

五台山地区 1.76 Ga 辉石闪长岩的成因及其地质意义

周丽芹^{1,2,3}, 肖渊甫¹, 刘敦一^{2,3}, 王伟⁴, 杜利林³, 杨崇辉³, 任留东³

(1. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2. 北京离子探针中心, 北京 100037; 3. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 4. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要: 五台山地区的黄金山辉石闪长岩侵入早元古代溇沱群中, 同时又被早元古代末期辉绿岩脉穿切。辉石闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果为 1755 ± 12 Ma, 与华北克拉通广泛分布的基性岩墙群的时代相近。辉石闪长岩高 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 K_2O 和 Na_2O , 低 MgO ($\text{Mg}^\#$ 值为 36~39)。稀土元素总量较高 ($365.75 \times 10^{-6} \sim 411.97 \times 10^{-6}$), 轻重稀土元素分异强烈, 其中轻稀土元素分异较明显, 重稀土元素分异较弱, 具有微弱的负铕异常。微量元素中, 富集 Rb、Ba、Sr、Zr 和 Hf, Cr、Ni 含量低。($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) 和 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) 变化范围小, $\epsilon\text{Nd}(t=1.76\text{ Ga})$ 值为 $-6.08 \sim -4.81$ 。综合分析认为, 黄金山辉石闪长岩为富集岩石圈地幔部分熔融后发生分离结晶形成的, 与华北克拉通广泛分布的基性岩墙群具有相同的源区, 可能代表华北南缘地幔柱活动时同一岩浆旋回不同阶段的岩浆侵位记录。辉石闪长岩中锆石具有岩浆成因锆石特征, 但锆石的 Th/U 比值普遍较低, 与变质锆石类似。辉石闪长岩中 Th/U 比值高, 同时 Th、U 在斜长石、单斜辉石和角闪石中配分系数低。因此推测, 低 Th/U 比值锆石的形成与原始岩浆和主要成岩矿物结晶无关, 很可能与富含 Th 的副矿物结晶有关。辉石闪长岩中低 Th/U 比值岩浆锆石的出现表明, 利用 Th/U 比值解释锆石成因和年龄结果意义时应慎重。

关键词: 五台山地区, 辉石闪长岩, SHRIMP U-Pb 定年, 岩石圈地幔, Th/U 比值

中图分类号: P588.12⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)05-0819-10

Petrogenesis of 1.76 Ga pyroxene diorite in Wutai Mountains area of North China Craton and its geological significance

ZHOU Li-qin^{1,2,3}, XIAO Yuan-fu¹, LIU Dun-yi^{2,3}, WANG Wei⁴, DU Li-lin³, YANG Chong-hui³
and REN Liu-dong³

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China; 3. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 4. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract: The Huangjinshan pyroxene diorite intruded Paleoproterozoic Hutuo Group, and was cut and penetrated by late Paleoproterozoic dolerite in Wutai Mountains area. SHRIMP zircon dating of pyroxene diorite yielded a $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age of 1755 ± 12 Ma, which is similar to ages of the widely distributed Paleoproterozoic mafic dyke swarms in the North China Craton. The pyroxene diorite sample contains high TiO_2 , Fe_2O_3 , P_2O_5 , K_2O and Na_2O , and low MgO ($\text{Mg}^\#$, 36~39). The sample has high concentration of REE ($365.75 \times 10^{-6} \sim 411.97 \times 10^{-6}$), with strong LREE fractionation and slight fractionation of HREE, and slightly negative Eu anomaly. The rock samples are enriched in Rb, Ba, Sr, Zr and Hf, and are depleted in Cr and Ni. The variation of ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i and ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i ratios is small, and $\epsilon\text{Nd}(t=1.76\text{ Ga})$ values vary from -6.08 to

收稿日期: 2011-03-20; 修订日期: 2011-08-01

基金项目: 中国地质科学院地质研究所基本科研业务费资助项目(J0721, J0907); 中国地质调查局地质调查资助项目(1212010611802, 1212010711815); 全国地层委员会资助项目(1212010511702-01)

作者简介: 周丽芹(1982-), 女, 硕士研究生, 第四纪地质学专业, E-mail: zhouliaqin@bjshrmp.cn.

-4.81. Based on a comprehensive analysis of all evidence, the authors hold that Huangjinshan pyroxene diorite was partially melted from enriched upper lithosphere mantle related to the mantle plume and was fractionally crystallized with the same magmatic source of mafic dyke swarms widely distributed in North China Craton, thus representing a different stage of the same magmatic cycle. Zircons in pyroxene diorite samples show the same characteristics as basic-intermediate rocks, but their Th/U ratios are very low, similar to features of the metamorphic zircon. Generally speaking, Th/U ratios are high in pyroxene diorite whereas the partition coefficients of Th and U are very low in plagioclase, clinopyroxene and hornblende. It is thus inferred that the Th/U ratios in zircon are independent of the source magma and major diagenetic minerals, and are probably related to crystallization of Th-rich accessory minerals. The zircons with very low Th/U ratios in pyroxene diorite indicate that we should be very careful in explanation of the genesis of zircon by Th/U ratios.

Key words: Wutai Mountains area; pyroxene diorite; SHRIMP U-Pb dating; lithosphere mantle; Th/U ratio

华北克拉通~1.8 Ga 镁铁质岩墙群是我国规模最大的岩墙群之一,对于理解华北克拉通早期地质演化具有重要意义(彭澎等,2004)。近年来,该期岩墙群研究已积累了一些新的同位素年代学资料。李江海等(2001)利用单颗粒锆石化学法获得恒山地区辉绿岩墙的锆石 U-Pb 年龄为 $1\ 769 \pm 3$ Ma。廖超林等(2003)获得赞皇地区辉绿岩墙 Ar-Ar 年龄为 $1\ 765 \sim 1\ 781$ Ma。Wang 等(2007)获得鲁西蒙阴地区辉绿岩脉锆石 U-Pb 年龄为 $1\ 841 \pm 17$ Ma。Hou 等(2006a)在鲁西泰山红门辉绿岩墙中获得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 $1\ 837 \pm 18$ Ma,而陆松年等(2008)在该岩墙中获得斜锆石 U-Pb 年龄 $1\ 621 \pm 9$ Ma。彭澎等(2004)、Peng 等(2005,2007,2008)、Peng(2010)对华北克拉通 1.8 Ga 岩墙群系统研究后认为,其时代为 1.80~1.75 Ga,与华北南缘熊耳群火山岩的时代相当。部分学者认为这些基性岩墙群形成于大陆裂谷有关的伸展环境(Hou *et al.*,2006a),可能与超大陆的裂解有关(翟明国等,2000;Lu *et al.*,2002;Zhai and Liu,2003;Peng *et al.*,2005,2007,2008;Hou *et al.*,2006b,2008a,2008b;Peng,2010),而其他学者认为其属华北东西两个陆块碰撞后伸展环境(Wang *et al.*,2004,2008)。

华北克拉通中部的五台地区发育有许多早元古代末期(~1.8 Ga)基性岩墙。除此之外,在早元古代溱沱群地层中还出露有早元古代辉石闪长岩,侵入于溱沱群下部变形较强的四集庄组变质砂岩中,又被早元古代末期辉绿岩脉穿切,推测其形成时代为早元古代晚期。本文对该辉石闪长岩进行了详细的岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究,并与早元古代辉绿岩进行对比,探讨其成因和地质意义。

1 地质背景

研究区位于华北克拉通中部的五台山地区。区域内主要出露的前寒武纪地质单元有新太古代五台群、新太古代兰芝山花岗岩、早元古代溱沱群、早元古代花岗岩-花岗斑岩、中元古界地层(图1)。黄金山辉石闪长岩呈一小岩株出露于五台县阳白乡下红表村西约 2 km 的黄金山东南坡,平面上呈向南东突出的马鞍形,北东长 1 800 m,北西宽 800 m,总面积约 1.44 km²(伍家善等,2008)。辉石闪长岩侵入于溱沱群四集庄组顶部变质含砾长石石英杂砂岩中,而又被北西向的早元古代辉绿岩脉穿切(图2)。辉石闪长岩野外露头为浅灰绿色,块状构造、细粒结构。

2 岩相学特征

辉石闪长岩显微镜下主要组成矿物为斜长石、角闪石和单斜辉石,另外含少量的石英和黑云母,副矿物为磁铁矿和磷灰石。斜长石含量 50%~70%,粒度 1~2 mm,呈自形板状杂乱分布,聚片双晶发育,部分绢云母化强烈。角闪石含量 10%~20%,他形-半自形柱状,常出现于单斜辉石颗粒周围,部分呈辉石的反应边,单偏光下具有绿-黄绿多色性。单斜辉石含量 10%~20%,粒度多小于 1 mm,粒状-半自形柱状,个别发育双晶,角闪石反应边常见。石英含量 2%~5%,呈他形粒状或蠕虫状充填在斜长石颗粒之间。黑云母含量 2%左右,他形-半自形片状,单偏光下具棕褐色-褐色多色性。磁铁矿含量 2%~5%,呈他形、针柱状,磷灰石呈针柱状。

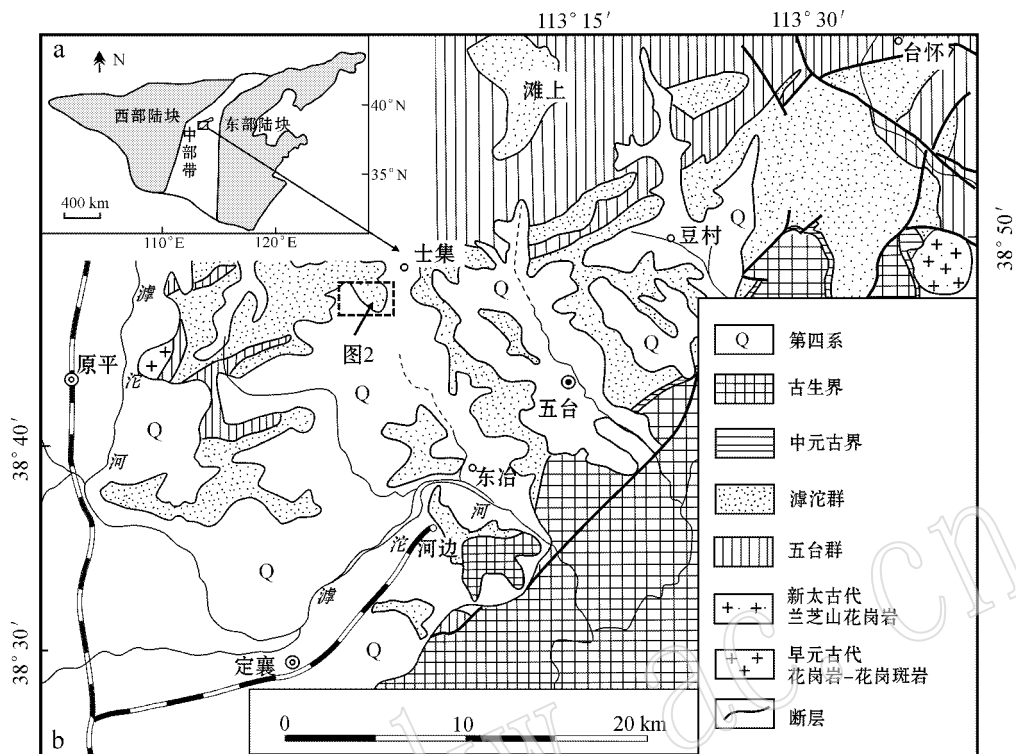


图 1 五台地区地质简图 [a 据 Zhao 等 (1999a) 简化 b 据伍家善等 (2008)]

Fig. 1 Geological sketch map of Wutai Mountains area (a simplified after Zhao *et al.*, 1999a, b after Wu Jiashan *et al.*, 2008)

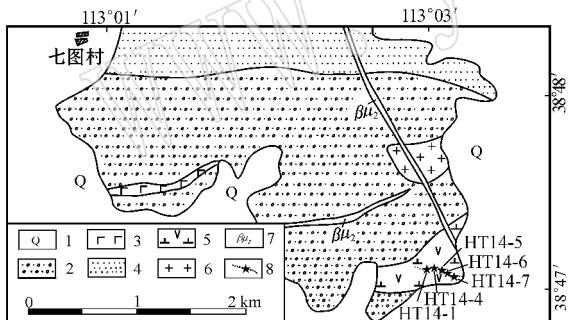


图 2 黄金山辉石闪长岩位置简图 (据杜利林等 2010)

Fig. 2 Position of Huangjinshan pyroxene diorite

(after Du Lilin *et al.*, 2010)

- 1—第四系；2—四集庄组；3—四集庄组变质火山岩；4—南台组；
- 5—辉石闪长岩；6—花岗岩斑岩；7—早元古代辉绿岩；8—采样点
- 1—Quaternary；2—Sijizhuang Formation；3—meta-volcanic rocks in Sijizhuang Formation；4—Nantai Formation；5—pyroxene diorite；
- 6—granite porphyry；7—dolerite；8—sampling location

3 分析方法

全岩主微量元素和 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中主量元素利用 X 射线荧光光谱仪(飞利浦 PW2404)分析,分析误差小于 2%~3%。稀土元素

和微量元素利用 Finnigan MAT 公司制造的高分辨率等离子体质谱(Element I)分析,分析误差小于 5%。Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析利用热电离质谱(Isoprobe-T)测定,所有样品的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 分别采用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9 和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.119 4 进行标准化。

锆石单矿物分选在河北省地质矿产调查研究所完成。野外采集约 10 kg 的辉石闪长岩样品,室内进行粉碎,然后通过重选、磁选,最后在双目镜下挑选出锆石样品。SHRIMP 锆石 U-Pb 分析在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成。详细分析流程和原理参考宋彪等(2002),将待测锆石样品与锆石标准样 TEM 置于环氧树脂中做成样品靶。通过打磨和抛光将靶上的大部分锆石暴露出中心(大致一半)。然后进行透反射光和阴极发光(CL)照相。最后经过清洗、镀金。仪器分析过程中,一次离子源气体为氧气。将其电离后,由 O₂⁺ 轰击锆石颗粒表面,激发出二次离子。每个点的数据由 5 次扫描组成。一次离子流强度为 7~8 nA,束斑的直径为 25~30 μm。应用标准锆石 SL13(U = 238 × 10⁻⁶)标定样品的 U、Th、Pb 含量,利用标准

锆石 TEMORA(417 Ma)进行年龄校正。每测定一个 TEMORA 标样后,测定 4 个待测样品点,交叉重复进行。数据处理采用 SQUID1.0(Ludwig, 2001)及 ISOPLOT(Ludwig, 2000)程序。普通铅根据实测的²⁰⁴Pb进行校正,同位素比值误差为 1 σ ,年龄结果采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均值,误差为 95%的置信度。

4 地球化学特征

5 个样品分析中,黄金山辉石闪长岩 SiO₂ 含量 57.07% ~ 58.02%、TiO₂ 含量 1.23% ~ 1.45%、MgO 含量 2.58% ~ 3.11%、Al₂O₃ 含量 14.76% ~ 15.51%、Fe₂O₃ 含量 9.12% ~ 9.74%、CaO 含量 5.61% ~ 6.06%、K₂O 含量 2.87% ~ 3.08%、Na₂O 含量 3.14% ~ 3.33%、P₂O₅ 含量 0.65% ~ 0.72% (表 1)。总体上,黄金山辉石闪长岩具有高 TiO₂、TFe₂O₃、P₂O₅、K₂O 和 Na₂O,低 MgO 特征。扣除烧失量重新计算后,在 TAS 分类图中(图 3),黄金山辉石闪长岩位于正长闪长岩-闪长岩的过渡区域。

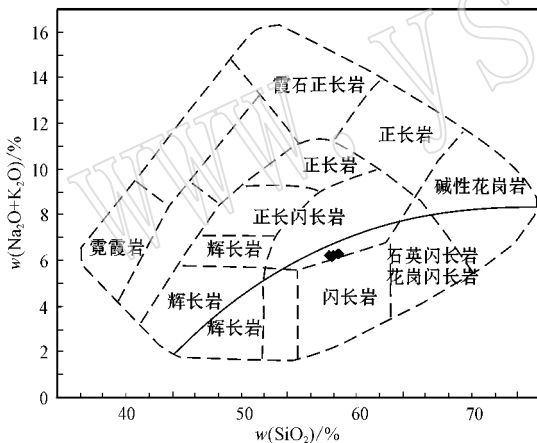


图 3 黄金山辉石闪长岩的岩石分类图(据 Wilson, 1989)

Fig. 3 Classification of Huangjinshan pyroxene diorite (after Wilson, 1989)

岩石稀土总量较高($365.75 \times 10^{-6} \sim 411.97 \times 10^{-6}$) (表 1)。在球粒陨石标准化的稀土元素配分图解中(图 4a),轻重稀土元素分异强烈($(La/Lu)_{cn} = 11.05 \sim 12.31$),其中轻稀土元素分异较明显($(La/Sm)_{cn} = 3.61 \sim 3.72$),重稀土元素分异不明显($(Gd/Lu)_{cn} = 1.89 \sim 1.95$)。所有样品皆具有轻微的负铈异常($Eu/Eu^* = 0.64 \sim 0.71$)。岩石富集 Rb ($72.6 \times 10^{-6} \sim 79.5 \times 10^{-6}$)、Ba ($1\ 214 \times 10^{-6} \sim 1\ 318 \times 10^{-6}$)、Sr ($381 \times 10^{-6} \sim 413 \times 10^{-6}$)、Zr (551

表 1 黄金山辉石闪长岩主量($w_B/\%$)、稀土和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析

Table 1 Major elements($w_B/\%$), REE and trace elements ($w_B/10^{-6}$) analyses of Huangjinshan pyroxene diorite

样品号	HT14-1	HT14-4	HT14-5	HT14-6	HT14-7
SiO ₂	57.97	57.07	58.02	57.43	57.16
TiO ₂	1.23	1.32	1.23	1.27	1.45
Al ₂ O ₃	15.51	15.26	14.94	14.76	15.27
TFe ₂ O ₃	9.12	9.5	9.34	9.74	9.42
CaO	5.96	5.84	5.61	5.86	6.06
MgO	2.58	2.94	2.99	3.11	2.94
MnO	0.13	0.14	0.13	0.14	0.14
K ₂ O	2.91	2.88	3.08	2.95	2.87
Na ₂ O	3.33	3.14	3.16	3.21	3.29
P ₂ O ₅	0.66	0.66	0.71	0.65	0.72
烧失量	0.1	0.66	0.26	0.3	0.14
总量	99.50	99.41	99.47	99.42	99.46
Mg [#]	36	38	39	39	38
La	78.6	80.3	88	84.3	86.8
Ce	144	146	163	153	165
Pr	18.4	18.6	20.5	20.4	20.6
Nd	74.5	76.9	82.3	82.4	84.1
Sm	13	13.3	14.4	14.2	14.6
Eu	2.7	2.72	2.65	2.9	2.95
Gd	10.6	10.6	11.2	11.9	11.9
Tb	1.59	1.63	1.75	1.77	1.74
Dy	8.99	9.21	9.51	9.87	10
Ho	1.84	1.86	1.98	2.04	1.95
Er	5.24	5.37	5.51	5.79	5.79
Tm	0.75	0.76	0.78	0.81	0.79
Yb	4.85	4.85	4.96	5.1	4.99
Lu	0.69	0.70	0.73	0.78	0.76
∑REE	365.75	372.80	407.27	395.26	411.97
Eu/Eu*	0.69	0.68	0.62	0.67	0.67
(La/Lu) _{cn}	11.68	11.78	12.31	11.05	11.71
Y	46.8	46.8	49.7	50.2	50.2
V	149	150	144	157	156
Sc	23	23.8	22	24.5	24.4
Cs	0.536	0.958	0.917	1.08	0.918
Cr	140	139	126	149	136
Co	26.7	25.9	24.7	27.2	27.6
Ni	21.2	19.7	19.9	21	21.2
Ga	23.3	22.9	23.7	24	24.5
Pb	17.9	17.2	19.2	18.8	19.5
Rb	74.3	72.6	79.5	83.9	79.5
Sr	407	396	381	398	413
Ba	1 255	1 252	1 214	1 318	1 297
Th	4.28	4.12	4.26	4.49	4.29
U	0.667	0.598	0.59	0.72	0.819
Ta	0.964	0.976	0.88	0.992	1.13
Nb	17.9	18.3	16.2	18	21.5
Zr	623	641	585	617	551
Hf	12.7	13.2	12.2	13.2	11.8

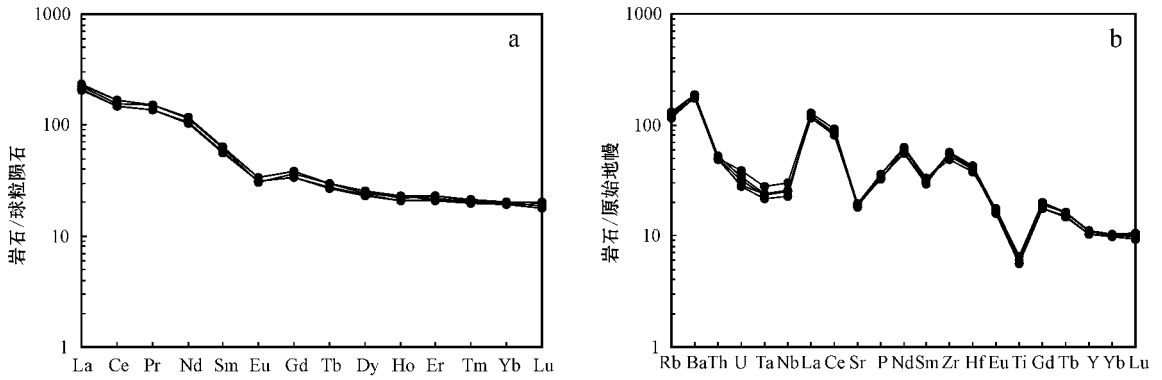


图 4 黄金山辉石闪长岩球粒陨石标准化稀土元素配分图解 a 球粒陨石值据 Henderson(1984)和原始地幔标准化微量元素配分图解 b 原始地幔值据 Sun and McDonough(1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, chondrite data after Henderson, 1984) and primitive mantle normalized trace elements patterns (b, primitive mantle data after Sun and McDonough, 1989)

$\times 10^{-6} \sim 641 \times 10^{-6}$)和 Hf($11.8 \times 10^{-6} \sim 13.2 \times 10^{-6}$)而 N($19.7 \times 10^{-6} \sim 21.2 \times 10^{-6}$)和 C($126 \times 10^{-6} \sim 149 \times 10^{-6}$)含量低(表 1)。在原始地幔标准化的微量元素配分图解中(图 4b),黄金山辉石闪长岩具有明显的 Th、U、Nb、Ta、Sr、Ti 负异常和 Rb、Ba、La、Ce、Zr、Hf 正异常。

选择了 3 件辉石闪长岩样品完成 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析,结果见表 2。其中($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) ($0.705536 \sim 0.706127$)和 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) ($0.510051 \sim 0.510115$)变化范围较小, $\epsilon\text{Nd}(t = 1.76 \text{ Ga})$ 值为 $-6.08 \sim -4.81$, 亏损地幔模式年龄 t_{DM} 为 $2573 \sim 2668 \text{ Ma}$ 。

5 锆石 U-Pb 年龄

黄金山辉石闪长岩锆石多为长柱状-短柱状,少数为粒状,锆石粒度大小为 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 。在透射光下,多数锆石柱面较发育,锥面不发育。在阴极发光图像中,多数锆石可见板状环带,部分锆石环带不明显(图 5),具有中-基性岩浆锆石特征。

在 24 粒锆石上进行了 24 个测点分析,其中 U、Th 含量为 $28 \times 10^{-6} \sim 588 \times 10^{-6}$ 、 $0 \sim 32 \times 10^{-6}$, Th/U 比值仅有一个锆石测点为 0.15(14.1 点),其余测点均小于 0.1($0.02 \sim 0.05$) (表 3)。在锆石 U-Pb 年龄谐和图中,多数分析点位于谐和线上或附近,个别分析点具有少量的铅丢失而偏离谐和线(图 6)。去除 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄明显偏低的 2 个(3.1 和 24.1)分析点,利用其余 22 个分析点获得不一致线

表 2 黄金山辉石闪长岩 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析
Table 2 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic analyses of Huangjinshan pyroxene diorite

样品号	HT14-1	HT14-5	HT14-7
Rb	67	72.8	69.9
Sr	422	406	419
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.4592	0.5193	0.4830
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.717525	0.719269	0.717759
Error	0.000010	0.000015	0.000011
($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	0.705904	0.706127	0.705536
Sm	11.77	13.25	13.71
Nd	69.44	72.91	74.42
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1025	0.1099	0.1114
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511263	0.511323	0.511405
(2σ)	0.000009	0.000005	0.000011
($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)	0.510076	0.510051	0.510115
$\epsilon\text{Nd}(t)$	-5.57	-6.08	-4.81
t_{DM}/Ma	2573	2668	2586

上交点 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1747 \pm 15 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.4)。其中,去除年龄结果明显偏小的 4 个点(3.1、7.1、20.1、24.1)和强烈反向不一致的测点(13.1)后,其余 19 个分析点获得的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄结果为 $1755 \pm 12 \text{ Ma}$ (MSWD = 1.8) (图 6),与上交点年龄在误差范围内一致。该年龄代表了岩体的侵位时代。

6 讨论

6.1 岩石成因

黄金山辉石闪长岩中, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 与下地壳岩石含量相当,而 K_2O 和 Na_2O 含量高于下地

表 3 黄山山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 分析结果
Table 3 Zircon SHRIMP U-Pb analyses of Huangjishan pyroxene diorite

分析点	$^{206}\text{Pb}_e$	U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$	Th/U	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	误差相关性	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	不谐和性
HT14-6-1.1	0.04	203	9	58.2	0.05	0.108 46	0.62	4.992	1.8	0.3338	1.7	0.939	1 857 ± 27	1 774 ± 11	-5
HT14-6-2.1	0.49	119	4	30.2	0.03	0.104 4	1.5	4.229	2.0	0.293 9	1.3	0.663	1 661 ± 19	1 703 ± 28	2
HT14-6-3.1	0.83	28	0	7.41	0.02	0.101 7	3.2	4.34	3.6	0.309 1	1.6	0.459	1 736 ± 25	1 656 ± 59	-5
HT14-6-4.1	0.17	85	3	22.3	0.03	0.106 6	1.0	4.478	1.6	0.304 6	1.2	0.776	1 714 ± 19	1 742 ± 19	2
HT14-6-5.1	0.35	114	3	29.4	0.03	0.106 6	1.5	4.37	2.4	0.297 5	1.8	0.769	1 679 ± 27	1 741 ± 28	4
HT14-6-6.1	0.37	86	2	22.8	0.02	0.108 0	1.4	4.604	1.9	0.309 2	1.3	0.673	1 737 ± 19	1 766 ± 26	2
HT14-6-7.1	0.59	81	2	19.2	0.02	0.104 3	1.9	3.937	2.3	0.273 9	1.3	0.575	1 560 ± 19	1 701 ± 35	8
HT14-6-8.1	0.19	78	2	22.2	0.03	0.109 6	1.2	4.969	1.8	0.328 8	1.3	0.722	1 833 ± 20	1 793 ± 22	-2
HT14-6-9.1	0.14	109	4	29.8	0.04	0.106 5	0.99	4.655	1.6	0.317 0	1.2	0.779	1 775 ± 19	1 741 ± 18	-2
HT14-6-10.1	0.26	190	7	55.7	0.04	0.105 3	1.1	4.930	1.6	0.339 4	1.2	0.733	1 884 ± 20	1 720 ± 21	-10
HT14-6-11.1	0.12	588	29	150	0.05	0.106 73	0.49	4.376	1.3	0.297 4	1.2	0.922	1 678 ± 17	1 744 ± 9	4
HT14-6-12.1	0.27	182	6	44.3	0.03	0.105 4	2.5	4.11	2.8	0.282 9	1.4	0.481	1 606 ± 19	1 722 ± 46	7
HT14-6-13.1	0.13	134	4	44.2	0.03	0.108 74	0.73	5.76	1.9	0.384 0	1.7	0.921	2 095 ± 31	1 778 ± 13	-18
HT14-6-14.1	0.20	213	32	60.5	0.15	0.109 29	0.77	4.974	1.9	0.330 0	1.7	0.912	1 839 ± 27	1 788 ± 14	-3
HT14-6-15.1	0.28	107	4	28.3	0.04	0.106 1	1.6	4.481	2.1	0.306 3	1.3	0.633	1 723 ± 20	1 733 ± 30	1
HT14-6-16.1	0.24	106	3	27.0	0.03	0.109 5	1.0	4.459	1.6	0.295 3	1.2	0.759	1 668 ± 18	1 791 ± 19	7
HT14-6-17.1	0.30	56	1	16.0	0.02	0.109 4	1.7	4.98	2.5	0.329 9	1.8	0.736	1 838 ± 29	1 790 ± 31	-3
HT14-6-18.1	0.21	173	7	47.7	0.04	0.107 19	0.87	4.728	1.5	0.319 9	1.2	0.818	1 789 ± 19	1 752 ± 16	-2
HT14-6-19.1	0.32	94	2	24.3	0.03	0.105 3	1.5	4.374	2.0	0.301 3	1.4	0.668	1 698 ± 20	1 719 ± 28	1
HT14-6-20.1	0.60	62	1	17.6	0.02	0.104 2	1.9	4.73	2.7	0.329 2	1.8	0.686	1 835 ± 29	1 700 ± 36	-8
HT14-6-21.1	0.27	103	3	23.8	0.03	0.104 7	1.6	3.865	2.1	0.267 8	1.3	0.643	1 530 ± 18	1 709 ± 29	10
HT14-6-22.1	0.33	73	2	17.8	0.03	0.108 0	2.0	4.20	2.5	0.281 7	1.5	0.601	1 600 ± 21	1 766 ± 36	9
HT14-6-23.1	0.72	53	2	14.3	0.04	0.105 0	2.3	4.50	2.7	0.311 2	1.4	0.533	1 747 ± 22	1 714 ± 42	-2
HT14-6-24.1	0.95	41	1	9.69	0.02	0.098 6	3.7	3.72	4.0	0.274 0	1.6	0.396	1 561 ± 22	1 597 ± 69	2

注: 误差为 1 σ ; Pb_e 和 Pb^* 分别代表普通铅和放射成因铅; 标准校正误差为 0.62%, 普通铅用 ^{204}Pb 实测值。

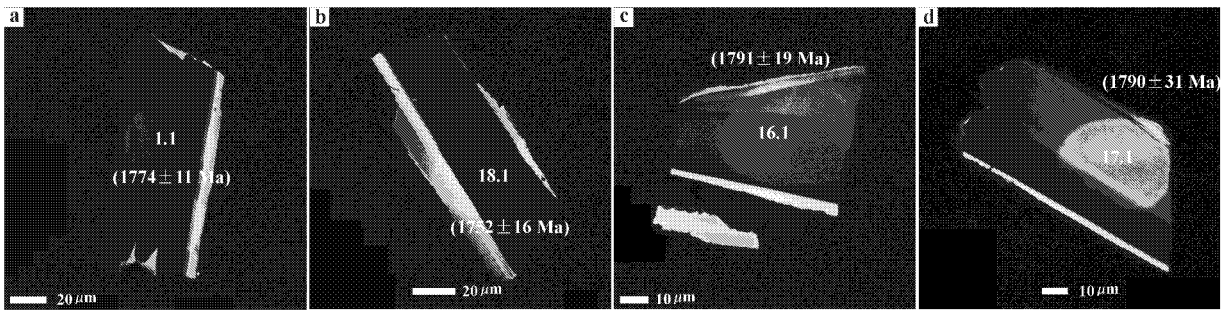


图 5 黄金山辉石闪长岩锆石阴极发光图像

Fig. 5 CL images of zircon grains from Huangjinshan pyroxene diorite

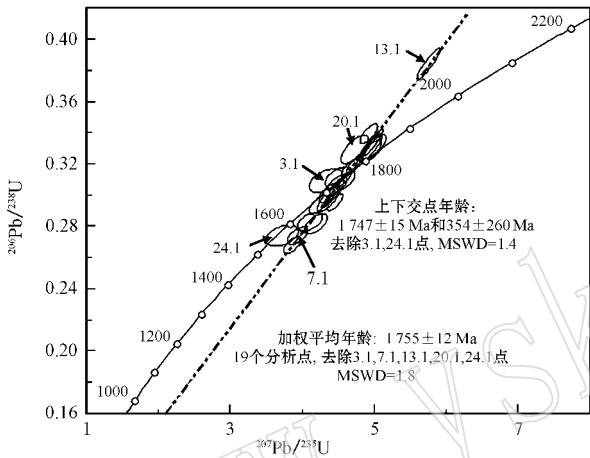


图 6 黄金山辉石闪长岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 6 Concordia diagram of zircon U-Pb ages of Huangjinshan pyroxene diorite

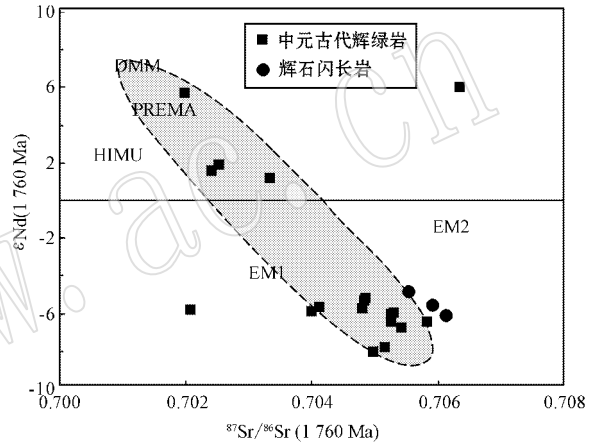


图 7 黄金山辉石闪长岩 $\epsilon Nd(t)$ ($^{87}Sr/^{86}Sr$) 关系图

[辉绿岩数据引自 Peng 等(2007)]

Fig. 7 $\epsilon Nd(t)$ versus ($^{87}Sr/^{86}Sr$) diagram of Huangjinshan pyroxene diorite (dolerite data after Peng *et al.*, 2007) DMM—亏损的洋中脊玄武岩地幔; PREMA—流行或普遍地幔; HIMU—高 U/Pb 比值的地幔; EMI1—1 型富集地幔; EMI2—2 型富集地幔

DMM—Depleted MORB Mantle; PREMA—Prevalent Mantle; HIMU—High- μ Mantle; EMI1—Enriched Mantle 1; EMI2—Enriched Mantle 2

壳 $MgO/Mg\#$ 值为 36~39) 与下地壳相比明显偏低 (Rudnick & Fountain, 1995; Taylor & McLennan, 1995; Wedepohl, 1995; Gao *et al.*, 1998)。因此, 黄金山辉石闪长岩难以直接由下地壳岩石高度部分熔融形成, 而可能由地幔部分熔融形成。辉石闪长岩具有低初始 ($^{87}Sr/^{86}Sr$) 和 ($^{143}Nd/^{144}Nd$) 同位素比值, 在 $\epsilon Nd(t)$ - ($^{87}Sr/^{86}Sr$) 关系图中 (图 7), 样品皆位于富集地幔源区附近, 与华北克拉通广泛分布的早元古代基性岩墙群中高分异的岩墙具有相似的岩浆源区特征 (Peng *et al.*, 2007)。同时, 辉石闪长岩具有 Th、U、Nb、Ta 和 Ti 等微量元素异常, 可能与源区或岩浆侵位过程中受到地壳混染有关。但辉石闪长岩中主微量元素和同位素组成变化较小, 所以其地壳混染可能代表源区特征。黄金山辉石闪长岩可能由富集的岩石圈地幔源区发生部分熔融形成。辉石闪长岩 MgO 含量低, 稀土和 P_2O_5 含量高, $La/Sm-La$ 关系图 (图 8) 表现分离结晶趋势。据此综

合判定, 黄金山辉石闪长岩是富集的岩石圈地幔发生部分熔融后分离结晶形成的。

近年来, 许多研究资料表明华北克拉通在早元古代末期最终形成稳定的克拉通 (白瑾, 1986; Zhao *et al.*, 1999b, 2005; Zhao, 2001; Guo *et al.*, 2002; Zhai and Liu, 2003; 耿元生等, 2004; Kröner *et al.*, 2005; Kusky *et al.*, 2007), 一些学者将华北早元古代克拉通化过程与 Columbia 超大陆的汇聚联系起来 (Wilde *et al.*, 2002; Zhao *et al.*, 2002, 2003, 2004; Peng *et al.*, 2005)。而华北克拉通广泛发育的 1.78~1.76 Ga 基性岩墙群代表较大范围的伸展事件, 可能与 Columbia 超大陆的裂解有关

(Peng *et al.*, 2005, 2007, 2008; Hou *et al.*, 2006b, 2008a, 2008b; Peng, 2010)。野外地质关系表明, 黄金山辉石闪长岩被北西向的早元古代辉绿岩墙穿切, 该期岩墙群的锆石和斜锆石 U-Pb 年龄分别为 1.78 Ga 和 1.78 ~ 1.75 Ga (Peng *et al.*, 2005)。而黄金山辉石闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 1755 ± 12 Ma, 在年龄结果误差范围内与华北区域上广泛分布的辉绿岩墙群时代近于一致。结合地质关系和同位素资料, 黄金山辉石闪长岩和辉绿岩墙应来自相同的富集地幔源区, 为同一岩浆旋回不同阶段的岩浆侵位记录。黄金山辉石闪长岩也是华北克拉通化之后大规模伸展作用的岩石记录。

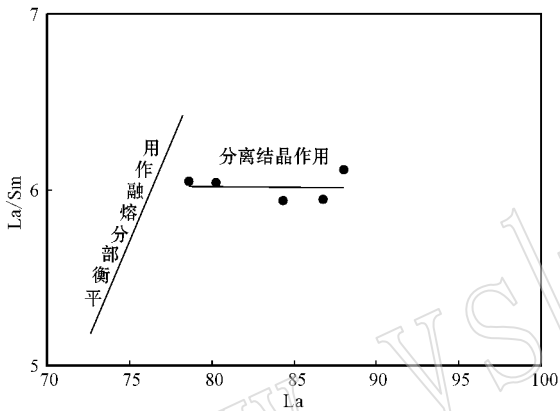


图8 黄金山辉石闪长岩 La/Sm - La 关系图

Fig. 8 La/Sm versus La of Huangjingshan pyroxene diorite

在华北南缘, 大面积分布的熊耳群火山岩具有裂谷火山岩特征, 其时代与华北克拉通广泛分布的基性岩墙群时代相近(赵太平等, 2004; He *et al.*, 2009)。Peng 等(2008)研究发现两者成因联系密切, 具有大火成岩省特征, 可能与华北南缘地幔柱有关。此外, 豫西崤山侵入熊耳群的石英闪长岩锆石和斜锆石年龄为 1778 ± 12 Ma 和 1789 ± 4 Ma, 且与熊耳群具有相同的源区(崔敏利等, 2010)。黄金山辉石闪长岩虽与熊耳群空间上无地质关系, 但却与熊耳群同成因的基性岩墙群有相同的源区。因此, 可以推断, 黄金山辉石闪长岩与豫西崤山石英闪长岩为地幔柱环境下火山喷溢和基性岩墙侵位过程中不同岩浆分异阶段的产物。

6.2 低 Th/U 比值锆石的可能成因

通常情况下, 岩浆锆石具有较高的 Th/U 比值(0.2~0.8), 而变质锆石多具有较低的 Th/U 比值(多小于 0.1)(Rubatto and Hermann, 2007)。在黄金山辉石闪长岩中, 除一粒锆石的 Th/U 比值稍高

外, 其余锆石的 Th/U 比值都小于 0.1。与典型的岩浆锆石相差甚远, 而与变质锆石 Th/U 比值特征相似。对于变质锆石, 低 Th/U 比值的形成有两种原因: 一是 Th^{4+} 离子半径较 U^{4+} 大, 变质过程 Th^{4+} 比 U^{4+} 更难替换 Zr^{4+} (Hf^{4+}) 进入锆石晶格, 从而使变质重结晶锆石的 Th/U 比值降低(Hoskin and Schaltegger, 2003); 二是变质过程中富 Th 矿物(如独居石和帘石类)的生成, 使变质新生锆石具有低的 Th/U 比值(Bingen *et al.*, 2001)。黄金山辉石闪长岩中, 岩石的 Th/U 比值为 5.24~7.22, 显然锆石中的低 Th/U 比值与原始岩浆并无直接联系。在辉石闪长岩中, 主要的矿物组合为斜长石、单斜辉石和角闪石。在这几种矿物中, Th 和 U 的配分系数皆小于 1, 具有不相容元素特征(Rollison, 1993)。因此, 斜长石、单斜辉石和角闪石的分离结晶并不能使残余岩浆中 Th/U 比值发生明显的改变。辉石闪长岩锆石低 Th/U 比值很可能与富含 Th(高 Th/U 比值)副矿物的结晶有关, 但具体的形成原因还需要对岩石中矿物的微量元素含量系统分析后做出合理的解释。

7 结论

(1) 黄金山辉石闪长岩主微量元素和同位素地球化学特征指示其为富集岩石圈地幔发生部分熔融后分离结晶形成的, 与华北克拉通广泛分布的早元古代基性岩墙群中高分异岩墙具有相似的岩浆源区。辉石闪长岩的侵位年龄为 1755 ± 12 Ma, 与早元古代基性岩墙群时代相近。根据基性岩墙与辉石闪长岩的地质关系, 两者应为华北南缘地幔柱背景下同一岩浆旋回不同阶段的岩浆侵位记录, 辉石闪长岩也代表华北克拉通之后伸展作用的开始。

(2) 黄金山辉石闪长岩具有典型的岩浆岩结构构造, 并未发生变质作用。但其中锆石却具有低的 Th/U 比值, 与大多变质成因锆石相似。其形成原因与原始岩浆和主要组成矿物(斜长石、单斜辉石和角闪石)并无明显关系, 可能是富含 Th 的副矿物结晶引起的。辉石闪长岩中低 Th/U 比值锆石的出现表明, 利用 Th/U 比值解释锆石成因和年龄结果意义时应慎重。

致谢 感谢北京离子探针中心张玉海老师、杨之青老师、杨淳老师、周慧老师、叶青和核工业北京地质研究院刘牧老师在锆石 U-Pb 测年和全岩地球

化学、Sr-Nd 同位素测试过程中的大力帮助;感谢万渝生研究员、彭澎博士和颀颀强博士在成文过程中的有益讨论和启发;同时感谢万渝生研究员和编辑部老师提供的良好意见和建议。谨以此文献给沈其韩院士 90 华诞,祝沈先生健康长寿!

References

- Bai Jin. 1986. The Early Precambrian Geology of Wutaishan [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1~475 (in Chinese with English abstract).
- Bingen B, Austrheim H and Whitehouse M. 2001. Ilmenite as a source for zirconium during high-grade metamorphism? Textural evidence from the Caledonides of Western Norway and implications for zircon geochronology [J]. *Journal of Petrology*, 42(2): 355~375.
- Cui Minli, Zhang Baolin, Peng Peng, et al. 2010. Zircon/baddeleyite U-Pb dating for the Paleo-proterozoic intermediate-acid intrusive rocks in Xiaoshan Mountains, west of Henan Province and their constraints on the age of the Xiong'er Volcanic Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1541~1549 (in Chinese with English abstract).
- Du Lilin, Yang Chonghui, Guo Jinghui, et al. 2010. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(17): 1782~1789.
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, et al. 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959~1975.
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Song Biao, et al. 2004. Post Orogenic Granites with an Age of 1800 Ma in Liliang Area, North China Craton: Constraints from Isotopic Geochronology and Geochemistry [J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(4): 477~487 (in Chinese with English abstract).
- Guo J H, O'Brien P J and Zhai M. 2002. High-pressure granulites in the Sanggan area, North China craton: metamorphic evolution, P-T paths and geotectonic significance [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 20: 741~756.
- He Y H, Zhao G C, Sun M, et al. 2009. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: implications for the Paleo-Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 168: 213~222.
- Henderson P. 1984. General geochemical properties and abundances of the rare earth elements [A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. New York: Elsevier, 1~510.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [A]. Hancher J M and Hoskin P W O. *Zircon* [C]. *Review in Mineralogy & Geochemistry*, 53: 1~500.
- Hou G T, Li J H, Yang M H, et al. 2008a. Geochemical constraints on the tectonic environment of the Late Paleoproterozoic mafic dyke swarms in the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 13: 103~116.
- Hou G T, Liu Y L and Li J H. 2006a. Evidence for ~1.8 Ga extension of the Eastern Block of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of mafic dyke swarms in Shandong Province [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 392~401.
- Hou G T, Santosh M, Qian X L, et al. 2008b. Configuration of the Late Paleoproterozoic supercontinent Columbia: Insights from radiating mafic dyke swarms [J]. *Gondwana Research*, 14: 395~409.
- Hou G T, Wang C C, Li J H, et al. 2006b. Late Paleoproterozoic extension and a paleostress field reconstruction of the North China Craton [J]. *Tectonophysics*, 422: 89~98.
- Kröner A, Wilde S A, Li J H, et al. 2005. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fupign terrain of northern China [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 24: 577~595.
- Kusky T, Li J G and Santosh M. 2007. The Paleoproterozoic North Hebei Orogen: North China craton's collisional suture with the Columbia supercontinent [J]. *Gondwana Research*, 12: 4~28.
- Li Jianghai, Hou Guiting, Qiang Xianglin, et al. 2001. Single-zircon U-Pb age of the Initial Mesoproterozoic basic dike swarms in Hengshan Mountain and its implication for the tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Geological Review*, 47(3): 234~238 (in Chinese with English abstract).
- Liao Chaolin, Wang Yuejun and Peng Touping. 2003. 40Ar-39Ar geochronology of Paleoproterozoic mafic dykes from Southern Taihang Mountains and its geological significance [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(4): 354~361 (in Chinese with English abstract).
- Lu S N, Yang C L, Li H K, et al. 2002. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 5(1): 123~131.
- Lu Songnian, Chen Zhihong and Xiang Zhenqun. 2008. *Chronological Framework of Old Plutons in Taishan World Geopark* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~90 (in Chinese).
- Ludwig K R. 2000. User's manual for Isoplot/Ex version 2.2: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [C]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 1a, 1~50.
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1.02: A User's Manual* [C]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 2: 1~19.
- Peng P, Zhai M G, Ernst R E, et al. 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er Volcanic Province and the North China dyke swarm [J]. *Lithos*, 101: 360~380.
- Peng P, Zhai M G, Zhang H F, et al. 2005. Geochronological constraints on the Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: SHRIMP zircon ages of different types of mafic dikes [J]. *International Geology Review*, 47: 492~508.
- Peng P, Zhao M G, Guo J H, et al. 2007. Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dykes in the central North China craton [J]. *Gondwana Research*, 12: 29~46.
- Peng P. 2010. Reconstruction and interpretation of giant mafic dyke swarms: a case study of 1.78 Ga magmatism in the North China craton [A]. Kusky, T M, Zhai M G and Xiao W J. *The Evolving Continents: Understanding Processes of Continental Growth* [C]. Geological Society, London, Special Publications, 338: 163~178.
- Peng Peng, Zhai Mingguo, Zhang Huafeng, et al. 2004. Geochemistry and geological significance of the 1.8 Ga mafic dyke swarms in the North China Craton: an example from the juncture of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 439~456 (in Chinese with English abstract).
- Rollison H R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation,*

- Interpretior[M]. Longman Singapore Publishers Ltd , 1~352.
- Rubatto D and Hermann J. 2007. Zircon behaviour in deeply subducted rocks[J]. *Element* , 3 : 31~35.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust : a lower crustal perspective[J]. *Review Geophysics* , 33 : 267~309.
- Song Biao , Zhang Yuhai , Wan Yusheng , *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review* , 48 (Supp) : 26~30 (in Chinese).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implications for mantle composition and process [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. The Geological Society Publishing House , 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Review Geophysics* , 33 : 241~265.
- Wang Y J , Fan W M , Zhang Y H , *et al.* 2004. Geochemical , $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological and Sr-Nd isotopic constraints on the origin of Paleoproterozoic mafic dikes from the southern Taihang Mountains and implications for the ca. 1 800 Ma event of the North China Craton[J]. *Precambrian Research* , 135 : 55~77.
- Wang Y J , Zhao G C , Fan W M , *et al.* 2007. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Paleoproterozoic mafic dikes from western Shandong Province : Implications for back-arc basin magmatism in the Eastern North China Craton[J]. *Precambrian Res* , 154 (1~2) : 107~124.
- Wang Y J , Zhao G C , Cawood P A , *et al.* 2008. Geochemistry of Paleoproterozoic (~1 770 Ma) mafic dikes from the Trans-North China Orogen and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences* , 33 : 61~77.
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 59 : 1 217~1 232.
- Wilde S A , Zhao G C and Sun M. 2002. Development of the North China Craton during the late Archean and final amalgamation at 1.8 Ga : Some speculations on its position within a global Paleoproterozoic supercontinent[J]. *Gondwana Research* , 5 (1) : 85~94.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. Springer , 1~466.
- Wu Jiashan , Liu Dunyi and Geng Yuansheng. 2008. Integrated research report on the establishment Paleoproterozoic Hutuo Group of China—Geochronological framework of Hutuo Group and sequences of major geological events[A]. *Research Report on the Establishment of Major Stratigraphical Stages in China(2001—2005* [C]. Beijing : Geological Publishing House , 534~544 (in Chinese).
- Zhai Mingguo and Bian Aiguo. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China craton at the end of the Neoproterozoic , and its break-up during the late Palaeoproterozoic and Mesoproterozoic [J]. *Sci. Chin. Ser. D* , 43 (Suppl.) , 219~232.
- Zhai M G and Liu W J. 2003. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton : a review[J]. *Precambrian Research* , 122 : 183~199.
- Zhao G C , Cawood P A , Wilde S A , *et al.* 2002. Review of global 2.1~1.8 Ga orogens : implications for a pre-Rodinia supercontinent[J]. *Earth-Science Review* , 59 : 125~162.
- Zhao G C , Cawood P and Lu L Z. 1999a. Petrology and P-T history of the Wutai amphibolites : implications for tectonic evolution of the Wutai Complex , China[J]. *Precambrian Research* , 93 : 181~199.
- Zhao G C , Sun M , Wilde S A , *et al.* 2003. Assembly , Accretion and Breakup of the Paleo-Mesoproterozoic Columbia Supercontinent : Records in the North China Craton[J]. *Gondwana Research* , 6 (3) : 417~434.
- Zhao G C , Sun M , Wilde S A , *et al.* 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent : assembly , growth and breakup[J]. *Earth-Science Review* , 67 : 91~123.
- Zhao G C , Sun M , Wilde S A , *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton : key issues revisited [J]. *Precambrian Research* , 136 : 177~202.
- Zhao G C , Wilde S A , Cawood P A , *et al.* 1999b. Tectonothermal history of the basement rocks in the western zone of the North China Craton and its tectonic implications[J]. *Tectonophysics* , 310 : 37~53.
- Zhao G C. 2001. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton [J]. *Geological Magazine* , 138 (1) : 89~91.
- Zhao Taiping , Zhai Mingguo , Xia Bin , *et al.* 2004. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the volcanic rocks of the Xiong'er Group : constraints on the initial formation age of the cover of the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin* , 49 (23) : 2 495~2 502.

附中文参考文献

- 白 瑾. 1986. 五台山早前寒武纪地质[M]. 天津 : 天津科技出版社 , 1~475.
- 崔敏利 , 张宝林 , 彭 澎 , 等. 2010. 豫西崤山早元古代中酸性侵入岩锆石/斜锆石 U-Pb 测年及其对熊耳火山岩系时限的约束[J]. *岩石学报* , 26 (5) : 1 541~1 549.
- 杜利林 , 杨崇辉 , 郭敬辉 , 等. 2010. 五台地区溱沱群底界时代 : 玄武安山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. *科学通报* , 55 (3) : 246~254.
- 耿元生 , 杨崇辉 , 宋 彪 , 等. 2004. 吕梁地区 18 亿年的后造山花岗岩 : 同位素年代学和地球化学制约[J]. *高校地质学报* , 10 (4) : 477~487.
- 李江海 , 侯贵廷 , 钱祥麟 , 等. 2001. 恒山中元古代早期基性岩墙群的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其克拉通构造演化意义[J]. *地质论评* , 47 (3) : 234~238.
- 廖超林 , 王岳军 , 彭头平. 2003. 太行山南段早元古代基性岩脉的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学* , 27 (4) : 354~361.
- 陆松年 , 陈志宏 , 相振群. 2008. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架[M]. 北京 : 地质出版社 , 1~90.
- 彭 澎 , 翟明国 , 张华锋 , 等. 2004. 华北克拉通 1.8 Ga 镁铁质岩墙群的地球化学特征及其地质意义 : 以晋冀蒙交界地区为例[J]. *岩石学报* , 20 (3) : 439~456.
- 宋 彪 , 张玉海 , 万渝生 , 等. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关问题讨论[J]. *地质论评* , 48 (增刊) : 26~30.
- 伍家善 , 刘敦一 , 耿元生. 2008. 中国古元古界溱沱群建系综合研究报告——溱沱群地质年代格架和重大地质事件序列[A]. *中国主要断代地层建阶研究报告* [C]. 北京 : 地质出版社 , 534~544.
- 翟明国 , 卞爱国. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解[J]. *中国科学(D辑)* , 30 (增刊) : 129~137.
- 赵太平 , 翟明国 , 夏 斌 , 等. 2004. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究 : 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. *科学通报* , 49 (2) : 2 342~2 349.