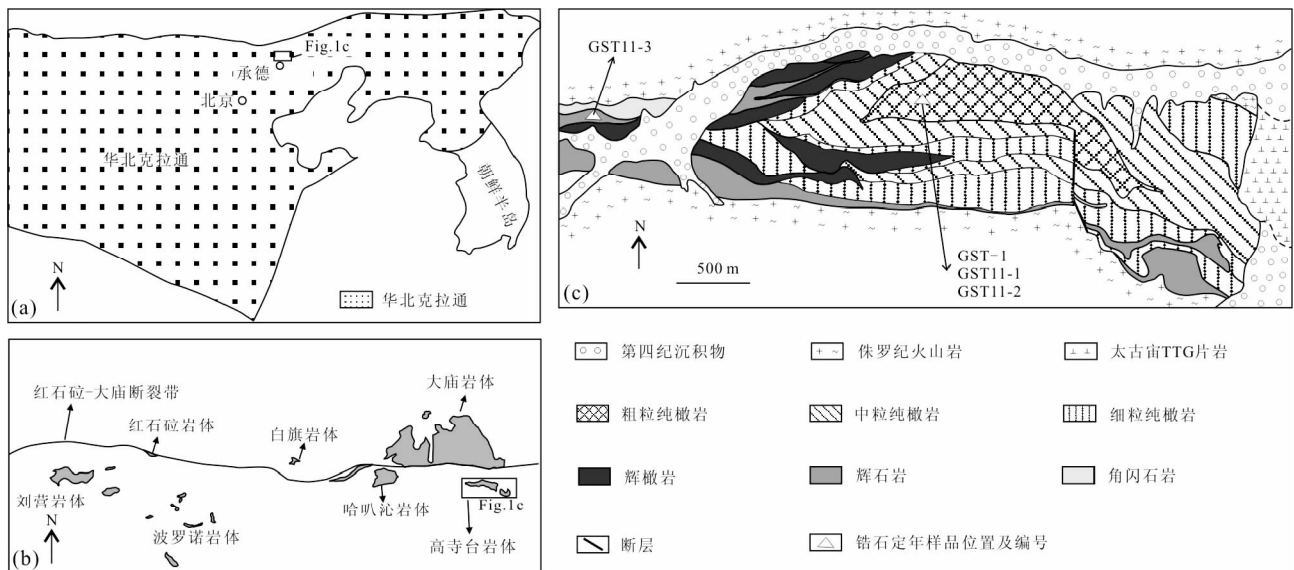


图 1 华北克拉通北缘地质简图(a, 引自 Chen *et al.*, 2009) 和沿红石砬-大庙断裂带的基性-超基性岩分布简图(b) 及高寺台超基性岩杂岩体地质图(c, 据中国地质科学院地质矿产所, 1973 修改)

Fig. 1 Sketch geological map of northern NCC (a, after Chen *et al.*, 2009), schematic map showing the distribution of the mafic-ultramafic complexes along with the Hongshila-damiaio fault and geological map of the Gaositai ultramafic complex (a, modified after IMR, CAS, 1973)

① 河北省地质矿产局. 1974. 承德幅 1:200000 区域地质图

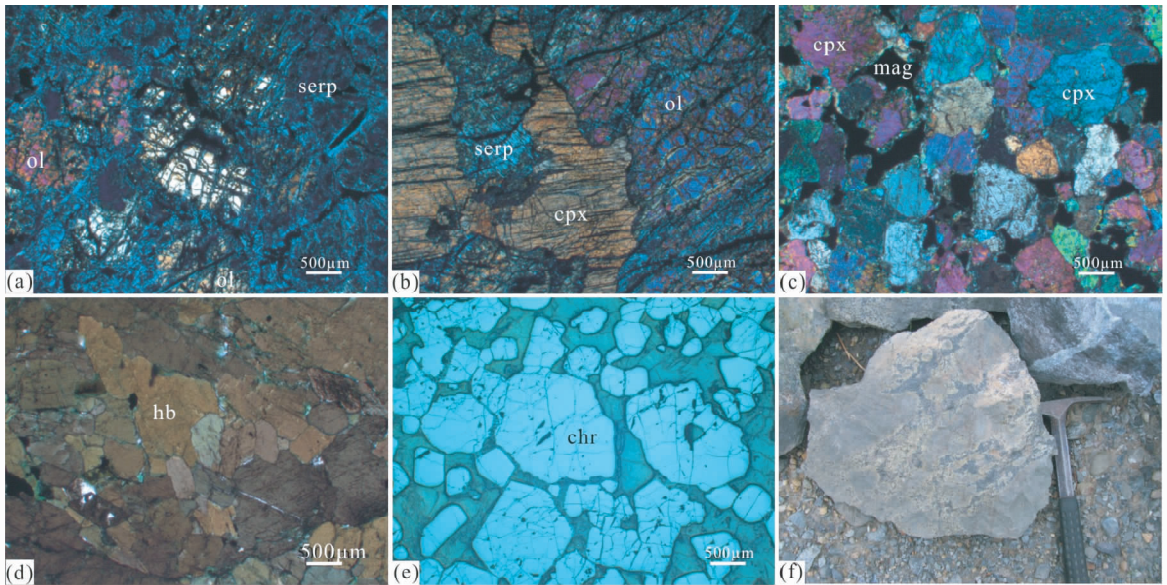


图2 高寺台超基性岩杂岩镜下照片

(a)-蛇纹石化细粒纯橄岩;(b)-辉橄岩;(c)-辉石岩;(d)-角闪石岩;(e)-稠密浸染状铬铁晶石;(f)-网环状铬铁晶石。ol-橄榄石;serp-蛇纹石;cpx-透辉石;hb-角闪石;chr-铬尖晶石

Fig.2 Photomicrographs of the Gaositai ultramafic complex

(a)-dunite; (b)-wehrlite; (c)-clinopyroxenite; (d)-hornblendite; (e)-disseminated chromite; (f)-chromite veinlets. ol-olivine; serp-serpentine; cpx-clinopyroxene; hb-hornblende; chr-chromite

由太古代-古元古代的角闪岩相-麻粒岩相的变质岩系组成(图1a)(Jahn *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 2005)。在华北克拉通北缘的结晶基底内,沿东西向断裂带发育大量晚古生代-早中生代的基性-超基性岩杂岩体、闪长岩及花岗岩体。其中,冀东承德地区沿东西向红石砬-大庙断裂带分布有多个基性-超基性岩杂岩体,如铁马哈叭沁辉石岩-角闪石岩杂岩体、红石砬辉石岩-角闪石岩杂岩体和高寺台含铬超基性岩杂岩体等(图1b),这些岩体中多赋存有丰富的全铁品位介于12%~20%的超贫铁矿资源(李厚民等, 2009),其中高寺台超基性岩杂岩体还发育铬铁矿床。这些岩体中除高寺台岩体侵入时代争议较大外,其它多形成于400~360Ma(倪志耀等, 2004; Zhang *et al.*, 2009; 李立兴等, 2012)。

高寺台含铬超基性岩杂岩体位于红石砬-大庙断裂带南侧。岩体平面形态近椭圆,东西出露长8km,中部最宽1km,面积约为6.5km²。岩体向西侵入到太古宙单塔子群变质岩系中,向东被中侏罗统砾岩、安山岩和第四系松散层所覆盖,中部膨大向北突出(图1c)。该含铬铁矿超基性岩杂岩体具有环状分带的特征,核部为纯橄岩,向外为辉橄岩,边缘为辉石岩和角闪石岩,各岩相略呈对称环带分布。粗粒纯橄岩分布于岩体中轴核心部位偏北部,中、细粒纯橄岩依次大体环绕粗粒纯橄岩分布,它们构成了岩体的主体。辉橄岩和橄榄辉石岩分布于细粒纯橄岩岩相的两侧,辉石岩主要分布于岩体的东西两端和岩体中段南北两侧,构成一不完整的岩体镶边,角闪石岩仅局部集中分布于岩体东端南侧和岩体西段北侧。

纯橄岩是赋存铬铁矿的主要岩石,岩体中的纯橄岩岩相是一个整体的岩相带,只是根据结构不同而划分粗、中、细粒纯橄岩,它们之间没有明显的界限,而呈渐变关系。粗粒纯橄岩橄榄石呈自形-半自形不等粒状,粒径3~10mm,蛇纹石化网格构造发育,橄榄石残晶只达40%,岩石蛇纹石化强烈,致使岩石颜色变浅;中粒纯橄岩1~3mm,呈半自形-自形等粒状;细粒纯橄岩中橄榄石粒径一般在1mm以下,呈自形等粒状(图2a)。

辉橄岩呈褐黑色,具黄色斑点,蛇纹石细脉发育,致密块状构造,中粒结构,岩石主要由橄榄石和透辉石组成(图2b),副矿物为磁铁矿(2%)和铬尖晶石(<1%)。橄榄石呈半自形晶粒状,粒径0.5~1mm,多已发生蛇纹石化,并伴随有磁铁矿析出;透辉石呈他形粒状结构,粒径0.5~1mm,部分发生蛇纹石化。辉橄岩岩与纯橄岩岩之间为渐变过渡接触关系,未见切穿现象。

橄榄辉石岩为黑绿色,块状构造,中粒结构,岩石主要由透辉石(75~80%)、橄榄石(10%~20%)、蛇纹石(5%~10%)等组成,其中橄榄石部分已发生蛇纹石化,并伴随少量的磁铁矿析出。辉石岩为灰绿色,中粗粒结构,块状构造,岩石主要由透辉石(80%~90%)、钛磁铁矿(3%~5%)、橄榄石(<3%)、蛇纹石(3%~5%)及少量的蚀变矿物角闪石、绿帘石和绿泥石组成(图2c)。

角闪石岩为黑绿色,块状构造,细状结构,岩石主要由角闪石(80%~95%)、铁钛氧化物(5%~15%)、磷灰石(5%~8%)、透辉石(<3%)组成(图2d)。角闪石呈自形-半自

形长柱状,简单双晶发育,矿物颗粒最长可达 15cm;铁钛氧化物为钛磁铁矿和钛铁矿,稀疏浸染状分布,钛铁矿由钛磁铁矿出溶形成,呈条带状或格架状;磷灰石呈自形长柱状,与铁钛氧化物密切共生。

铬矿体主要集中分布在岩体中部膨大向北突出部位的粗粒纯橄岩中部,主要矿体沿走向倾斜,虽连续性好,但多有膨缩、分支和复合的特点,绝大多数矿体延深与延长大体相同,倾向北,倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。矿体形态复杂,主要为扁豆状、透镜状、脉状、似脉状。根据铬铁矿及脉石矿物的相对含量及其排列组合方式不同,将矿石分为致密块状构造、浸染状构造(图 2e)、同生角砾状构造、网环状构造(图 2f)、斑点状浸染矿石和浸染条带状构造。矿石的结构根据铬尖晶石颗粒的结晶程度及粒度大小,可分为:自形中粗粒结构,粒径多为 1~3mm,个别达 4~5mm 或更大;自形不等粒结构,粒径从 0.5mm 到 1cm;自形-半自形不等粒结构;他形结构。此外尚有由于交代作用形成的交代结构和由于应力作用所形成的压碎结构。

矿石的矿物成分主要金属矿物为铬尖晶石,其次有少量磁铁矿,局部可见极细粒的黄铁矿。主要脉石矿物为橄榄石、蛇纹石,其次有少量绿泥石、云母、铬云母、蛭石等。铬尖晶石主要产于纯橄岩中,而辉石岩和角闪石岩中基本上不含铬尖晶石。

2 样品及分析方法

2.1 锆石测年

本文选取 3 件位于岩体中部的铬铁矿矿石(GST-1、GST11-1、GST11-2)及 1 件位于岩体西部的辉石岩(GST11-3)挑选锆石开展测年分析。其中 GST-1、GST11-1 为网环状构造的铬铁矿(图 2f),采样位置见图 1c。样品呈灰白色,镜下偶见橄榄石残晶,铬尖晶石自形-半自形粒状结构,粒径 0.5~5mm。GST11-2 为稠密浸染状构造的铬铁矿(图 2e),采样位置见图 1c,主要由铬尖晶石和蛇纹石组成,铬尖晶石自形-半自形粒状结构,粒径 0.5~5mm。GST11-3 为岩体西端的辉石岩(图 2c),采样位置见图 1c,样品为灰褐色,由透辉石(90%)、钛磁铁矿(4%)、橄榄石(3%),少量的蚀变矿物角闪石、绿帘石和绿泥石(共约 3%)组成。

本文锆石年龄测试样品每件重约 30kg。锆石的分选工作在河北省廊坊科大岩石矿物分选实验室进行,首先将每件样品破碎,采用重选、磁选,在双目镜下挑选出锆石晶体颗粒。将锆石嵌入直径为 22mm 的环氧树脂靶中,并进行抛光。锆石阴极发光图像分析在北京离子探针中心进行,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在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完成。锆石定年分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀所用束斑直径为 25 μm ,频率为 10Hz,能量密度约为 2.5J/cm²,以 He 为

载气。LA-MC-ICP-MS 激光剥蚀采样采用单点剥蚀的方式,测试过程中在每测定 5~7 个样品前后重复测定两个锆石 GJ1 (²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄 $610 \pm 2\text{Ma}$, Elhoul *et al.*, 2006) 对样品进行校正,并测量一个锆石 Plesovice,观察仪器的状态和测试的重现性,锆石标准定年精度和准确度均在 1% (2σ) 左右。样品锆石 U-Pb 谐和图用 isoplot 3.0 制作(Ludwig, 2003)。详细的仪器参数及实验流程见侯可军等(2009)。

2.2 锆石 Hf 同位素分析

四件样品中最年轻的岩浆锆石测定结果均分布于 214~211Ma 之间,这些锆石在阴极发光图像上及 U-Pb 同位素数据特征都较为一致。本文仅选择最具代表性的辉石岩样品 GST11-3 中的 12 颗²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值介于 214~211Ma 的锆石进行了原位锆石 Hf 同位素分析,其测点与锆石 U-Pb 测点位置及编号一致。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所 Neptune 多接收等离子质谱(MC-ICP-MS)和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行的。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用 55 μm ,测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质。分析过程中锆石标准 GJ1 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值为 0.282015 ± 31 (2SD, $n = 10$),与文献报道值(侯可军等, 2007; Elhoul *et al.*, 2006) 在误差范围内完全一致。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。

2.3 主量、微量元素测试

本文选取 3 件纯橄岩,1 件辉橄岩,3 件辉石岩及 1 件角闪石岩开展主微量元素分析,样品编号及岩性特征见表 3。全岩的主量元素分析、微量元素分析、稀土元素分析在北京大学完成,其中主量元素分析采用 XRF 法,稀土元素及微量元素使用等离子质谱仪(ICP-MS)测定。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年结果

对网环状铬铁矿矿石样品 GST-1 中的 13 粒锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 测年,锆石的阴极发光图像见图 3,测试数据见表 1,谐和图见图 4。年龄值从老到新有四组年龄:(1)1 颗锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄 $2431 \pm 5\text{Ma}$, Th/U = 0.70,位于谐和线下方,表明有 Pb 丢失,锆石呈他形浑圆状,对应的阴极发光图像锆石发育非晶状圆形环带的内核,具有继承锆石的特征;(2)1 颗锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄 $293 \pm 3\text{Ma}$, Th/U = 0.58,位于谐和线上,具有清晰的岩浆环带;(3)7 颗锆石数据点都落在谐和线上,得出 $244 \pm 1\text{Ma}$ 等时线年龄,MSWD = 0.37;²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄 $244 \pm 2\text{Ma}$ (MSWD = 0.19),锆石呈自形短或长柱状,长轴长 75~150 μm ,阴极发光图像上

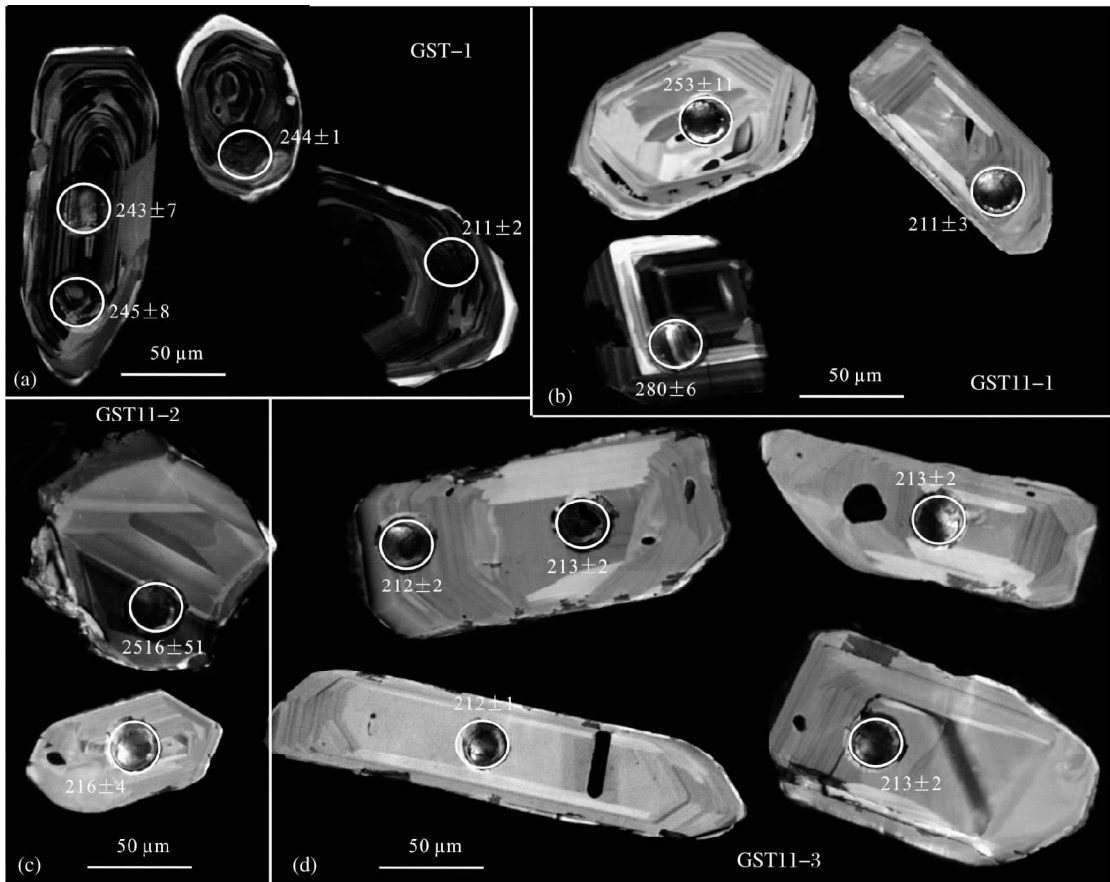


图3 高寺台超基性岩杂岩体部分代表性锆石阴极发光图像

Fig.3 Representative CL images with LA-ICP-MS U-Pb analyses spots of zircons from the chromites and clinopyroxenite in the Gaositai complex

锆石环带细密清楚, Th/U 介于 0.56 ~ 1.85 之间, 平均 0.94; (4) 4 颗锆石数据点都落在谐和线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $212 \pm 3\text{Ma}$, 锆石呈自形短柱状, 长轴长 100 ~ 130 μm , Th/U 介于 0.63 ~ 1.01 之间, 平均 0.77, 这些锆石阴极发光图像上发育清晰的振荡环带, 属于典型的岩浆锆石。

对网环状铬铁矿矿石样品 GST11-1 中的 10 粒锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 锆石的阴极发光图像见图 3, 测试数据见表 1, 谐和图见图 4。锆石表面年龄值介于 2587 ~ 211Ma 之间。最年轻的年龄为 $211 \pm 3\text{Ma}$, $\text{Th}/\text{U} = 0.65$, 锆石形态为长柱状, 长轴长 100 μm , 阴极发光图像上锆石无分带而呈类似斑块状, 具有基性岩浆锆石的特征, 数据点位于谐和线上, 代表了铬铁矿的形成年龄; 继承锆石的表面年龄从老到新分别为 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 $2587 \pm 13\text{Ma}$, $2389 \pm 6\text{Ma}$, $2139 \pm 13\text{Ma}$, 位于谐和线下方, 有 Pb 丢失, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $956 \pm 7\text{Ma}$, $603 \pm 12\text{Ma}$, $461 \pm 4\text{Ma}$, $286 \pm 2\text{Ma}$, $280 \pm 6\text{Ma}$, $253 \pm 11\text{Ma}$, 都落在谐和线上及附近。

对稠密浸染状铬铁矿矿石样品 GST11-2 中的 16 粒锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 锆石的阴极发光图像见图 3, 测试数据见表 1, 谐和图见图 4。锆石表面年龄值介于 2800

~ 199Ma 之间。其中最年轻的 6 个年龄介于 221 ~ 199Ma 之间, Th/U 介于 0.64 ~ 0.86 之间, 锆石形态为自形长柱状, 长轴长 60 ~ 150 μm , 阴极发光图像上锆石无分带而呈类似斑块状, 具有基性岩浆锆石的特征, 数据点都分布在谐和线附近, 其加权平均年龄 $210 \pm 9\text{Ma}$ (MSWD = 5.9), 代表了铬铁矿的形成年龄。锆石 U-Pb 测试中还获得了多个继承锆石的年龄, 其中在谐和线上 4 颗表面年龄从老到新分别为 $2545 \pm 4\text{Ma}$, $2516 \pm 51\text{Ma}$, $1917 \pm 9\text{Ma}$, $364 \pm 2\text{Ma}$, 其它数据都有不同程度的 Pb 丢失, 投点落在谐和线下方。

对辉石岩样品 GST11-3 中的 17 粒锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 锆石的阴极发光图像见图 3, 测试数据见表 1, 谐和图见图 4。锆石表面年龄值介于 2633 ~ 211Ma 之间, 其中最年轻的 12 个年龄介于 214 ~ 211Ma 之间, Th/U 介于 0.62 ~ 1.42 之间, 锆石形态为自形长柱状, 长轴长 60 ~ 170 μm , 阴极发光图像上锆石无分带而呈斑块状, 具有基性岩浆锆石的特征, 数据点分布集中, 其中 11 个点落在谐和线附近, 加权平均年龄 $213 \pm 1\text{Ma}$ (MSWD = 0.24), 代表了辉石岩的形成年龄。锆石 U-Pb 测试中还获得了多个继承锆石的年龄, 其中在谐和线上 1 颗锆石表面年龄为 $2502 \pm 7\text{Ma}$, 其

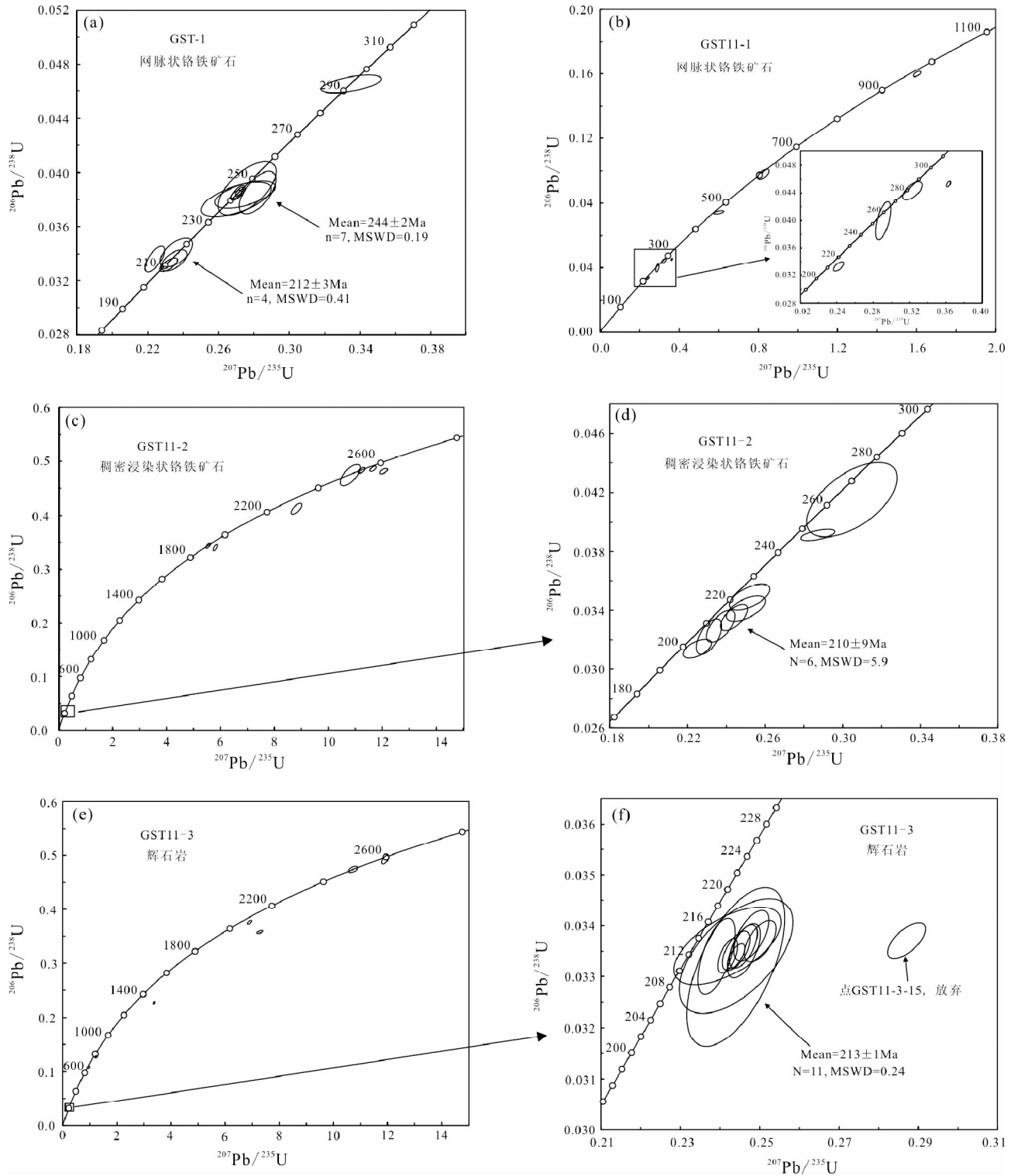


图4 高寺台超基性岩杂岩体锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb age concordia diagrams of zircons from the chromites and clinopyroxenite in the Gaositai ultramafic complex

它数据都有不同程度的 Pb 丢失。

3.2 锆石 Hf 同位素

由表 2 可见, 12 颗锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值除 GST11-13-7 略

大外, 其他值均明显小于 0.002, 说明锆石形成后具有较低的放射性成因 Hf 积累, 所测 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 可以代表锆石从岩浆结晶时的 Hf 同位素组成。辉石岩中锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围较小, 介于 0.282589 ~ 0.282693 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 -2.03

表 1 高寺台超基性岩杂岩体锆石 U-Pb 同位素测年数据

Table 1 U-Pb isotopic results of zircons from the chromites and clinopyroxenite in the Gaositai ultramafic complex

测点号	Th/U ($\times 10^{-6}$)		Th/U	Pb ($\times 10^{-6}$)	^{207}Pb	1σ	^{207}Pb	1σ	^{206}Pb	1σ	$t_{207/206}$ (Ma)	$\pm\sigma$	$t_{207/235}$ (Ma)	$\pm\sigma$	$t_{206/238}$ (Ma)	$\pm\sigma$
	U	^{206}Pb			^{235}U		^{238}U									
GST-1-1	991	980	1.01	47.7	0.0724	0.0226	0.232	0.0033	0.0332	0.0004	996	669.6	211.7	2.7	210.6	2.2
GST-1-2	658	975	0.67	36.6	0.0491	0.0002	0.235	0.0050	0.0335	0.0005	150.1	11.1	214	4.1	212.3	3.3
GST-1-3	360	572	0.63	21.7	0.0482	0.0004	0.224	0.0036	0.0336	0.0007	109.4	13.9	205.3	3	213.2	4.1
GST-1-4	405	528	0.77	21.7	0.0501	0.0006	0.236	0.0062	0.0341	0.0007	198.2	30.5	215.4	5.1	215.9	4.6
GST-1-5	65	92	0.7	52	0.1576	0.0004	9.102	0.0752	0.418	0.0041	2431.5	4.8	2348.3	7.6	2251.2	18.5
GST-1-6	284	503	0.56	17.1	0.05	0.0005	0.27	0.0133	0.038	0.0009	194.5	24.1	243	10.6	240.6	5.3
GST-1-7	163	269	0.6	10.3	0.054	0.0041	0.275	0.0113	0.0384	0.0006	372.3	204.6	246.9	9	242.9	4
GST-1-8	2851	2998	0.95	133.4	0.051	0.0001	0.271	0.0025	0.0385	0.0004	239	10.2	243.5	2	243.7	2.2
GST-1-9	10359	5590	1.85	274.7	0.0534	0.0002	0.282	0.0067	0.0385	0.0011	342.7	4.6	251.9	5.3	243.4	6.6
GST-1-10	79	135	0.58	4.6	0.0515	0.0010	0.335	0.0114	0.0465	0.0004	264.9	46.3	293.6	8.6	293.2	2.7
GST-1-11	864	1263	0.68	45.2	0.0511	0.0003	0.27	0.0021	0.0384	0.0002	255.6	13	242.9	1.7	242.7	1.3
GST-1-12	958	1153	0.83	47.3	0.0511	0.0002	0.272	0.0016	0.0386	0.0002	255.6	9.3	244.4	1.2	244.4	1.3
GST-1-13	1537	1453	1.06	58.2	0.0517	0.0009	0.276	0.0108	0.0388	0.0013	272.3	38.9	247.8	8.6	245.4	8.3
GST11-1-1	83	158	0.52	215.9	0.0731	0.0003	1.603	0.0126	0.1599	0.0012	1016.7	10.6	971.3	4.9	956	6.5
GST11-1-2	98	93	1.04	74.5	0.0533	0.0024	0.291	0.0056	0.0399	0.0018	338.9	101.8	259.3	4.4	252.5	11.2
GST11-1-3	218	197	1.11	266.9	0.0589	0.0015	0.6	0.0172	0.0742	0.0006	564.9	55.5	477	10.9	461.2	3.7
GST11-1-4	251	102	2.46	1442.1	0.1529	0.0005	8.766	0.0495	0.4176	0.0023	2388.9	6.2	2314	5.2	2249.7	10.5
ST11-1-5	162	249	0.65	102	0.0529	0.0009	0.242	0.0038	0.0333	0.0005	324.1	38.9	219.8	3.1	211.2	2.9
GST11-1-6	24	68	0.35	200.3	0.1729	0.0014	10.723	0.1096	0.4515	0.0057	2587	13.3	2499.4	9.5	2401.8	25.3
GST11-1-7	600	223	2.69	3982	0.1331	0.0010	6.791	0.0528	0.3713	0.0027	2139.2	13	2084.6	6.9	2035.5	12.6
GST11-1-8	126	180	0.7	207.9	0.0611	0.0009	0.824	0.0184	0.0981	0.0021	642.6	33.3	610.5	10.3	603.3	12.1
GST11-1-9	94	127	0.74	95.3	0.053	0.0015	0.323	0.0072	0.0443	0.0009	327.8	63	284.3	5.5	279.7	5.5
GST11-1-10	146	260	0.56	124.3	0.0581	0.0004	0.363	0.0016	0.0453	0.0003	600	13	314.5	1.2	285.9	1.8
GST11-2-1	166	236	0.7	110.4	0.0529	0.0010	0.244	0.0045	0.0335	0.0006	324.1	44.4	221.9	3.7	212.6	3.7
GST11-2-2	170	238	0.71	133	0.0532	0.0010	0.25	0.0065	0.0341	0.0006	344.5	44.4	226.4	5.3	216	3.6
GST11-2-3	25	25	1.02	211.3	0.1816	0.0005	12.051	0.0820	0.4814	0.0030	2667.6	4.9	2608.4	6.4	2533.5	13.2
GST11-2-4	267	227	1.18	1332.5	0.1238	0.0011	5.807	0.0449	0.3402	0.0037	2013	15	1947.5	6.7	1887.9	17.9
GST11-2-5	265	314	0.84	152.1	0.052	0.0005	0.225	0.0048	0.0314	0.0004	287.1	22.2	206.3	4	199.3	2.7
GST11-2-6	39	144	0.27	282.8	0.1549	0.0005	8.813	0.1257	0.413	0.0066	2800	5.6	2318.9	13	2228.8	30.2
GST11-2-7	68	49	1.41	561.5	0.1741	0.0004	11.656	0.0743	0.4859	0.0032	2597.8	4	2577.2	6	2552.9	13.8
GST11-2-8	88	50	1.75	653.6	0.1658	0.0018	10.804	0.2523	0.4741	0.0130	2515.7	51.1	2506.4	21.7	2501.6	56.9
GST11-2-9	28	73	0.38	242.6	0.1688	0.0005	11.234	0.0829	0.4828	0.0032	2545.4	3.9	2542.7	6.9	2539.6	14
GST11-2-10	257	298	0.86	167.2	0.0523	0.0001	0.237	0.0049	0.0329	0.0007	298.2	3.7	216.2	4	208.7	4.4
GST11-2-11	248	220	1.13	1417.9	0.1174	0.0006	5.545	0.0502	0.3437	0.0033	1917	9.3	1907.6	7.8	1904.3	15.9
GST11-2-12	134	208	0.64	105.8	0.0525	0.0007	0.252	0.0067	0.0349	0.0006	305.6	36.1	228.5	5.4	221.1	3.6
GST11-2-13	199	261	0.76	120.3	0.052	0.0014	0.231	0.0043	0.0322	0.0008	287.1	56.5	210.7	3.5	204.3	5.1
GST11-2-14.1	164	159	1.03	101.6	0.0533	0.0009	0.287	0.0057	0.0391	0.0003	342.7	43.5	256.5	4.5	247.1	1.6
GST11-2-14.2	213	155	1.38	186.1	0.0532	0.0006	0.305	0.0155	0.0415	0.0016	338.9	21.3	270	12	262	10.1
GST11-2-15	312	150	2.08	411.5	0.0582	0.0003	0.571	0.0045	0.0712	0.0005	600	9.3	458.4	2.9	443.2	2.8
GST11-2-16	527	1036	0.51	722.6	0.0542	0.0003	0.434	0.0027	0.0582	0.0004	388.9	9.3	365.7	1.9	364.5	2.2
GST11-3-1	138	201	0.69	72.7	0.053	0.0010	0.244	0.0093	0.0334	0.0007	327.8	42.6	221.9	7.6	211.9	4.6
GST11-3-2.1	5	195	0.03	77.6	0.1078	0.0006	3.373	0.0199	0.2269	0.0017	1764.8	9.7	1498.2	4.6	1318.4	8.8
GST11-3-2.2	44	43	1.01	300	0.1335	0.0005	6.9	0.0408	0.375	0.0021	2146.3	6.3	2098.7	5.2	2053	10.1
GST11-3-3	490	345	1.42	297.4	0.053	0.0006	0.246	0.0024	0.0336	0.0003	327.8	24.1	223	1.9	213.1	1.8
GST11-3-4	132	212	0.62	81.8	0.0532	0.0005	0.246	0.0027	0.0335	0.0004	338.9	23.1	222.9	2.2	212.2	2.2
GST11-3-5	155	188	0.82	104.8	0.0533	0.0004	0.248	0.0030	0.0338	0.0003	342.7	21.3	225.3	2.5	214.4	2
GST11-3-6	75	80	0.94	601.1	0.1643	0.0008	10.718	0.1027	0.4734	0.0039	2501.9	7.3	2498.9	8.9	2498.5	17.2
GST11-3-7	361	305	1.18	232.4	0.0522	0.0012	0.242	0.0090	0.0336	0.0005	294.5	50	219.8	7.3	212.9	3.1
GST11-3-8	81	152	0.53	507	0.1477	0.0012	7.273	0.0663	0.3573	0.0016	2320.4	13.6	2145.4	8.1	1969.5	7.8
GST11-3-9.1	59	36	1.62	131.8	0.0651	0.0016	0.966	0.0207	0.1078	0.0013	775.9	51.8	686.6	10.7	660.1	7.7
GST11-3-9.2	59	33	1.83	112.5	0.0696	0.0015	1.246	0.0334	0.13	0.0032	916.7	44.4	821.4	15.1	787.9	18.4
GST11-3-10	413	368	1.12	270.8	0.053	0.0002	0.244	0.0014	0.0334	0.0002	327.8	12	221.9	1.2	212	1
GST11-3-11	269	327	0.82	156.5	0.0534	0.0026	0.244	0.0082	0.0332	0.0010	346.4	109.2	221.6	6.7	210.7	6.4
GST11-3-12	162	247	0.66	112.9	0.0539	0.0005	0.25	0.0027	0.0337	0.0003	368.6	22.2	227	2.2	213.8	1.7
GST11-3-13	204	176	1.16	1742.5	0.1768	0.0009	11.911	0.0752	0.4907	0.0046	2633.3	8.6	2597.4	5.9	2573.6	19.7
GST11-3-14	212	280	0.76	151.1	0.0521	0.0004	0.239	0.0031	0.0334	0.0005	287.1	12	217.9	2.5	211.8	3.1
GST11-3-15	148	222	0.67	100.7	0.0618	0.0010	0.287	0.0032	0.0337	0.0002	733.3	34.4	256.5	2.5	213.8	1.4
GST11-3-16	174	245	0.71	107.5	0.0529	0.0004	0.244	0.0023	0.0335	0.0003	324.1	16.7	222	1.9	212.5	1.6
GST11-3-17	564	480	1.17	357.1	0.0525	0.0002	0.242	0.0017	0.0334	0.0002	309.3	7.4	219.7	1.4	211.7	1.4

表2 高寺台超基性岩杂岩体辉石岩(GST11-3)锆石 Hf 同位素分析结果

Table 2 Hf isotopic data of zircons from the clinopyroxenite in the Gaositai ultramafic complex

测点号	age (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
GST11-3-1	212	0.282655	0.000022	0.001317	0.000005	0.069597	0.000276	-4.1	0.3	853	1228	-0.96
GST11-3-3	213	0.282624	0.000019	0.000946	0.000012	0.050977	0.000548	-5.2	-0.7	888	1293	-0.97
GST11-3-4	212	0.282589	0.000024	0.001578	0.000038	0.084095	0.001699	-6.5	-2.0	953	1377	-0.95
GST11-3-5	214	0.282614	0.000022	0.001340	0.000035	0.071548	0.002177	-5.6	-1.1	912	1319	-0.96
GST11-3-7	213	0.282660	0.000021	0.001937	0.000044	0.106774	0.002158	-4.0	0.4	860	1221	-0.94
GST11-3-10	212	0.282693	0.000018	0.001799	0.000050	0.100752	0.002585	-2.8	1.6	810	1147	-0.95
GST11-3-11	211	0.282619	0.000018	0.000858	0.000003	0.044464	0.000346	-5.4	-0.9	893	1306	-0.97
GST11-3-12	214	0.282595	0.000021	0.001457	0.000034	0.076514	0.001431	-6.2	-1.8	941	1361	-0.96
GST11-3-14	212	0.282629	0.000025	0.001850	0.000012	0.104679	0.000681	-5.1	-0.7	903	1291	-0.94
GST11-3-15	214	0.282649	0.000020	0.001273	0.000027	0.064284	0.000242	-4.3	0.2	860	1239	-0.96
GST11-3-16	212	0.282644	0.000019	0.001661	0.000015	0.092768	0.000524	-4.5	-0.1	876	1254	-0.95
GST11-3-17	212	0.282679	0.000023	0.002154	0.000021	0.121266	0.001587	-3.3	1.1	837	1180	-0.94

注: $\varepsilon_{\text{Hf}}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - 1] \times 10,000$;

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = \{ [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1 \} \times 10,000$;

$t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \}$;

$t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \times \ln \{ 1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S},t} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] \} + t$;

$f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$;

其中 S = sample, t = 锆石结晶年龄, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997; Griffin *et al.*, 2000), $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Soderlund *et al.*, 2004), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}} = 0.015$

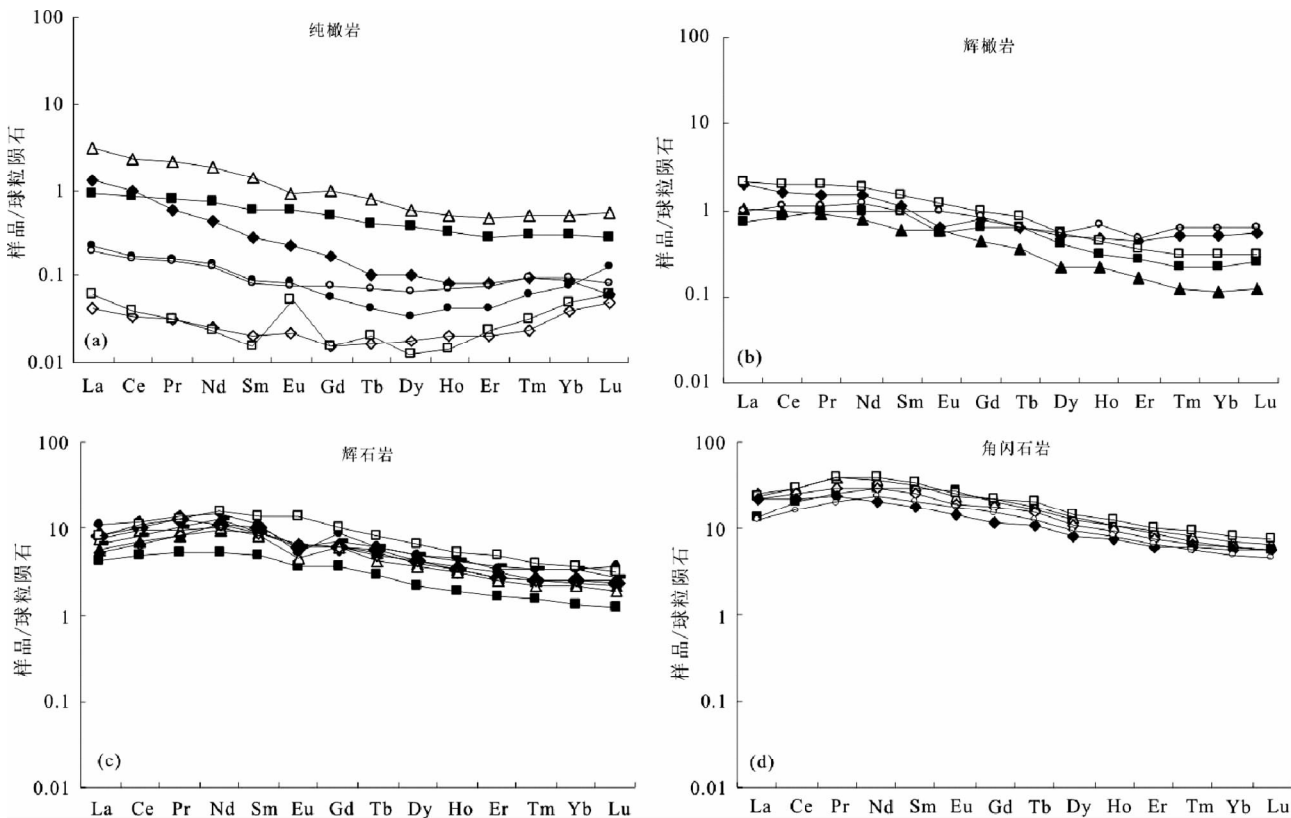


图5 高寺台超基性岩杂岩体稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(标准化值据 Boynton, 1984)

数据来源于本文, Chen *et al.*, 2009 和 Zhang *et al.*, 2009. 图6、图7 数据来源同此图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for the Gaositai ultramafic complex (normalization values after Boynton, 1984)

Data after this study, Chen *et al.*, 2009 and Zhang *et al.*, 2009. Data in Fig. 6 and Fig. 7 are the same as in this figure

表3 高寺台超基性岩杂岩体主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 3 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements compositions of the Gaositai ultramafic complex

样品号	GST-1	GST-3	GSTX-8	GSTX-3	GSTX-1	GST11-3	GSTX-4	GSTX-5	GSTX-6
岩性	纯橄岩	纯橄岩	纯橄岩	辉橄岩	辉石岩	辉石岩	辉石岩	角闪石岩	角闪石岩
SiO ₂	32.11	33.85	34.50	36.00	40.58	43.55	46.39	37.79	37.74
TiO ₂	0.02	0.04	0.18	0.04	1.34	0.15	0.41	1.98	1.99
Al ₂ O ₃	0.24	0.37	0.66	0.54	7.97	1.73	3.15	13.01	11.32
Fe ₂ O ₃	4.81	5.30	14.06	12.84	14.41	7.69	8.19	13.37	17.27
MnO	0.09	0.10	0.20	0.20	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12
MgO	42.30	44.88	38.90	39.93	19.96	30.36	22.98	16.36	16.45
CaO	0.10	0.33	0.15	0.49	9.40	11.00	16.25	10.25	9.92
Na ₂ O	/	/	/	/	1.53	0.12	0.31	2.55	2.20
K ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.02	2.29	0.02	0.06	1.84	1.38
P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03
Cr ₂ O ₃	0.55	0.18	0.32	0.05	0.10	0.12	0.10	0.01	0.02
NiO	0.14	0.17	0.09	0.11	0.02	0.04	0.02	0.01	0.02
Co ₃ O ₄	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
V ₂ O ₅	0.00	0.00	0.02	0.00	0.09	0.01	0.03	0.09	0.13
LOI	19.55	14.68	10.81	9.70	2.01	5.02	1.85	2.18	0.94
Total	99.93	99.93	99.94	99.94	99.86	99.94	99.89	99.60	99.55
La	0.39	0.28	0.93	0.62	2.49	1.32	1.69	4.24	3.97
Ce	0.77	0.69	1.83	1.29	8.66	3.95	5.89	16.25	13.66
Pr	0.07	0.10	0.25	0.18	1.59	0.65	1.00	3.13	2.44
Nd	0.25	0.44	1.13	0.87	9.34	3.24	5.61	18.02	13.92
Sm	0.06	0.12	0.27	0.22	2.76	0.95	1.68	5.57	4.08
Eu	0.02	0.04	0.07	0.05	1.01	0.27	0.49	1.96	1.33
Gd	0.05	0.13	0.25	0.21	2.72	0.93	1.63	5.47	4.01
Tb	0.01	0.02	0.04	0.03	0.40	0.13	0.24	0.78	0.58
Dy	0.03	0.12	0.19	0.17	2.10	0.71	1.30	4.08	3.09
Ho	0.01	0.02	0.04	0.03	0.39	0.13	0.24	0.75	0.57
Er	0.02	0.06	0.10	0.09	1.05	0.33	0.57	1.78	1.37
Tm	0.00	0.01	0.02	0.02	0.13	0.05	0.08	0.23	0.19
Yb	0.02	0.07	0.11	0.10	0.73	0.28	0.50	1.29	1.04
Lu	0.00	0.01	0.02	0.02	0.10	0.04	0.07	0.18	0.15
Li	0.35	0.83	0.36	1.04	7.55	2.05	4.09	4.28	3.65
Be	0.05	0.02	0.02	0.02	0.16	0.05	0.08	0.19	0.14
Sc	3.22	3.76	11.31	9.88	77.78	47.43	73.43	107.7	87.55
Cu	8.69	4.20	5.16	6.36	155.8	8.00	13.04	228.6	479.9
Zn	45.96	31.56	113.3	90.21	92.50	43.88	41.54	70.21	96.23
Ga	1.38	0.56	3.12	0.93	13.61	2.51	5.45	16.60	17.47
Rb	0.49	0.70	0.66	1.19	39.61	0.99	2.01	17.01	16.37
Sr	17.2	10.2	6.71	8.12	181.7	61.5	97.4	415	325
Y	0.18	0.61	0.91	0.84	9.54	3.17	5.73	17.81	13.94
Zr	0.42	3.12	3.67	2.48	31.76	6.31	10.19	30.99	26.58
Nb	0.10	0.23	0.20	0.12	1.17	0.27	0.17	2.29	1.83
Mo	0.36	0.48	0.43	0.37	0.39	0.33	0.12	0.15	0.15
Cd	0.04	0.03	0.03	0.04	0.10	0.06	0.09	0.12	0.08
Sn	0.30	0.08	0.38	0.21	0.81	0.32	0.25	1.19	1.07
Cs	0.03	0.05	0.01	0.10	2.28	0.05	0.14	1.13	0.50
Ba	3.97	9.45	14.3	9.98	328	8.05	41.2	359	231
Hf	/	/	/	/	0.97	0.06	0.26	1.31	1.01
Ta	/	0.03	/	/	0.26	0.05	/	0.09	0.23
W	0.05	0.12	0.55	0.26	0.06	0.06	0.01	0.01	0.00
Tl	0.00	0.01	0.00	0.01	0.14	0.00	0.01	0.07	0.05
Pb	2.38	1.53	1.50	0.89	2.07	0.37	1.90	2.10	1.59
Th	/	/	/	/	0.06	0.02	0.01	/	0.08
U	0.22	0.02	0.03	0.03	0.12	0.02	0.04	0.05	0.04

注: LOI-烧失量; '/'-未测出

~ +1.60 之间,平均为 -0.30。锆石 Hf 同位素单阶段模式年龄(t_{DM1})介于 952 ~ 810Ma 之间,二阶段模式年龄(t_{DM2})介于 1377 ~ 1147Ma 之间,平均 1268Ma。

3.3 岩石地球化学

高寺台超基性岩杂岩体的全岩成分以低 SiO₂ (34.09% ~ 51.79%),高 MgO (12.55% ~ 53.09%) 和高 Mg[#] (54.2 ~ 95.6) 为特征,并从纯橄岩、辉橄岩到辉石岩、角闪石岩呈现系统连续的变化,Al₂O₃、TiO₂ 和 K₂O 逐渐升高,MgO 和 Mg[#] 含量逐渐降低。其中纯橄岩 Al₂O₃ 为 0.01% ~ 0.74%,TiO₂ 为 0.01% ~ 0.06%,K₂O 为 0.01% ~ 0.02%,MgO 为 39.42% ~ 53.09%,Mg[#] 为 87.1 ~ 95.6;辉橄岩 Al₂O₃ 为 0.08% ~ 0.62%,TiO₂ 为 0.02% ~ 0.09%,K₂O 为 0.01% ~ 0.04%,MgO 为 34.94% ~ 42.69%,Mg[#] 为 83.3 ~ 92.5;辉石岩 Al₂O₃ 为 1.45% ~ 7.97%,TiO₂ 为 0.15% ~ 1.86%,K₂O 为 0.02% ~ 2.29%,MgO 为 12.55% ~ 30.36%,Mg[#] 为 54.2 ~ 90.6;角闪石岩 Al₂O₃ 为 11.05% ~ 13.01%,TiO₂ 为 1.48% ~ 2.04%,K₂O 为 0.97% ~ 3.40%,MgO 为 64.62% ~ 74.95%,Mg[#] 为 64.6 ~ 77.2 (原始数据见表 3、Chen *et al.*, 2009 和 Zhang *et al.*, 2009)。

高寺台超基性岩杂岩体纯橄岩、辉橄岩、辉石岩、角闪石岩球粒陨石标准化曲线见图 5,其中纯橄岩 Σ REE 为 0.10×10^{-6} ~ 5.23×10^{-6} , (La/Yb)_N 为 1.03 ~ 13.70, (La/Sm)_N 为 1.52 ~ 4.34, (Gd/Yb)_N 为 0.32 ~ 1.92, δ Eu 为 0.76 ~ 3.53, δ Ce 为 0.87 ~ 1.11;辉橄岩 Σ REE 为 2.12×10^{-6} ~ 4.69×10^{-6} , (La/Yb)_N 为 1.56 ~ 9.63, (La/Sm)_N 为 0.76 ~ 1.81, (Gd/Yb)_N 为 1.37 ~ 3.96, δ Eu 为 0.66 ~ 1.18, δ Ce 为 0.92 ~ 1.03;辉石岩 Σ REE 为 12.98×10^{-6} ~ 63.75×10^{-6} , (La/Yb)_N 为 1.96 ~ 3.46, (La/Sm)_N 为 0.48 ~ 1.26, (Gd/Yb)_N 为 2.05 ~ 3.43, δ Eu 为 0.54 ~ 1.13, δ Ce 为 0.98 ~ 1.09;角闪石岩 Σ REE 为 50.38×10^{-6} ~ 84.32×10^{-6} , (La/Yb)_N 为 2.58 ~ 3.61, (La/Sm)_N 为 0.61 ~ 0.85, (Gd/Yb)_N 为 2.74 ~ 3.12, δ Eu 为 0.88 ~ 1.01, δ Ce 为 0.98 ~ 1.06。从纯橄岩、辉橄岩、辉石岩到角闪石岩,随着岩石基性程度的减弱, Σ REE 逐渐增加(图 5), (La/Yb)_N 变化范围不大,为较低的正值,轻稀土相对重稀土富集, (Gd/Yb)_N 变化范围不大,仅部分纯橄岩样品重稀土配分曲线左倾,其余均为比较缓的右倾,说明重稀土元素分异作用不强; (La/Sm)_N 逐渐减小,轻稀土配分曲线由右倾变为左倾,与岩浆演化过程中辉石和角闪石的不断晶出相符(图 5); δ Eu 没有异常或具有较弱的异常,说明岩浆演化过程中没有斜长石的晶出, δ Ce 基本上没有异常。

在岩浆演化过程中,不相容元素 Sr、Y 与 Mg[#] 呈负相关,相容元素 Ni、Cr 与 Mg[#] 呈负相关,说明其受结晶分异作用控制。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 6),纯橄岩、辉橄岩、辉石岩和角闪石岩配分曲线形态相似, LILEs (大离子亲石元素)中 Ba、K 相对富集,具正异常,纯橄岩、辉橄岩和辉石岩 LILEs 含量低于或接近于原始地幔值,角闪石岩

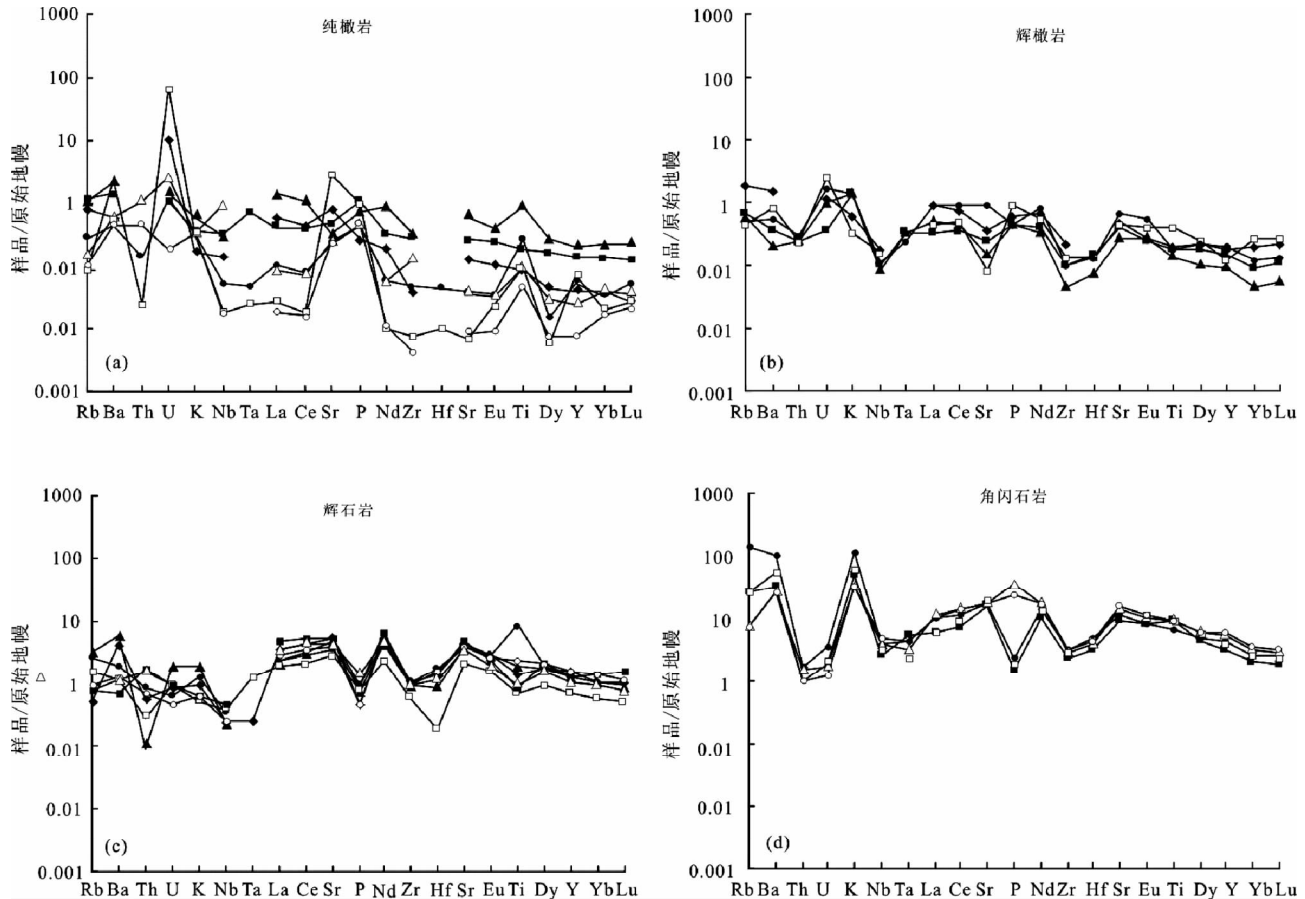


图6 高寺台超基性岩杂岩体微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Primitive mantle-normalized spidergrams for the Gaositai ultramafic complex (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

LILEs 含量明显高于原始地幔值;所有岩石类型的 HFSEs(高场强元素)含量均接近于原始地幔值,配分曲线上具有明显的 Nb、Zr 负异常。

4 讨论

4.1 岩体成因

高寺台超基性岩杂岩体具有环状分带的特征,纯橄岩、辉橄岩、辉石岩和角闪石岩之间呈渐变过渡关系,而且它们稀土元素球粒陨石标准化配分曲线和微量元素原始地幔标准化配分曲线形态相似,说明各岩相带之间为同源岩浆演化的产物。从岩体中心向外,由纯橄岩、辉橄岩到辉石岩、角闪石岩,随着基性程度的降低,在主要元素组成上呈现连续的变化特征, Al_2O_3 、 TiO_2 和 K_2O 逐渐升高, MgO 和 $Mg^\#$ 含量逐渐降低;在稀土元素组成上,随着 $Mg^\#$ 减小, ΣREE 逐渐增加, $(La/Sm)_N$ 逐渐减小,与岩浆中透辉石和角闪石的不断结晶相符;在微量元素组成上,随着 $Mg^\#$ 减小,相容元素 Ni、Cr 逐渐减小,而不相容元素 Sr、Y 逐渐增加(图7)。这些特征表明结晶分异作用控制了岩浆演化。

阿拉斯加型岩体用来描述在形态学上大致具有环状分带的特征,岩相从中心至边缘依次为纯橄岩、辉橄岩、辉石岩和角闪石岩,在矿物组成上缺乏斜长石和单斜辉石,在中心纯橄岩中常发育特征的铂族元素矿化、铬铁矿化或铜镍硫化物矿化,在地球化学上相对富集 LILEs、REE 具一定程度的分异且无 Eu 异常这样的一类超基性岩体(Himmelberg and Loney, 1995)。高寺台超基性岩杂岩体在形态学上具有环状分带的特征,在岩石学上由纯橄岩、辉橄岩、辉石岩和角闪石岩组成,在矿物组成上缺乏斜方辉石与斜长石,其中铬尖晶石具有高 Fe 的特征,在地球化学上具有富集 Ba、K 等 LILEs,亏损 Nb、Zr 等 HFSEs,REE 具一定程度的分异,无明显 Eu 异常的特征,在矿化特征上有铬铁矿床产于中心纯橄岩相中。这些特征均与阿拉斯加型侵入体相符,表明高寺台超基性岩杂岩体属于典型的阿拉斯加型侵入体。

4.2 成岩成矿时代

岩体地质和地球化学特征表明,高寺台杂岩体中的不同岩相是同源岩浆同期侵位的环状岩体,铬铁矿体产于岩体中部的粗粒纯橄岩相,为岩浆早期结晶分异作用的产物。

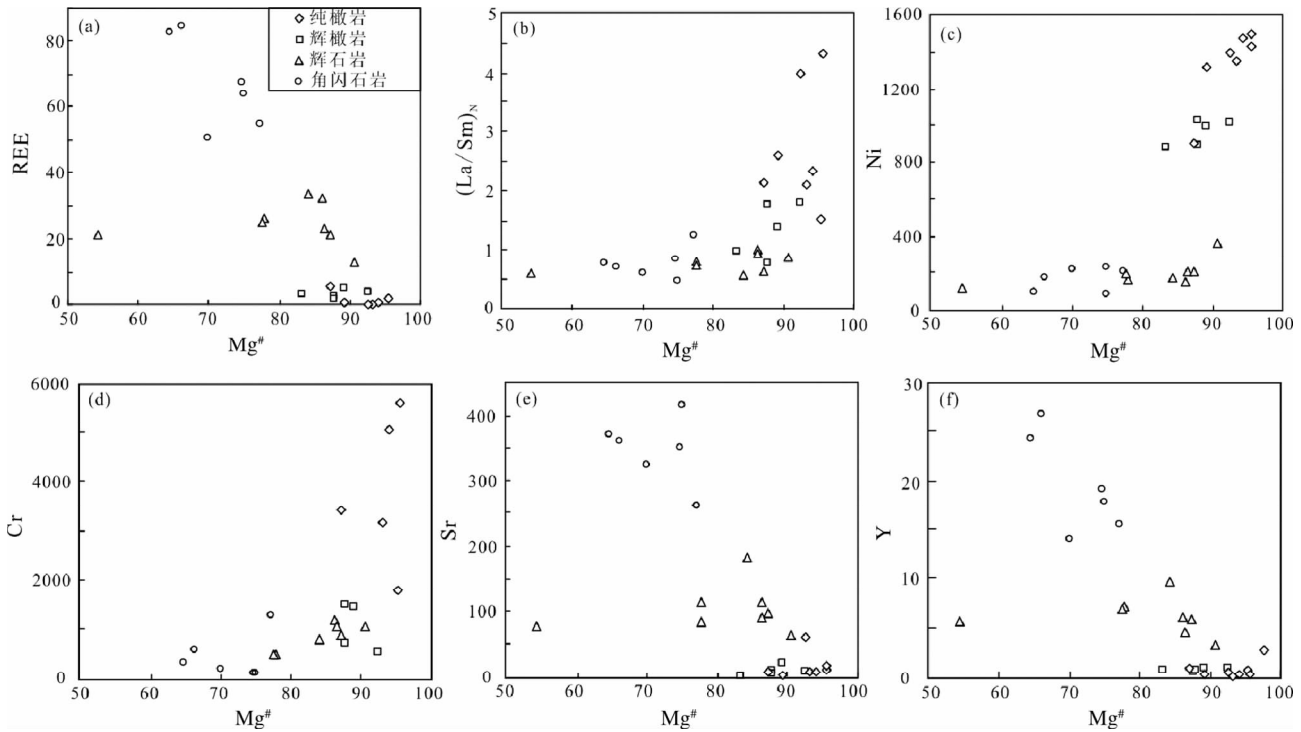


图7 高寺台超基性岩杂岩体中岩石 $Mg^{\#}$ 与 REE、 $(La/Sm)_N$ 、Ni、Cr、Sr 和 Y 关系图

Fig.7 Plots of $Mg^{\#}$ verses REE, $(La/Sm)_N$, Ni, Cr, Sr and Y for the Gaositai ultramafic complex

高寺台含铬超基性岩杂岩体矿石及岩石样品的锆石年龄值介于 2800 ~ 211Ma 之间,集中分布于 213 ~ 211Ma 之间,代表了岩体的侵位时代。前人对高寺台超基性岩杂岩体的定年获得的 244Ma、248Ma、280Ma 和 < 265Ma 的结果在本次测试中也有相似时代的锆石发育。其中辉石岩样品 (GST11-3) 岩浆锆石 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 $213 \pm 1Ma$ ($n = 11$), 代表了辉石岩的侵位年龄,说明高寺台杂岩体侵位于晚三叠世。3 件铬铁矿石最年轻的岩浆锆石的年龄结果为: 网环状铬铁矿石 GST-1 的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄 $212 \pm 3Ma$ ($n = 4$), GST11-1 网环状铬铁矿石 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄 $211 \pm 3Ma$ ($n = 1$), GST11-2 稠密浸染状铬铁矿石 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄 $210 \pm 9Ma$ ($n = 6$), 铬铁矿成矿年龄与辉石岩成岩年龄值非常一致,说明铬铁矿形成于 213Ma, 为晚三叠世,属于早中生代。

4.3 构造背景

华北克拉通北缘冀北地区分布一条规模较大的早中生代基性-超基性-碱性岩带,该岩浆带大致平行于代表二叠纪末-三叠纪初期 (约 250Ma) 古亚洲洋闭合位置的索伦缝合带,显示出碰撞后伸展阶段岩浆作用特征 (牟保磊和阎国翰, 1992; Xiao *et al.*, 2003; 陈斌等, 2008; Chen *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009; 张拴宏等, 2010; 赵越等, 2010)。与本文获得的高寺台超基性岩杂岩体的侵位年龄相似,这些岩体也侵位于晚三叠世,如小张家口超基性岩体 ($220 \pm 5Ma$, 田伟等,

2007)、矾山钾质碱性超基性岩-正长岩杂岩体 ($218 \pm 2Ma$, 任荣等, 2009)、光头山碱性花岗岩体 ($220 \pm 1Ma$, 韩宝福等, 2004), 它们同形成于华北板块和西伯利亚板块碰撞后的伸展阶段。

传统上认为阿拉斯加型岩体的形成与岛弧作用密切相关 (Taylor, 1967; Irving, 1974), 但也有学者认为其也可以形成于造山作用之后的伸展阶段 (Johan, 2002; Tistl *et al.*, 1994; Nixon *et al.*, 1997; Green *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2009), 高寺台阿拉斯加型侵入体应与古亚洲洋闭合后的伸展作用有关。

4.4 岩浆源区

高寺台超基性岩杂岩体辉石岩中锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 介于 -2.0 ~ -1.6 之间, 显示出弱亏损到弱富集的特征 (图 8), 表明其源区中亏损地幔是重要的组成部分, 而弱富集的特征则有富集地幔或下地壳物质的混入两种可能。

高寺台超基性岩杂岩体侵位到由太古代-古元古代的角闪岩相-麻粒岩相的变质岩系组成的结晶基底中, 该结晶基底 $\epsilon_{Hf}(t)$ 大致介于 -40 ~ -30 之间 (Jahn *et al.*, 1999)。但高寺台岩体中锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 介于 1377 ~ 1147Ma 之间, 明显低于结晶基底的年龄, 同时岩体中各岩相 $Mg^{\#}$ 普遍很高, 因此岩浆源区中有下地壳物质可能性非常有限。

与高寺台岩体同属冀北地区早中生代基性-超基性-碱性

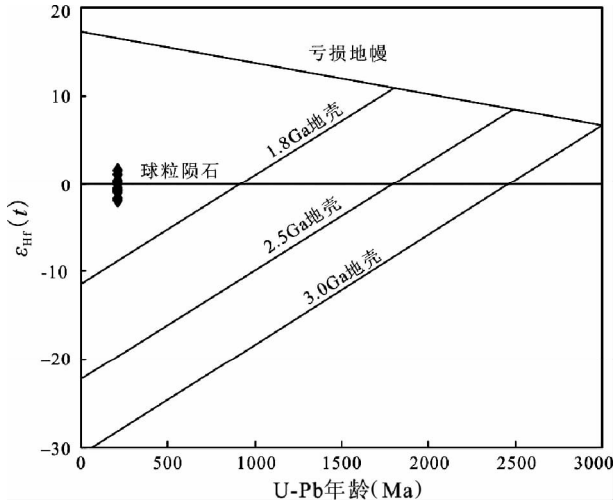


图8 高寺台超基性岩杂岩体中辉石岩锆石 Hf 同位素组成

Fig. 8 Hf isotopic data of zircons from the clinopyroxenite in the Gaositai ultramafic complex

岩带的其他岩体的 Nd-Sr 同位素研究表明, 这些岩体主要来源于富集的岩石圈地幔的部分熔融, 如小张家口超基性岩体 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -4.4, I_{\text{Sr}} = 0.70587$, 陈斌等, 2008)、矾山钾质碱性超基性岩-正长岩杂岩体 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.3, I_{\text{Sr}} = 0.70554$, 牟保磊等, 2001)、光头山碱性花岗岩体 ($\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.9$, 韩宝福等, 2004)。以上研究表明, 该岩带岩浆源区中富集地幔是非常重要的组成部分, 因此高寺台岩体中锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 显示弱富集的特征应该表明其源区中有富集地幔物质。

值得注意的是, 该岩带中小张家口超基性岩体的锆石 Hf 同位素组成 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 介于 0.282557 ~ 0.282690 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 -2.90 ~ +1.7 之间, t_{DM1} 介于 982 ~ 828 Ma 之间, t_{DM2} 介于 1440 ~ 1148 Ma 之间 (田伟等, 2007), 与本文获得的高寺台超基性岩体锆石 Hf 同位素组成几乎完全一致, 它们的岩浆源区组成均为亏损地幔物质和富集地幔物质的混合, 说明由于古亚洲洋闭合后的强烈伸展作用, 在晚三叠世期间有亏损的软流圈地幔物质上涌。该期岩浆活动可能代表了华北克拉通北缘岩石圈减薄的开始 (张拴宏等, 2010)。

虽然高寺台超基性岩体和小张家口超基性岩体的 Hf 同位素组成几乎完全一致, 但高寺台岩体 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 -17.3 ~ -7.9 之间 (根据 Chen *et al.*, 2009 和 Zhang *et al.*, 2009 按 $t = 213\text{Ma}$ 重新计算), 明显低于小张家口超基性岩体 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 介于 -10 ~ -2 之间 (陈斌等, 2008), 表明在高寺台超基性岩体岩浆上升过程中可能有大陆地壳物质的加入, 这与本次测年过程中发现的大量不同时代的继承锆石及前人 Re-Os 同位素的研究认识 (Chen *et al.*, 2009; Tian *et al.*, 2011) 相符。

4.5 继承锆石年龄的地质意义

同一岩体中存在的不同年龄组的继承锆石不仅可以作

为示踪岩浆源区物质性质的指示剂, 同时也可作为探索岩浆形成与演化过程的标志之一 (Keay *et al.*, 1999)。结合前人对高寺台岩体锆石年龄测试成果 (Chen *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009), 总结高寺台杂岩体继承锆石年龄值介于 2800 ~ 244 Ma 之间, 分布范围宽, 但相对集中, 主要有 2.6 ~ 2.5 Ga、400 ~ 360 Ma、300 ~ 280 Ma、244 Ma 共 4 个年龄段。

2.6 ~ 2.5 Ga: 该年龄段的锆石在 4 件年龄样品中均有发育, 锆石磨圆程度较高, 环带构造不发育, Th、U 含量普遍较低, Th/U 为 0.35 ~ 1.75 之间, 锆石年龄值高寺台岩体侵入围岩-新太古代单塔子群相符。冀北是华北克拉通北缘中段早前寒武纪变质基底的主要出露地区之一, 结晶基底由太古代-古元古代的角闪岩相到麻粒岩相的变质岩系组成 (Jahn *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 2005, 刘树文等, 2011)。近年来, 大量测年结果表明, 单塔子群形成于 2.5 Ga 左右 (刘树文等, 2007, 2011; 孙会一等, 2010), 与本次获得多颗锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 2.6 ~ 2.5 Ga 相符。本次年龄测试样品中 2.6 ~ 2.5 Ga 的继承锆石可能来源于受地壳混染的富集地幔源区, 也可能为岩浆上升过程中捕获。

400 ~ 360 Ma: 在华北克拉通北缘冀北地区沿东西向红石砬-大庙断裂带分布有多个基性-超基性岩杂岩体, 主要形成于中泥盆世, 如铁马哈叭沁辉石岩-角闪石岩杂岩体 (倪志耀等, 2004; Zhang *et al.*, 2009; 李立兴等, 2012) 和红石砬辉石岩-角闪石岩杂岩体 (Zhang *et al.*, 2009), 这些岩体与志留纪末期白乃庙岛弧带弧陆碰撞后的伸展作用有关。本次测试中采于高寺台岩体西端的辉石岩中并未获得该年龄段的继承锆石, 但在 Zhang *et al.* (2009) 对高寺台岩体东端辉石岩测年中有较多的记录, 且多落在谐和线上, 等时线年龄为 $390 \pm 8\text{Ma}$, 应为岩浆在上升过程中不均匀捕获的结果。

300 ~ 280 Ma: 2 件网环状铬铁矿矿石 GST-1 和 GST11-1 中有 3 颗锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 280 Ma、286 Ma 和 293 Ma, 记录了区域上一次早二叠世基性岩浆活动。这期岩浆活动在本区较弱, 已有的报道为红石砬-大庙断裂带西段波罗诺基性-超基性岩体 (角闪辉长岩, $297 \pm 1\text{Ma}$, Zhang *et al.*, 2009) 和在红石砬-大庙断裂带东段, 高寺台岩体角闪石岩相带边缘的辉长岩脉 ($280 \pm 3\text{Ma}$, Chen *et al.*, 2009)。这期岩浆活动与区内同时代更为发育的闪长岩和花岗岩一样, 与古亚洲洋向华北地块的俯冲作用有关 (赵越等, 2010; 张拴宏等, 2010)。

244 Ma: 在华北克拉通北缘冀北地区, 大量发育着晚二叠世-中三叠世的花岗岩 (毛德宝等, 2003; 王惠初等, 2007; Zhang *et al.*, 2009) 和火山岩 (张拴宏等, 2010)。本次测试中浸染状铬铁矿样品中 244 Ma 的锆石呈自形柱状, 阴极发光图像上环带细密清楚, Th/U 介于 0.56 ~ 1.85 之间, 显示酸性岩浆锆石的特征, 且与区内同时代岩浆岩中的锆石相似。因此, 本次年龄测试样品中多颗 244 Ma 的继承锆石记录了区内晚二叠世-中三叠世酸性岩浆活动, 这些锆石是在岩浆上升过程中浅部地壳位置捕获的。这期酸性岩浆活动与古亚

洲洋闭合后的伸展作用有关(赵越等,2010;张拴宏等,2010)。

5 结论

(1)高寺台超基性岩杂岩体具有环状分带的特征,地质地球化学特征表明纯橄岩、辉橄岩、辉石岩和角闪石岩不同岩相之间为同源岩浆演化的产物,铬铁矿形成于岩浆演化早期阶段。

(2)高寺台含铬超基性岩杂岩体的成岩成矿时代为 213 ± 1 Ma,为晚三叠世,属于早中生代,形成于华北板块和西伯利亚板块碰撞后的伸展阶段。

(3)高寺台岩浆源区组成为亏损地幔物质和富集地幔物质的混合,在岩浆上升过程中有大陆地壳物质的混染,其侵位时代晚三叠世可能代表了华北克拉通北缘岩石圈减薄的开始。

(4)高寺台杂岩体年龄测试样品中继承锆石的年龄值介于 2800 ~ 244Ma 之间,集中分布于 2.6 ~ 2.5Ga、400 ~ 360Ma、300 ~ 280Ma、244Ma 共 4 个年龄段,记录了区域内在新太古代、中泥盆世、早二叠世、晚二叠世-中三叠世存在的岩浆活动。

致谢 感谢北京大学黄宝玲、杨斌在岩石地球化学分析方面的帮助;感谢中国地质科学院矿产资源研究所侯可军、郭春丽在锆石测试分析中的帮助和指导。张拴宏、万渝生、聂凤军研究员在论文写作过程中给予了大量帮助及建议,在此表示由衷感谢。

References

Bao PS, Wang XB, Peng GY and Chen FY. 1999. Chromite Deposits in China. Beijing: Science Press, 1 - 350 (in Chinese)

Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1 - 2): 243 - 258

Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Herderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. New York; Elsevier Science Publishers, 63 - 114

Bureau of Geology and Mineral Resources of Hebei Province (HBGMR). 1989. *Regional Geology of Hebei Province*, Beijing Municipality and Tianjin Municipality. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 741 (in Chinese)

Chen B, Tian W and Liu AK. 2008. Petrogenesis of the Xiaozhangjiakou mafic-ultramafic complex, north Hebei: Constraints from petrological, geochemical and Nd-Sr isotopic data. *Geological Journal of China Universities*, 14(3): 295 - 303 (in Chinese with English abstract)

Chen B, Suzuki K, Tian W, Jahn BM and Ireland TR. 2009. Geochemistry and Os-Nd-Sr isotopes of the Gaositai Alaskan-type ultramafic complex from the northern North China craton: Implications for mantle-crust interaction. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(5): 683 - 702

Elhoul S, Belousova E, Griffin WL, Pearson NJ and O'Reilly SY. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 (Suppl.): A158

Green DH, Schmidt MW and Hibberson WO. 2004. Island-arc ankaramites; Primitive melts from fluxed refractory lherzolitic mantle. *Journal of Petrology*, 45(2): 391 - 403

Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Acherbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle; LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133 - 147

Han BF, Kagami H and Li HM. 2004. Age and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Guangtoushan alkaline granite, Hebei Province, China; Implications for Early Mesozoic crust-mantle interaction in North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1375 - 1388 (in Chinese with English abstract)

Himmelberg GR and Loney RA. 1995. Characteristics and petrogenesis of Alaskan-type ultramafic-mafic intrusions, southern Alaska. *US Geological Survey Professional Paper*, 1564: 1 - 47

Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595 - 2604 (in Chinese with English abstract)

Hou KJ, Li YH and Tian YR. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481 - 492 (in Chinese with English abstract)

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (IMR, CAS). 1973. *Special of Geology and Mineral Resources (1st Series)*. Beijing: Geological Publishing House, 87 - 114 (in Chinese)

Irving TN. 1974. Petrology of the Duke Island ultramafic complex, southeastern Alaska. Boulder, Colo.: Geological Society of America, 138: 240

Jahn BM, Auvray B, Cornichet J, Bai YL, Shen QH and Liu DY. 1987. 3.5Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China; Field occurrence, petrology, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precambrian Research*, 34(3 - 4): 311 - 346

Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust; Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157(1 - 2): 119 - 146

Johan Z. 2006. Platinum-group minerals from placers related to the Nizhni Tagil (Middle Urals, Russia) Uralian-Alaskan-type ultramafic complex; Ore-mineralogy and study of silicate inclusions in (Pt, Fe) alloys. *Mineralogy and Petrology*, 87(1 - 2): 1 - 30

Keay S, Steele D and Compston W. 1999. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: An application to the Lachlan foldbelt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 137(4): 323 - 341

Li HM, Wang RJ, Xiao KY, Zhang XH, Liu YL and Sun L. 2009. Characteristics and current utilization status of ultra-low-grade magnetite resource, and suggestion on its exploration and development. *Geological Bulletin of China*, 28(1): 85 - 90 (in Chinese with English abstract)

Li LX, Li HM, Wang DZ, Liu MJ, Yang XQ and Chen J. 2012. Ore genesis and ore-forming age of the Tiemahabaqin ultra-low-grade iron deposit in Chengde, Hebei Province, China. *Rock and Mineral Analysis*, 31(5): 898 - 905 (in Chinese with English abstract)

Liu DY, Nutman AP, Compston W, Wu JS and Shen QH. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean craton. *Geology*, 20(4): 339 - 342

Liu SW, Lü YJ, Feng YG, Zhang C, Tian W, Yan QR and Liu XM. 2007. Geology and zircon U-Pb isotopic chronology of Dantazi

- complex, northern Hebei Province. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 484–497 (in Chinese with English abstract)
- Liu SW, Lü YJ, Wang W, Yang PT, Bai X and Feng YG. 2011. Petrogenesis of the Neoproterozoic granitoid gneisses in northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 909–921 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Chronology Center. Special Publication, 4: 1–71
- Ma X, Chen B and Niu XL. 2009. Genesis of the Late Paleozoic Dongwanzi pluton, eastern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1975–1988 (in Chinese with English abstract)
- Mao DB, Chen ZH, Zhong CT, Zuo YC, Shi S and Hu XD. 2003. Studies on the geochronology and geochemical characteristics of Mesozoic intrusions in Beichagoumen area, northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 661–674 (in Chinese with English abstract)
- Mu BL and Yan GH. 1992. Geological features of Triassic alkaline and subalkaline igneous complexes in the Yan-Liao area. *Acta Geologica Sinica*, 66(2): 108–121
- Mu BL, Shao J, Chu ZY, Yan GH and Qiao GS. 2001. Sm-Nd age and Sr, Nd isotopic characteristics of the Fanshan potassic alkaline ultramafite-syenite complex in Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 358–365 (in Chinese with English abstract)
- Ni ZY, Zhai MG, Wang RM, Tong Y, Shu GM and Han XL. 2004. Discovery of Late Paleozoic retrograded eclogites from the middle part of the northern margin of North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 600–606
- Nixon GT, Cabri LJ and Laflamme JHG. 1990. Platinum-group element mineralization in lode and placer deposits associated with the Tulameen Alaskan-type complex, British Columbia. *The Canadian Mineralogist*, 28: 503–535
- Ren R, Mu BL, Han BF, Zhang L, Chen JF, Xu Z and Song B. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Fanshan potassic alkaline ultramafite-syenite complex in Hebei Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 588–594 (in Chinese with English abstract)
- Soderlund U, Patchett PJ, Verrot JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusion. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311–324
- Sun HY, Dong CY, Xie HQ, Wang W, Ma MZ, Liu DY, Nutman AP and Wan YS. 2010. The formation age of the Neoproterozoic Zhuzhangzi and Dantanzi Groups in the Qinglong area, eastern Hebei Province: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating. *Geological Review*, 56(6): 888–898 (in Chinese with English abstract)
- 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*. The Geological Society of London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Taylor HP. 1967. The zoned ultramafic complex of southeastern Alaska. Part 4. III. In: Wyllie PJ (ed.). *Ultramafic and Related Rocks*. New York: Wiley, 96–118
- Thayer TP. 1964. Principal features and origin of podiform chromite deposits, and some observations on the Guelman-Soridag district, Turkey. *Economic Geology*, 59(8): 1497–1524
- Tian W, Chen B, Liu CQ and Zhang HF. 2007. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiaozhangzi ultramafic pluton in northern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 583–590 (in Chinese with English abstract)
- Tian W, Chen B, Ireland TR, Green DH, Suzuki K and Chu Z. 2011. Petrology and geochemistry of dunites, chromitites and mineral inclusions from the Gaositai Alaskan-type complex, North China Craton: Implications for mantle source characteristics. *Lithos*, 127(1–2): 165–175
- Tisl M, Burgath KP, Höhndorf A, Kreuzer H, Muñoz R and Salinas R. 1994. Origin and emplacement of Tertiary ultramafic complexes in northwest Colombia: Evidence from geochemistry and K-Ar, Sm-Nd and Rb-Sr isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 126(1–3): 41–59
- Wang HC, Zhao FQ, Li HM, Sun LX, Miao LC and Ji SP. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: The geological records of late Paleozoic magmatic arc. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 597–604 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1609
- Yang JS, Ba DZ, Xu XZ and Li ZL. 2010. A restudy of podiform chromite deposits and their ore-prospecting vista in China. *Geology in China*, 37(4): 1141–1150 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Liu XC, Liu DY, Chen FK, Xie LW and Chen HH. 2009. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic-ultramafic complexes from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle. *Lithos*, 110(1–4): 229–246
- Zhang SH, Zhao Y, Liu JM, Hu JM, Song B, Liu J and Wu H. 2010. Geochronology, Geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review. *Acta petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824–842 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC, Sun M, Wilde SA and Li SZ. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202
- Zhao GC, Wilde SA, Li SZ, Sun M, Grant ML and Li XP. 2007. U-Pb zircon age constraints on the Dongwanzi ultramafic-mafic body, North China, confirm it is not an Archean ophiolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1–2): 85–93
- Zhao Y, Chen B, Zhang SH, Liu JM, Hu JM, Liu J and Pei JL. 2010. Pre-Yanshanian geological events in the northern margin of the North China Craton and its adjacent areas. *Geology in China*, 37(4): 900–915 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF and Bai WJ. 1992. Chromite deposits in China and their origin. *Mineralium Deposita*, 27(3): 192–199

附中文参考文献

- 鲍佩声, 王希斌, 彭根永, 陈方远. 1999. 中国铬铁矿床. 北京: 科学出版社, 1–350
- 陈斌, 田伟, 刘安坤. 2008. 冀北小张家口基性-超基性杂岩的成因: 岩石学、地球化学和 Nd-Sr 同位素证据. *高校地质学报*, 14(3): 295–303
- 韩宝福, 加加美宽雄, 李惠民. 2004. 河北平泉光头山碱性花岗岩的时代, Nd-Sr 同位素特征及其对华北早中生代壳幔相互作用的意义. *岩石学报*, 20(6): 1375–1388
- 河北省地质矿产局. 1989. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–741
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595–2604
- 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. *矿床地质*, 28(4): 481–492

- 李厚民,王瑞江,肖克炎,张晓华,刘亚玲,孙莉. 2009. 中国超贫磁铁矿资源的特征、利用现状及勘查开发建议——以河北和辽宁的超贫磁铁矿资源为例. 地质通报, 28(1): 85-90
- 李立兴,李厚民,王德忠,刘明军,杨秀清,陈靖. 2012. 河北承德铁马哈叭沁超贫铁矿床的成因与成矿时代. 岩矿测试, 31(5): 898-905
- 刘树文,吕勇军,凤永刚,张臣,田伟,闫全人,柳小明. 2007. 冀北单塔子杂岩的地质学和锆石 U-Pb 年代学. 高校地质学报, 13(3): 484-497
- 刘树文,吕勇军,王伟,杨朋涛,白翔,凤永刚. 2011. 冀北太古代花岗质片麻岩的成因. 岩石学报, 27(4): 909-921
- 马旭,陈斌,牛晓露. 2009. 冀东晚古生代东湾子岩体的岩石成因研究. 岩石学报, 25(8): 1975-1988
- 毛德宝,陈志宏,钟长汀,左义成,石森,胡小蝶. 2003. 冀北北岔沟门地区中生代侵入岩地质年代学和地球化学特征研究. 岩石学报, 19(4): 661-674
- 牟保磊,阎国翰. 1992. 燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义. 地质学报, 66(2): 108-121
- 牟保磊,邵济安,储著银,阎国翰,乔广生. 2001. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩-正长岩杂岩体 Sm-Nd 年龄和 Sr, Nd 同位素特征. 岩石学报, 17(3): 358-365
- 倪志耀,翟明国,王仁民,童英,舒桂明,韩秀玲. 2004. 华北古陆块北缘中段发现晚古生代退变榴辉岩. 科学通报. 49(6): 585-591
- 任荣,牟保磊,韩宝福,张磊,陈家富,徐钊,宋彪. 2009. 河北矾山钾质碱性超镁铁岩-正长岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 岩石学报, 25(3): 588-594
- 孙会一,董春燕,颜强强,王伟,马铭株,刘敦一, Nutman A, 万渝生. 2010. 冀东青龙地区新太古代朱杖子群和单塔子群形成时代: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质论评, 56(6): 888-898
- 田伟,陈斌,刘超群,张华峰. 2007. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 23(3): 583-590
- 王惠初,赵凤清,李惠民,孙立新,苗来成,冀世平. 2007. 冀北閃长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录. 岩石学报, 23(3): 597-604
- 杨经绥,巴登珠,徐向珍,李兆丽. 2010. 中国铬铁矿床的再研究及找矿前景. 中国地质, 37(4): 1141-1150
- 张拴宏,赵越,刘建民,胡健民,宋彪,刘健,吴海. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. 岩石矿物杂志, 29(6): 824-842
- 赵越,陈斌,张拴宏,刘建民,胡健民,刘健,裴军令. 2010. 华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地质事件. 中国地质. 2010, 37(4): 900-915
- 中国地质科学院地质矿产所. 1973. 铬镍钴铂地质矿产专辑(第一集). 北京:地质出版社, 87-114