华北克拉通北缘东段海沟岩体的锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素组成及其动力学背景*

张松[1,2] 王永彬[1,3] 褚少雄[1]

ZHANG Song[1,2], WANG YongBin[1,3] and CHU ShaoXiong[1]

1. 中国科学院地质与地球物理研究所,矿产资源研究重点实验室,北京 100029
2. 核工业北京地质研究院,北京 100029
3. 中国科学院研究生院,北京 100049

1. *Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2. *CNNC Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing* 100029, *China*
3. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

2011-08-20 收稿, 2011-10-28 改回.

Zhang S, Wang YB and Chu SX. 2012. Zircon U-Pb ages and Sr-Nd-Hf isotopic composition of the Haigou granitoids at the northeastern margin of North China Craton: Implications for geodynamic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 544-556

Abstract The Haigou granitoids, located in the northeastern margin of the North China Craton, consists of monzonite and monzogranite. This study presents zircon U-Pb age, geochemical compositions and Sr-Nd-Hf isotopes of the Haigou granitoids, to discuss the origin and tectonic setting of the magmas. The zircon U-Pb dating for the monzonite and monzogranite yields 322.9±3.4Ma and 320.3±3.5Ma respectively, indicating the magmas emplaced during the Hercynian Period. Petrochemical data indicate that they belong to calc-alkaline I-type granitoids with metaluminous affinity. They have similar geochemical features such as K_2O/Na_2O ratios being between 0.51 and 0.93, A/CNK ranging from 0.87 to 0.94, LREE enrichment with slightly positive Eu anomalies. In addition, trace element geochemistry also displays LILE (such as Rb, Ba, K) enrichment and HFSE (including Nb, Ta, Ti, P) depletion. The whole-rock I_{sr} and $\varepsilon_{Nd}(t)$ of the Haigou granitoids are 0.7054~0.7059 and −10.4~−8.6 respectively. Two-stage Hf model ages (t_{DM2}) of magmatic zircons from monzonite and monzogranite are 1.39~1.81Ga and 1.67~2.06Ga respectively, all manifesting relative low $\varepsilon_{Hf}(t)$ values (−7.6~−0.8 for monzonite and −11.5~−5.4 for monzogranite). Above-stated isotopic systematics of the granitoids implies that the magmas were derived possibly from the partial melting of ancient lower crust of the Mesoproterozoic or Paloproterozoic ages with abundant mantle contribution. Considering their ages, geochemical and isotopic signatures and regional geological evolution, it is suggested that subduction of the Paleoasian oceanic crust might be responsible for formation and emplacement of the Haigou granitoids magmas.

Key words Haigou granitoids; Sr-Nd-Hf isotopes; tectonic setting; Northeastern margin of the North China Craton

摘 要 海沟岩体位于华北克拉通北缘东段,由二长岩和二长花岗岩组成。本文对该岩体主微量元素、Sr-Nd-Hf 同位素和锆石的 U-Pb 年龄进行了系统研究。高精度锆石 U-Pb 年龄测试结果表明,二长岩和二长花岗岩形成的精确年龄分别为 322.9±3.4Ma 和 320.3±3.5Ma,为海西期构造-岩浆活动产物。海沟岩体为准铝质-弱过铝质的 I 型花岗岩,其 K_2O/Na_2O 比值介于 0.51~0.93 之间,A/CNK 介于 0.87~0.94 之间。微量元素方面表现为轻稀土富集、轻重稀土分馏明显、弱铕正异常、大离子亲石元素(如 Rb、Ba、K)富集,以及高场强元素(如 Nb、Ta、Ti、P)相对亏损等。锶同位素初始比值为 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ = 0.7054~0.7059, $\varepsilon_{Nd}(t)$ = −10.4~−8.6,亏损地幔的钕模式年龄分别介于 1.84~1.99Ga 和 1.84~1.93Ga 之间。二长岩和二长花岗岩锆石的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 变化范围分别为 −7.6~−0.8 和 −11.5~−5.4,对应的两阶段 Hf 模式年龄分别为 1.39~1.81Ga 和 1.67~

* 本文受全国危机矿山接替资源辽吉黑有关地区多金属矿床成矿规律总结研究项目(20089931)资助.

第一作者简介: 张松,男,1981 年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业,E-mail: zhangsong1891@163.com

2.06Ga。同位素特征表明两者可能来自中元古代和古元古代的下地壳物质的部分熔融，并可能有较多地幔物质的加入。根据其形成时代、岩石地球化学、同位素特征以及区域地质演化史，认为海沟岩体的形成可能与古生代古亚洲洋消减作用密切相关。

关键词 海沟岩体；Sr-Nd-Hf 同位素；构造演化；华北克拉通北缘东段

中图法分类号 P588.121；P597.3

1 引言

华北克拉通北缘东段位于华北克拉通与佳木斯-兴凯地块之间，是古亚洲洋消失后华北克拉通与佳木斯-兴凯地块最后拼合的位置，其构造演化长期以来备受关注（Tang，1990；赵春荆等，1986；方文昌，1992；邵济安等，1994，1997；李锦轶，1998；吴福元等，1999，2001）。该区分布着大面积的显生宙花岗岩。早期研究认为这些花岗岩可以划分为从加里东期至燕山期的完整系列，并呈带状沿华北克拉通北缘由新到老对称分布（Zeng *et al.*，2001；吉林省地质矿产局，1988；方文昌，1992；周永昶等，1992），是华北克拉通和佳木斯-兴凯地块拼合的标志（邵济安等，1994，1997；赵春荆等，1996；张兴洲等，1999；彭玉鲸和赵成弼，2001）。近几年来，高精度锆石 U-Pb 年代学表明，该区并不存在以上所认为的古生代花岗岩（吴福元等，1999，2001）。尤其是在吉林中部大面积分布的具有代表性的黄泥岭岩体（黄泥河岩体）、棉田岩体及百里坪岩体的主体均为中生代形成（张艳斌等，2002a，b），而非传统上所认识的加里东期或海西期花岗岩。目前，在东北东部也只有佳木斯地块还存在较精确的年龄数据证明海西期花岗岩的存在（Wilde *et al.*，1997）。那么，在两个板块之间的华北北缘东段是否存在古生代形成的花岗岩呢？

为了探讨古亚洲洋在华北克拉通北缘东段的消亡过程及华北与西伯利亚两大板块的闭合历史，本文选择了位于华北克拉通北缘东段与兴-蒙造山带交汇部位的海沟岩体开展了系统的地质、地球化学和年代学工作。海沟岩体是海沟金矿的赋矿围岩，前人曾通过角闪石 K-Ar 法和全岩 Rb-Sr 等时线法获得 161.3Ma 和 181Ma 的成岩年龄（吉林省地质矿产局第五地质调查所，1990①），并认为海沟岩体形成于中生代。由于受到后期成矿作用的影响，海沟岩体发育大规模的蚀变，以上方法获得的年龄可能无法准确反映岩体的侵入时代。通过本次工作发现，过去通常认为形成于中生代的海沟岩体，其精确的单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 320Ma，形成时代为海西期。在吉林省中部大面积中生代花岗岩中出现的海西期花岗岩对探讨海沟金矿的成岩成矿关系及该区的构造演化具有特殊意义。

2 区域地质及岩体特征

海沟岩体位于华北克拉通北缘东段与兴-蒙造山带交汇部位，地处 NW 向夹皮沟-海沟成矿带的东南端（图 1）。矿区南部为龙岗高级区，北部为中生代黄泥河岩体。区内断裂构造发育，NE 向敦化-密山断裂为区内一级构造，是古郯庐断裂的北延部分（Zeng *et al.*，2001）；NW 向夹皮沟断裂、富尔河-古洞河断裂、清茶馆-白水滩（金银别-海沟）断裂、NE 向两江断裂带为二级构造。沿 NW 向构造带分布大面积的色洛河群构造杂岩。据最新研究表明，该杂岩体由新太古代变质火山-沉积地层、晚古生代变质火山-沉积岩、二叠纪片麻状杂岩体和侏罗纪糜棱岩化花岗岩组成（李承东等，2007）。

海沟岩体北部与黄泥岭岩体接触，南部与色洛河群杂岩接触。该岩体为岩株状产出，可分为二长岩和二长花岗岩两部分。平面上，两者呈同心圆状，二长花岗岩位于岩体的中部，二长岩分布于外侧；剖面上，两者呈桶状向北东方向侧伏。据地表和井下观察，二长岩与二长花岗岩呈渐变过渡关系，两者之间未见明显界线。岩体内发育的大量后期 NE 向乳白色石英大脉，构成海沟金矿的主要矿体。同时，整个矿区内发育大量中-基性脉岩，主要有闪长玢岩、次安山岩、辉绿玢岩、花岗闪长斑岩等。闪长玢岩常与矿体平行出现，其他三种脉岩常切割矿体。

二长岩呈肉红色，粗粒结构、二长结构、交代净边结构，交代残余结构，块状构造；主要矿物由钾长石（约 45% ~ 50%），斜长石（约 40% ~45%），角闪石（约 5% ~10%）组成，有时含少量黑云母、石英、磷灰石、榍石、锆石等副矿物（<5%）。矿区内二长岩多发生钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化蚀变，且距离矿体越近，蚀变强度越大。二长花岗岩呈肉红色，粗粒结构、花岗结构，块状构造；主要由钾长石（约 30% ~35%），斜长石（约 25% ~30%），石英（约 30% ~35%）组成，偶见少量角闪石、黑云母、磷灰石、榍石、锆石等（均 <5%）。矿区内二长花岗岩多发生钾化、硅化蚀变，尤其是硅化蚀变，越靠近矿体，蚀变强度越强，局部见少量黄铁绢英岩化。

3 样品采集与实验方法

本次分析测试的样品均采自海沟岩体，地表和井下均有分布。其中，二长岩（样号 13CM61）采自 13 中段 61 号穿脉坑道；二长花岗岩（样号 9-51）采自 9 中段 51 号穿脉坑道。采集样品时，尽量远离矿体，以保证样品新鲜。

在薄片镜下鉴定的基础上，选取新鲜未蚀变的样品，碎

① 吉林省地质矿产局第五地质调查所. 1990. 吉林省安图县海沟金矿床研究报告

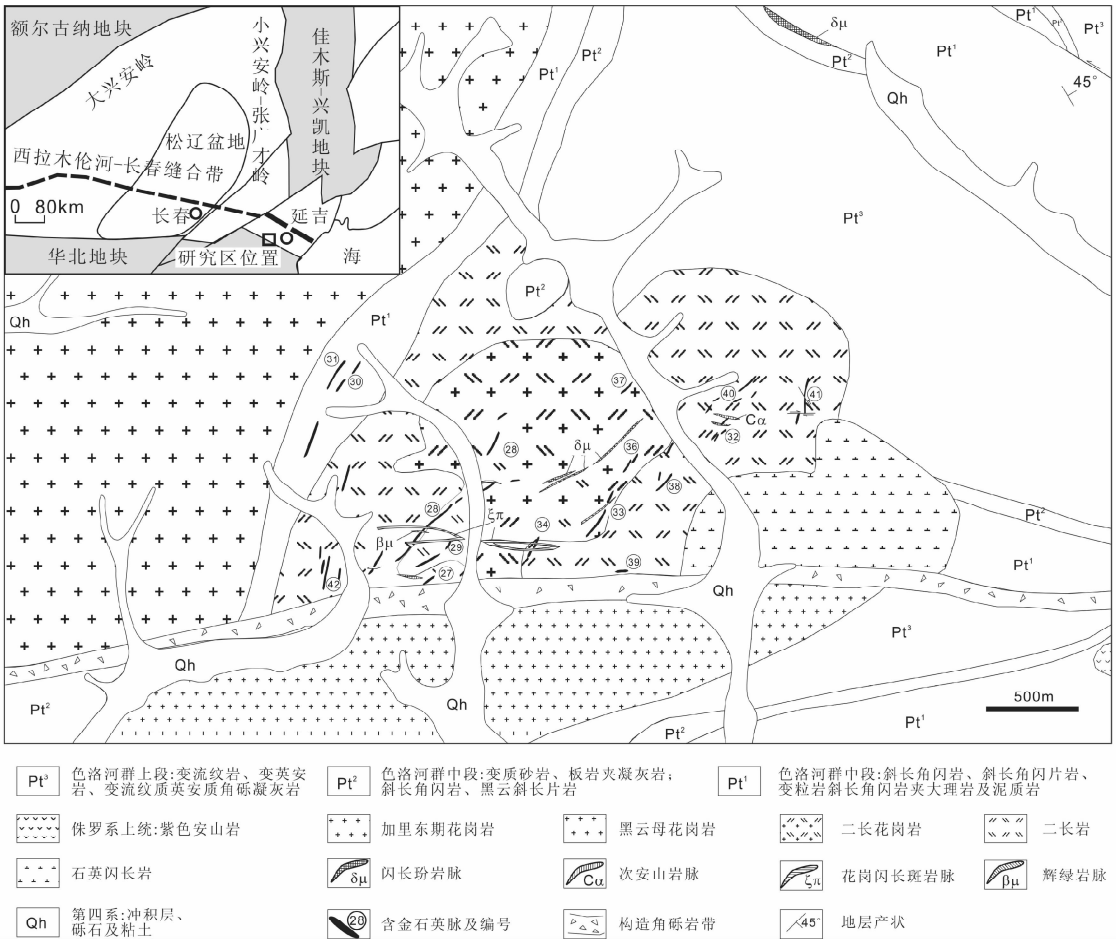


图 1 海沟岩体地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Haigou granitoids

至 200 目后进行岩石地球化学分析。主量和微量元素均在中国科学院地质与地球物理研究所实验室进行,主量元素采用 XRF 法分析,微量元素采用 ICP-MS 方法测定。具体分析流程及分析参数参见刘红涛等(2002a)。Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成,详细的分析流程可见 Chen *et al.* (2000,2002)。Nd 模式年龄采用 Isoplot 程序计算(Ludwig, 2001),采用 2σ 误差。锆石挑选由河北省地勘局廊坊实验室完成。锆石样品阴极发光(CL)照相是在中国科学院地质与地球物理研究所电子探针实验室 CAMECA SX51 电子探针下完成。锆石样品 U-Pb 同位素是在 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)上测试完成。实验中采用 Geolas 139nm ArF 准分子激光剥蚀取样系统,剥蚀时间 26S,待测样剥蚀束斑直径 50μm,标准样品剥蚀束斑直径 70μm,剥蚀出的气熔胶通过载气 He 载入 MC-ICP-MS 进行同位素比值测定(Wu *et al.*,2006)。锆石年龄采用国际标准锆石 91500(年龄为 1064.2Ma)外部校正法进行校正,普通铅校正采用 Andersen(2002)的方法。实验过程中标准样品 91500 点、待分析样品点按照 2∶7 进行。锆石数据处理采用 Galiter 软件程序完成,年龄采用 ISOPLOT3.0 程序计算。锆石 Hf 同位素是在中国科学院地质与地球物理研究所进行的,采用 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 Geolas 193nm 准分子激光取样系统(LA-MC-ICMP-MS),分析原理和流程见 Wu *et al.* (2006)。激光频率为 8Hz,能量密度为 100mJ/cm^2,分析束斑直径为 70μm,信号采集时间为 26s。同时采用锆石 91500 的^{176}Hf/^{177}Hf 为标准,分析结果与目前用溶液法获得的值在误差范围内一致(Woodhead *et al.*,2004)。

4 实验结果

4.1 主微量元素

采自海沟岩体的 7 个样品的全岩主量元素、微量元素分析结果分别参见表 1。海沟岩体中二长岩的 SiO_2 含量变化范围为 60.54% ~62.86%。铝含量高,变化范围为 17.19% ~18.62%。TiO_2 含量偏低,变化范围为 0.36% ~0.46%。全碱含量高,K_2O+Na_2O 含量变化范围为 9.86% ~11.04%,K_2O/Na_2O 变化范围为 0.66 ~0.88。二长花岗岩的 SiO_2 含量变化范围为 67.61% ~70.37%。Al_2O_3 含量高,变化范围

表 1 海沟岩体岩石化学主量元素组成(wt%)和微量元素组成($\times 10^{-6}$)

Table 1 Major (wt%) and trace elements data ($\times 10^{-6}$) of Haigou granitoids

样品号	B1	B3	11-41-7	12-53CM-2	8-37	5-53-7	9-45-9
样品名	二长岩				二长花岗岩		
SiO_2	61.77	62.86	60.54	60.95	67.61	70.37	70.06
TiO_2	0.36	0.38	0.46	0.43	0.23	0.18	0.17
Al_2O_3	18.61	17.19	18.62	18.46	16.47	15.91	15.91
$Fe_2O_3^T$	2.37	3.24	3.59	3.24	1.50	0.99	1.06
MnO	0.06	0.07	0.09	0.09	0.05	0.04	0.03
MgO	0.56	0.87	1.06	0.89	0.36	0.21	0.23
CaO	2.53	2.35	3.03	2.54	1.68	1.63	1.39
Na_2O	6.30	5.33	6.27	5.88	5.33	6.17	5.65
K_2O	4.13	4.53	4.35	5.16	4.98	3.15	3.94
P_2O_5	0.21	0.19	0.20	0.13	0.06	0.05	0.05
LOI	2.10	2.04	0.98	1.04	1.40	1.24	1.22
Total	99.00	99.05	99.19	98.81	99.67	99.94	99.71
FeO	0.94	1.40	1.50	1.32	0.72	0.54	0.45
Fe_2O_3	1.43	1.84	2.09	1.92	0.78	0.45	0.61
ALK	10.43	9.86	10.62	11.04	10.31	9.32	9.59
K/Na	0.66	0.85	0.69	0.88	0.93	0.51	0.70
A/NK	1.18	1.18	1.17	1.14	1.10	1.10	1.10
A/CNK	0.91	0.91	0.87	0.89	0.91	0.91	0.94
σ	5.80	4.90	6.43	6.79	4.32	3.17	3.40
Li	14.60	11.50	6.97	5.97	9.00	6.64	5.61
Be	1.51	2.17	1.06	1.28	1.04	1.53	1.44
Sc	2.40	3.80	5.32	3.59	1.33	1.02	1.02
V	43.7	54.3	71.8	66.5	21.9	16.7	18.7
Cr	5.74	10.70	15.70	6.78	4.23	6.05	6.41
Co	3.47	5.79	6.69	5.41	2.42	0.69	0.80
Ni	5.87	6.51	8.49	4.64	2.67	2.40	1.86
Cu	4.45	11.20	7.32	3.27	2.17	2.85	2.52
Zn	36.5	51.5	63.1	53.9	24.1	7.0	18.2
Ga	19.5	19.5	21.2	21.0	18.0	18.7	18.7
Rb	90.8	80.5	81.2	86.2	123	82.6	88.2
Sr	2090	1339	2031	2288	985	1042	879
Y	18.20	15.20	21.20	24.50	12.30	9.45	8.40
Nb	21.8	22.9	23.8	30.9	20.9	25.8	25.1
Mo	0.23	0.27	0.52	0.18	0.05	0.46	0.08
Cd	0.04	0.04	0.10	0.05	0.03	0.03	0.04
In	0.02	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.01

样品号	B1	B3	11-41-7	12-53CM-2	8-37	5-53-7	9-45-9
样品名	二长岩				二长花岗岩		
Sb	0.22	0.26	0.83	0.81	0.13	0.19	0.19
Cs	2.57	2.76	2.10	2.02	2.23	1.24	1.78
Ba	3998	3924	4457	5711	3152	1670	1706
Ta	1.75	1.68	1.86	2.37	1.75	1.80	1.81
W	0.56	0.38	0.27	0.19	0.11	0.52	0.75
Re	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.002	0.000
Tl	0.78	1.04	0.67	0.88	1.04	0.70	0.80
Pb	50.5	66.8	50.8	54.2	50.4	56.3	30.7
Bi	0.26	0.30	0.14	0.16	0.16	0.19	0.14
Th	7.10	10.80	8.40	8.25	19.40	18.10	8.05
U	1.10	2.80	2.29	1.99	11.30	6.28	4.33
Zr	114	158	258	153	262	351	335
Hf	2.37	3.73	4.73	2.95	5.42	7.53	6.79
La	56.1	45.7	70.2	60.8	41.1	21.6	23.8
Ce	95.3	83.5	108	108	62.1	35.0	34.7
Pr	10.40	6.89	11.80	11.10	5.61	3.23	3.14
Nd	37.7	25.4	43.0	42.7	20.0	11.5	11.2
Sm	5.48	3.96	6.20	6.54	2.58	1.57	1.66
Eu	2.03	1.40	2.16	2.31	1.02	0.64	0.60
Gd	4.76	3.46	5.19	5.53	2.23	1.53	1.44
Tb	0.69	0.51	0.75	0.84	0.34	0.23	0.21
Dy	3.38	2.46	3.85	4.19	1.87	1.30	1.25
Ho	0.60	0.47	0.68	0.76	0.38	0.27	0.24
Er	1.83	1.57	2.10	2.32	1.20	0.90	0.85
Tm	0.30	0.25	0.35	0.40	0.20	0.17	0.17
Yb	1.71	1.63	2.28	2.46	1.41	1.21	1.17
Lu	0.24	0.25	0.30	0.35	0.23	0.19	0.20
ΣREE	220.5	177.5	256.9	248.3	140.3	79.34	80.63
LREE	61.06	41.62	69.10	69.02	31.78	18.70	18.25
HREE	289.6	225.7	335.5	327.8	177.3	102.1	102.8
LREE/HREE	15.3	15.7	15.6	13.7	16.9	12.7	13.6
$(La/Yb)_N$	40.0	34.2	37.6	30.2	35.6	21.8	24.8
δEu	1.21	1.15	1.16	1.17	1.30	1.26	1.18
δCe	0.96	1.14	0.91	1.01	0.99	1.01	0.97

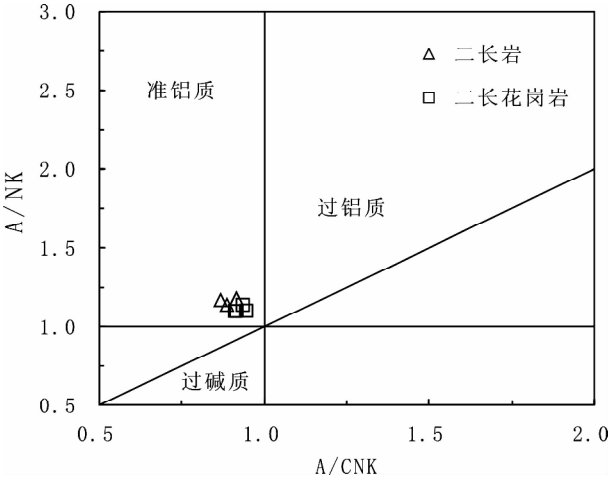


图 2 海沟岩体岩石 A/NK-A/CNK 图解

Fig. 2 Plot of A/NK-A/CNK for Haigou granitoids

为 15.91% ~ 16.47%。TiO_2 含量偏低，变化范围为 0.17% ~ 0.23%。全碱含量高，$K_2O + Na_2O$ 含量变化范围为 9.32% ~ 10.31%，K_2O/Na_2O 变化范围为 0.51 ~ 0.93。从铝饱和指数来看，二长岩、二长花岗岩的 A/CNK 值均小于 1，介于 0.87 ~ 0.94 之间；A/NK 值大于 1，介于 1.10 ~ 1.18 之间，在 A/NK-A/CNK 图解上，两种岩石均落在准铝质区域，为准铝质系列(图 2)。

海沟岩体稀土元素分析结果表明，二长岩和二长花岗岩的球粒陨石标准化配分曲线均为轻稀土富集型(图 3)。两者具有较一致的稀土配分曲线，其稀土元素总量 ΣREE 在 79.34×10^{-6} ~ 256.9×10^{-6} 之间，二长岩的稀土总量明显高于二长花岗岩的稀土总量。LREE/HREE 比值介于 12.7 ~ 15.7 之间，$(La/Yb)_N$ 介于 21.8 ~ 40.0 之间，轻重稀土分馏明显，可能是海沟岩体中含有较多的角闪石和榍石所致。δEu 介于 1.15 ~ 1.30 之间，具有微弱的铕正异常。微量元素

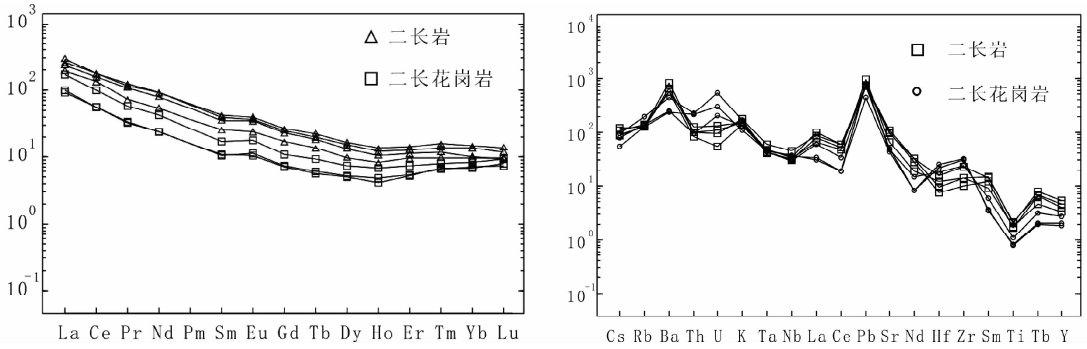


图 3 海沟岩体的稀土和微量元素组成(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 3 REE and trace compositions of Haigou granitoids(chondrite-normalize and primitive mantle-normalized values after Sun and McDonough, 1989)

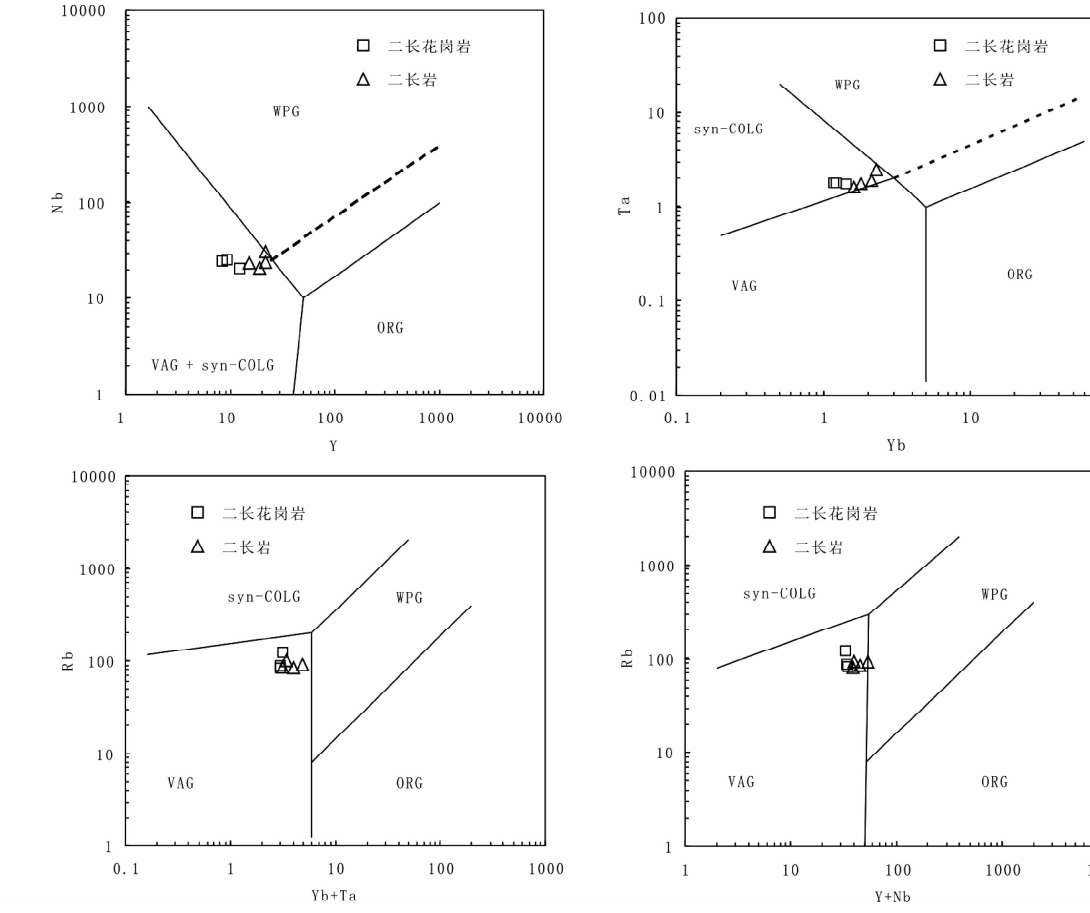


图 4 海沟岩体构造环境判别图(底图据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 4 Tectonic diagrams of Haigou granitoids (after Pearce *et al.*, 1984)

分析结果表明,海沟岩体表现出明显的 Pb 的正异常,并具有不同程度的 Ti 亏损。在原始地幔标准化微量元素配分曲线上,二长岩、二长花岗岩总体特征一致:富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K,二长花岗岩相对二长岩更富集高场强元素 U、Th,相对亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P(图 3)。

在海沟岩体的微量元素构造环境判别图解上(图 4),除在 Yb-Ta 图解上二长岩和二长花岗岩落在同碰撞和火山弧交界区域上无法区分外,在 Y-Nb、Yb + Ta-Rb 及 Y + Nb-Rb 图解上均落在火山弧区域。结合其微量元素地球化学特征认为,海沟岩体可能形成于陆缘弧环境。

4.2 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素

海沟金矿二长岩和二长花岗岩的 Rb、Sr 含量变化较大,

表 2 海沟岩体的 Sr-Nd 同位素组成

Table 2 Analytical data of Sr-Nd isotopic compositions of Haigou granitoids

样品号	Rb ($\times10^{-6}$)	Sr ($\times10^{-6}$)	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$ ($\pm2\sigma$)	$^{87}Sr/^{86}Sr(t)$	Sm ($\times10^{-6}$)	Nd ($\times10^{-6}$)	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$ (2σ)	$^{143}Nd/^{144}Nd(t)$	$\varepsilon_{Nd}(t)$	t_{DM} (Ga)
二长岩												
B1	77	1927	0.1156	0.706187 ±13	0.705656	5.4	35.5	0.0914	0.511974 ±6	0.511781	-8.62	1.84
B3	98.2	1304	0.2180	0.706839 ±11	0.705837	4.1	27.7	0.0896	0.511878 ±6	0.511689	-10.42	1.99
11-41-7	69.2	1892	0.1059	0.706200 ±11	0.705713	5.5	36.8	0.0907	0.511934 ±7	0.511742	-9.37	1.90
12-53CM-2	78.4	2075	0.1093	0.706243 ±11	0.705741	6.0	39.0	0.0930	0.511967 ±7	0.511770	-8.82	1.85
二长花岗岩												
8-37	105	923	0.3307	0.706920 ±12	0.705412	2.5	17.6	0.0854	0.511911 ±5	0.511732	-9.64	1.93
5-53-7	72.9	947	0.2227	0.706939 ±11	0.705924	1.7	10.7	0.0937	0.511975 ±10	0.511779	-8.73	1.84
9-45-9	103	896	0.3313	0.707439 ±11	0.705929	1.8	11.9	0.0888	0.511961 ±9	0.511775	-8.80	1.86

Rb = 73 × 10^{-6} ~ 105 × 10^{-6}, Sr = 896 × 10^{-6} ~ 2075 × 10^{-6}, $^{87}Rb/^{86}Sr$ = 0.1059 ~ 0.3313, 但是 Rb 同位素组成相对均一, $^{87}Sr/^{86}Sr$ = 0.70619 ~ 0.70744。锶同位素(320 ~ 323Ma)初始比值为($^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ = 0.7054 ~ 0.7059。二长岩和二长花岗岩中 Sm 和 Nd 的含量变化较大, Sm = 1.7 × 10^{-6} ~ 6.0 × 10^{-6}, Nd = 10.7 × 10^{-6} ~ 39.0 × 10^{-6}, 但 Nd 同位素组成相对均一, $^{143}Nd/^{144}Nd$ = 0.511878 ~ 0.511975。成岩时(320 ~ 323Ma) Nd 同位素的初始比值($^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ = 0.511689 ~ 0.511781, $\varepsilon_{Nd}(t)$ = -10.4 ~ -8.6, 其中二长花岗岩的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值要略高(表 2)。二长岩和二长花岗岩两阶段 Nd 的亏损地幔模式年龄分别介于 1.84 ~ 1.99Ga 和 1.84 ~ 1.93Ga 之间。

4.3 锆石 U-Pb 年龄

二长岩(样号 13CM61)的锆石粒度在 100 ~ 200μm 之间, 大多数锆石具有较好的晶形和明显的岩浆结晶环带(图 5)。锆石的 Th/U 比介于 0.50 ~ 0.70 之间(表 3), 均大于 0.1, 为岩浆成因锆石(Corfu *et al.*, 2003; Bowring and Schmitz, 2003; 宋彪等, 2002)。锆石分析结果表明, 锆石颗粒年龄范围在 316 ± 8Ma ~ 331 ± 8Ma。21 个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 和 $^{207}Pb/^{235}U$ 在测定误差范围内一致。在一致曲线图中, 数据点成群分布于一致曲线上或其附近, $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 322.9 ± 3.4Ma, MSWD = 0.2(图 6), 该年龄反映岩体的结晶时间或岩体的成岩时间。

二长花岗岩(样号 9-51), 锆石粒度在 100 ~ 200μm 之间。镜下和阴极发光特征表明, 该组锆石具有较好的晶形和明显的岩浆结晶环带, 锆石的 Th/U 比值范围为 0.25 ~ 0.83 之间(表 3), 均大于 0.1, 为岩浆成因锆石(图 5)。分析结果表明, 19 颗锆石年龄范围在 313 ± 7Ma ~ 335 ± 10Ma。19 个分析点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 和 $^{207}Pb/^{235}U$ 在测定误差范围内一致。在一致曲线图中, 数据点成群分布于一致曲线上或其附近, $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 320.3 ± 3.5Ma, MSWD = 0.29, 该年龄反映二长花岗岩结晶时间或岩体的成岩时间。此外, 该组锆石中出现两粒大于 24 亿年的锆石, 两个点的单点年龄为分别为 2471Ma 和 2497Ma, $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 2484 ± 61Ma, MSWD = 0.17。虽然该组锆石没有明显的溶蚀现象, 但其年龄和二长花岗岩的中岩浆锆石的年龄相差巨大。因此认为这两颗锆石为捕获锆石, 可能为岩浆上升过程中自华北克拉通北缘晚太古代末-早元古代初的结晶基底中捕获而来。

4.4 锆石 Hf 同位素

组成海沟岩体的二长岩、二长花岗岩的锆石 Hf 同位素分析结果表 4 和图 7 所示。二长岩 21 颗岩浆锆石的 Hf 同位素分析结果表明, 初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 变化范围为 0.282369 ~ 0.282556。初始 ε_{Hf} 值全为负值, 变化范围为 -7.6 ~ -0.8, 两阶段 Hf 模式年龄值 t_{DM2} 在 1.39 ~ 1.81Ga 之间。二长花岗岩锆石分为两组, 其中 19 颗岩浆锆石, 2 颗继承锆石。19 颗

表 3 海沟岩体的 U-Pb 同位素组成

Table 3 Analytical data of zircon U-Pb isotopic compositions of Haigou granitoids

测点号	Pb*	Th	U	Th/U	原子比值						年龄(Ma)		
	($\times 10^{-6}$)				$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	1σ	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	1σ	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$
9-51(二长花岗岩)													
1	40.20	357.99	718.68	0.50	0.05292	0.00206	0.36249	0.01303	0.04969	0.00121	325	314	313
2	39.61	398.85	690.29	0.58	0.05277	0.00306	0.36477	0.01944	0.05014	0.00154	319	316	315
3	28.76	239.27	506.78	0.47	0.05308	0.00301	0.39069	0.02034	0.05338	0.00163	332	335	335
4	30.85	257.41	512.40	0.50	0.05279	0.00124	0.37167	0.00825	0.05106	0.00105	320	321	321
5	57.04	505.39	981.06	0.52	0.05288	0.00330	0.37369	0.02141	0.05125	0.00167	324	322	322
6	260.03	358.56	430.78	0.83	0.05266	0.00187	0.37026	0.01219	0.05098	0.00121	314	320	321
7	36.63	271.22	646.69	0.42	0.05241	0.00188	0.36494	0.01211	0.05049	0.00121	303	316	318
8	22.37	232.33	380.85	0.61	0.17109	0.00249	11.16072	0.15831	0.47315	0.01003	2568	2537	2497
9	47.31	336.38	862.17	0.39	0.16235	0.00259	10.45648	0.16254	0.46711	0.00997	2480	2476	2471
10	30.80	252.75	548.03	0.46	0.05239	0.00195	0.36699	0.01262	0.05079	0.00123	302	317	319
11	80.73	425.24	1492.15	0.28	0.05227	0.00102	0.36803	0.00684	0.05105	0.00102	297	318	321
12	36.54	311.07	642.09	0.48	0.05307	0.00141	0.37281	0.00921	0.05093	0.00109	332	322	320
13	106.39	580.87	1980.05	0.29	0.05261	0.00151	0.36870	0.00980	0.05082	0.00112	312	319	320
14	40.98	281.69	747.47	0.38	0.05256	0.00143	0.36676	0.00931	0.05059	0.00110	310	317	318
15	35.20	343.90	608.18	0.57	0.05244	0.00485	0.37264	0.03140	0.05153	0.00231	305	322	324
16	67.85	315.30	1260.80	0.25	0.05171	0.00151	0.36783	0.00994	0.05159	0.00115	273	318	324
17	60.16	346.90	1090.76	0.32	0.05093	0.00304	0.36793	0.02010	0.05240	0.00167	238	318	329
18	33.56	227.87	607.75	0.37	0.05229	0.00210	0.36809	0.01358	0.05106	0.00130	298	318	321
19	37.63	272.50	698.08	0.39	0.05296	0.00323	0.36532	0.02033	0.05003	0.00164	327	316	315
20	307.14	226.33	544.13	0.42	0.05308	0.00302	0.37198	0.01926	0.05084	0.00159	332	321	320
21	52.27	337.41	956.93	0.35	0.05396	0.00210	0.37844	0.01364	0.05088	0.00125	369	326	320
13CM61(二长岩)													
1	25.89	226.42	451.05	0.50	0.05298	0.00256	0.37453	0.01668	0.05127	0.00141	328	323	322
2	41.75	373.10	724.99	0.51	0.05324	0.00138	0.37475	0.00909	0.05104	0.00108	339	323	321
3	29.00	272.97	498.33	0.55	0.05295	0.00161	0.37420	0.01057	0.05125	0.00115	327	323	322
4	40.22	409.09	679.04	0.60	0.05301	0.00159	0.37686	0.01052	0.05156	0.00114	329	325	324
5	34.44	356.23	582.49	0.61	0.05312	0.00172	0.37580	0.01130	0.05131	0.00117	334	324	323
6	30.59	389.83	490.75	0.79	0.05319	0.00245	0.37461	0.01587	0.05108	0.00138	337	323	321
7	39.18	400.00	644.44	0.62	0.05167	0.00191	0.37538	0.01279	0.05269	0.00127	271	324	331
8	46.23	533.85	761.77	0.70	0.05311	0.00191	0.37701	0.01251	0.05148	0.00123	333	325	324
9	31.04	308.95	531.41	0.58	0.05308	0.00192	0.37368	0.01251	0.05106	0.00122	332	322	321
10	32.38	305.60	548.54	0.56	0.05213	0.00410	0.37458	0.02701	0.05211	0.00202	291	323	327
11	44.15	423.40	746.40	0.57	0.05268	0.00176	0.37543	0.01160	0.05169	0.00120	315	324	325
12	29.92	290.66	499.03	0.58	0.05261	0.00204	0.37784	0.01352	0.05209	0.00128	312	325	327
13	43.30	381.46	751.75	0.51	0.05333	0.00153	0.37427	0.00999	0.05090	0.00112	343	323	320
14	24.33	228.65	420.13	0.54	0.05263	0.00374	0.37067	0.02412	0.05107	0.00183	313	320	321
15	54.20	604.79	902.72	0.67	0.05300	0.00157	0.37513	0.01033	0.05133	0.00114	329	323	323
16	28.73	243.48	491.37	0.50	0.05239	0.00199	0.37677	0.01324	0.05215	0.00127	302	325	328
17	37.35	379.68	652.27	0.58	0.05300	0.00217	0.36741	0.01384	0.05027	0.00128	329	318	316
18	28.40	270.50	497.14	0.54	0.05294	0.00214	0.36732	0.01369	0.05032	0.00127	326	318	316
19	31.79	353.45	536.39	0.66	0.05314	0.00233	0.37694	0.01519	0.05145	0.00135	335	325	323
20	46.91	467.49	788.60	0.59	0.05276	0.00250	0.37676	0.01636	0.05179	0.00142	318	325	326
21	36.60	412.54	610.26	0.68	0.05279	0.00260	0.37469	0.01695	0.05147	0.00144	320	323	324

表 4 海沟岩体锆石 Hf 同位素组成

Table 4 Analytical data of zircon Hf isotopic compositions of Haigou granitoids

测点号	年龄(Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$2\sigma_m$	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	2σ	t_{DM1}	t_{DM2}	$f_{Lu/Hf}$
9-51(二长花岗岩)											
1	313	0.037405	0.001729	0.282347	0.000027	-15.1	-8.6	0.9	1308	1872	-0.95
2	315	0.038436	0.001741	0.282352	0.000023	-14.9	-8.4	0.8	1300	1858	-0.95
3	335	0.044870	0.001921	0.282285	0.000024	-17.3	-10.4	0.8	1402	1999	-0.94
4	321	0.039733	0.001826	0.282335	0.000022	-15.5	-8.9	0.8	1328	1895	-0.94
5	322	0.039541	0.001769	0.282277	0.000023	-17.6	-10.9	0.8	1409	2024	-0.95
6	321	0.038865	0.001664	0.282340	0.000024	-15.4	-8.7	0.8	1315	1882	-0.95
7	318	0.042436	0.001906	0.282338	0.000024	-15.4	-8.8	0.9	1326	1891	-0.94
8	2497	0.034191	0.001231	0.280905	0.000027	-66.1	-12.3	0.9	3283	3746	-0.96
9	2471	0.014428	0.000575	0.281176	0.000022	-56.5	-2.1	0.8	2865	3108	-0.98
10	319	0.041783	0.001772	0.282297	0.000023	-16.9	-10.2	0.8	1380	1980	-0.95
11	321	0.045013	0.002080	0.282270	0.000022	-17.8	-11.2	0.8	1431	2043	-0.94
12	320	0.047090	0.001973	0.282263	0.000019	-18.1	-11.5	0.7	1436	2057	-0.94
13	320	0.049682	0.002250	0.282382	0.000024	-13.9	-7.3	0.8	1275	1796	-0.93
14	318	0.035873	0.001646	0.282290	0.000021	-17.1	-10.5	0.7	1385	1994	-0.95
15	324	0.034294	0.001467	0.282312	0.000021	-16.4	-9.6	0.7	1348	1940	-0.96
16	324	0.031076	0.001467	0.282340	0.000020	-15.4	-8.6	0.7	1309	1878	-0.96
17	329	0.041710	0.001964	0.282355	0.000023	-14.8	-8.0	0.8	1304	1848	-0.94
18	321	0.038646	0.001648	0.282332	0.000020	-15.6	-8.9	0.7	1325	1898	-0.95
19	315	0.041273	0.001748	0.282318	0.000019	-16.1	-9.6	0.7	1349	1935	-0.95
20	320	0.034713	0.001555	0.282303	0.000020	-16.7	-10.0	0.7	1363	1963	-0.95
21	320	0.046383	0.002032	0.282436	0.000021	-12.0	-5.4	0.7	1190	1672	-0.94
13CM61(二长岩)											
1	322	0.039274	0.001730	0.282414	0.000027	-12.7	-6.0	1.0	1212	1717	-0.95
2	321	0.040291	0.001841	0.282443	0.000025	-11.7	-5.0	0.9	1173	1652	-0.94
3	322	0.035505	0.001547	0.282412	0.000027	-12.8	-6.1	0.9	1209	1719	-0.95
4	324	0.048659	0.002175	0.282394	0.000027	-13.4	-6.8	1.0	1255	1766	-0.93
5	323	0.037308	0.001681	0.282472	0.000027	-10.7	-3.9	0.9	1127	1584	-0.95
6	321	0.036730	0.001580	0.282369	0.000027	-14.3	-7.6	1.0	1271	1816	-0.95
7	331	0.047011	0.002162	0.282528	0.000029	-8.7	-1.9	1.0	1061	1461	-0.93
8	324	0.041542	0.001825	0.282511	0.000026	-9.3	-2.6	0.9	1075	1498	-0.95
9	321	0.040867	0.001795	0.282407	0.000027	-13.0	-6.3	1.0	1223	1732	-0.95
10	327	0.035348	0.001594	0.282474	0.000024	-10.6	-3.8	0.8	1122	1577	-0.95
11	325	0.040111	0.001881	0.282399	0.000025	-13.3	-6.6	0.9	1239	1751	-0.94
12	327	0.036655	0.001624	0.282450	0.000026	-11.5	-4.6	0.9	1157	1631	-0.95
13	320	0.035450	0.001619	0.282448	0.000025	-11.5	-4.9	0.9	1160	1640	-0.95
14	321	0.039242	0.001739	0.282375	0.000026	-14.1	-7.4	0.9	1268	1805	-0.95
15	323	0.035558	0.001626	0.282489	0.000025	-10.1	-3.3	0.9	1102	1547	-0.95
16	328	0.029235	0.001346	0.282556	0.000030	-7.7	-0.8	1.1	998	1388	-0.96
17	316	0.036272	0.001660	0.282418	0.000024	-12.6	-6.0	0.9	1203	1709	-0.95
18	316	0.037378	0.001680	0.282454	0.000027	-11.3	-4.7	1.0	1153	1630	-0.95
19	323	0.043070	0.001885	0.282419	0.000021	-12.5	-5.9	0.8	1209	1705	-0.94
20	326	0.035478	0.001610	0.282395	0.000023	-13.4	-6.6	0.8	1234	1754	-0.95
21	324	0.041609	0.001868	0.282425	0.000024	-12.4	-5.6	0.9	1201	1693	-0.94

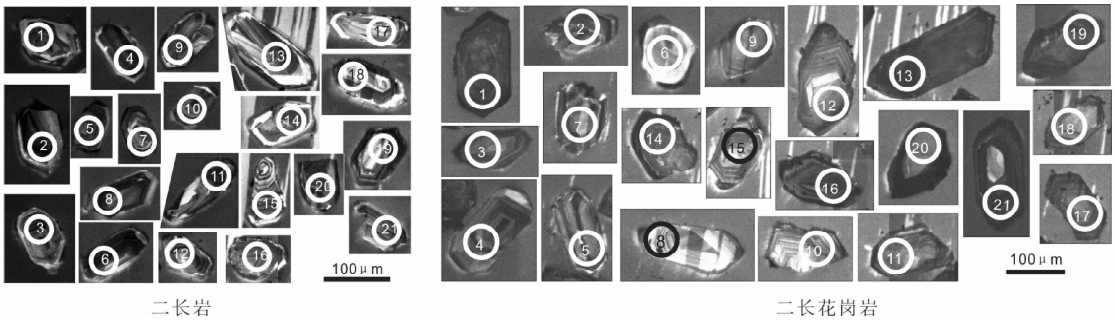


图 5 海沟岩体锆石 CL 图像

Fig. 5 CL images of zircons from Haigou granitoids

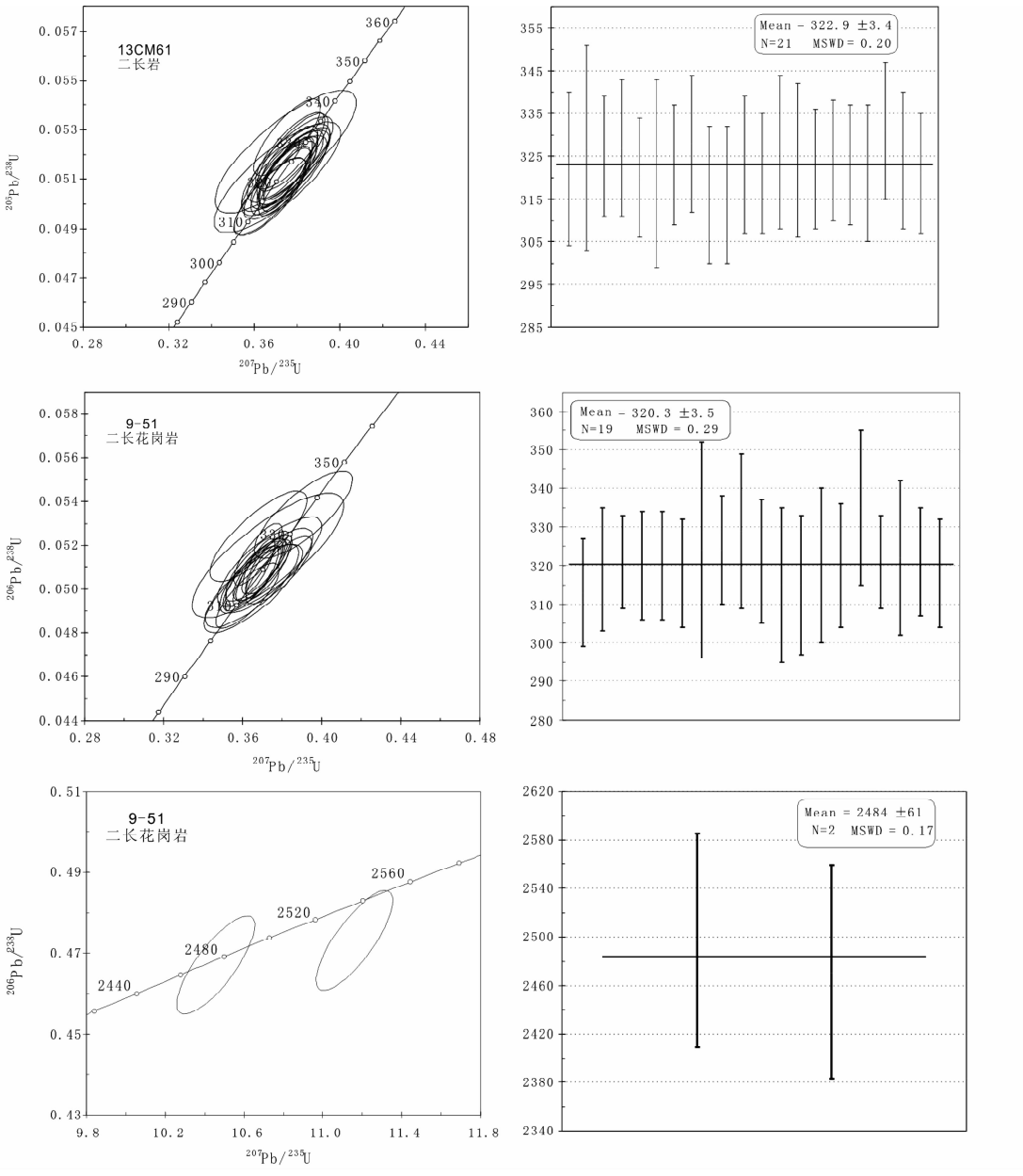


图 6 海沟岩体的锆石 U-Pb 年龄

Fig. 6 Zircons U-Pb ages of Haigou granitoids

岩浆锆石的 Hf 同位素初始$^{176}Hf/^{177}Hf$变化范围为 0.282263 ~ 0.282436。初始 ε_{Hf}值为负值,变化范围为 -11.5 ~ -5.4,两阶段 Hf 模式年龄值 t_{DM2}在 1.67 ~ 2.06Ga 之间。另外 2 颗继承锆石的初始$^{176}Hf/^{177}Hf$分别为 0.280905 和 0.281176。对应的初始 ε_{Hf}值变化较大,分别为 -12.3 和 -2.1,两阶段 Hf 模式年龄值 t_{DM2}在分别为 3.74Ga 和 3.10Ga。

5 讨论

5.1 岩浆源区

海沟金矿二长岩、二长花岗岩的 Sr 同位素(320 ~ 323Ma)初始值为$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ = 0.7054 ~ 0.7059,可能代表了成岩时存在地壳和地幔物质的双重贡献。而海沟岩体中二长岩较二长花岗岩具有更高的 Sr 含量和更低的 Rb/Sr 比值,说明岩体形成过程中,二长岩具有更多地幔物质的贡献。海沟岩体 7 个样品的 ε_{Nd}均为负值,且相对集中,介于 -10.4 ~ -8.6 之间,两阶段 Nd 模式年龄介于 1.84 ~ 1.99Ga 之间,表明古元古代的地壳物质对岩浆源区的贡献显著。在东北地区东部出露大范围的花岗岩,其中以中生代花岗岩占绝大多数。前人研究表明,这些花岗岩的形成主要与古亚洲洋闭合后的伸展体制(吴福元等,1999;刘红涛等,2002b)及中国东部的伸展构造有关(方文昌,1992;裴福萍,2008)。而海沟

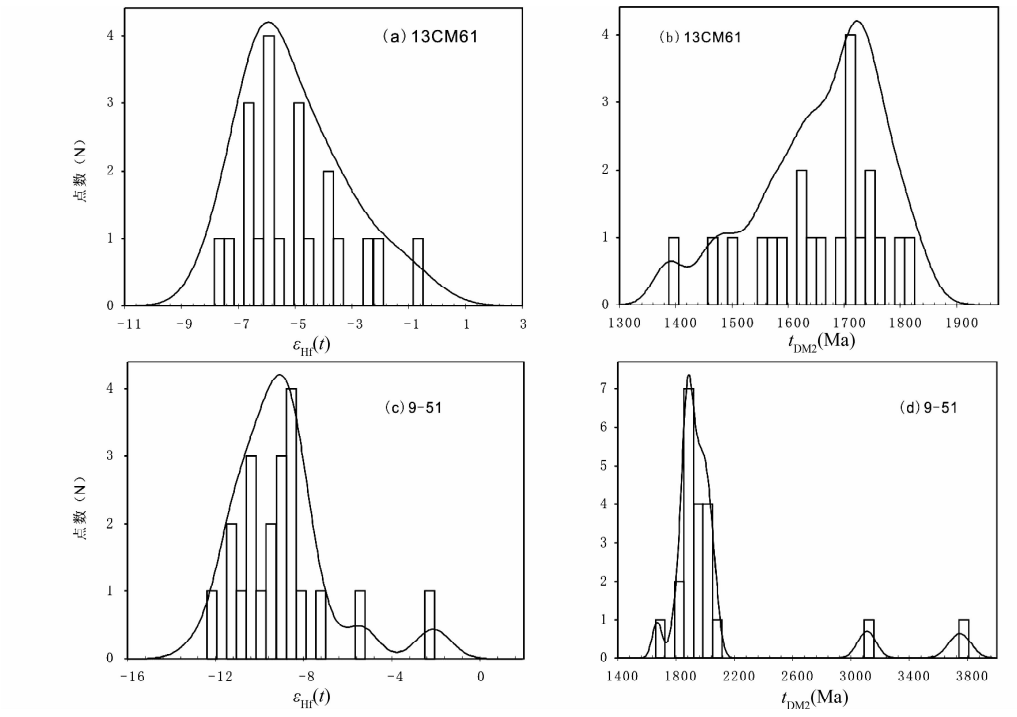


图 7　海沟岩体的锆石 Hf 同位素组成

Fig. 7　Zircons Hf isotopic compositions of Haigou granitoids

岩体的锶-钕同位素样品点相对集中，在 $\varepsilon_{Nd}(t)$-$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解上（图 8），均落在东北中生代花岗岩范围的下方，表明其成因与东北中生代花岗岩存在明显差异。

锆石中通常含有较高的 Hf，较低的 Lu，从而导致其 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 具有非常低的比值。由于锆石形成后缺少放射性成因 Hf 的存在，使得 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值基本代表了其形成时体系的 Hf 同位素组成（Kinny and Mass，2003；吴福元等，2007）。同时，锆石具有较高的 Lu-Hf 同位素体系封闭温度，Lu-Hf 同位素体系相对于 U-Pb 同位素更难被后期流体或热事件改造（Amelin *et al.*，1999，2000），且 Hf 同位素体系的扩散系数较 U 和 Pb 的扩散系数相对较低（Cherniak and Watson，2003）。当原始地幔分异成地壳和亏损地幔时，地壳的 Lu/Hf 值明显较地幔偏低，且在以后的演化过程中，地壳物质的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值增长缓慢，使得地壳中 ε_{Hf} 的值越来越负，而亏损地幔中的 ε_{Hf} 值越来越高。因此，花岗岩中锆石的 Hf 同位素组成可以反映花岗岩形成时的物源特征。

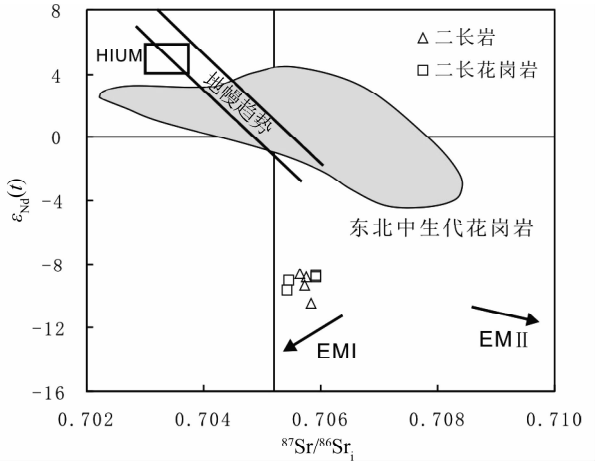


图 8　海沟岩体 Sr-Nd 同位素组成

东北中生代花岗岩据 Wu *et al.*，2000

Fig. 8　The Sr and Nd isotopic compositions of Haigou granitoids

The range of granites in northeastern China from Wu *et al.*，2000

海沟金矿海西期的二长岩、二长花岗岩的 ε_{Hf} 均为负值，ε_{Hf} 范围分别为 -7.6 ~ -0.8 和 -11.5 ~ -5.4。根据两阶段 Hf 同位素模式年龄计算，二长岩和二长花岗岩的 t_{DM2} 分别集中在 1.4 ~ 1.8Ga 和 1.7 ~ 2.1Ga 之间，且两者之间连续过渡（图 9）。表明其海沟岩体的源区主要为中元古代和古元古代的地壳物质，并可能有较多地幔物质的加入。具有相同结晶年龄的锆石颗粒，其 ε_{Hf} 的分布范围相对较宽，且二长岩的 ε_{Hf} 值明显高于二长花岗岩的 ε_{Hf} 值，这可能是由于岩浆源区地壳物质或壳幔物质不同比例熔融所造成的。在成岩过程中，地幔或新生地壳物质对二长岩的贡献要更大，而这正是其具有较低 Rb/Sr 比的原因之一。

二长岩和二长花岗岩可能分别来自中元古代和古元古代地壳物质，这与 Nd 同位素分析结果一致。两粒古元古代捕获锆石的 t_{DM2} 分别为 3.1Ga 和 3.7Ga。前人研究表明（Liu *et al.*，1992；吴福元等，1997，2005），华北地台地壳形成的一个重要时期为 3.1 ~ 3.6Ga，且存在大于 3.8Ga 年龄信息。而

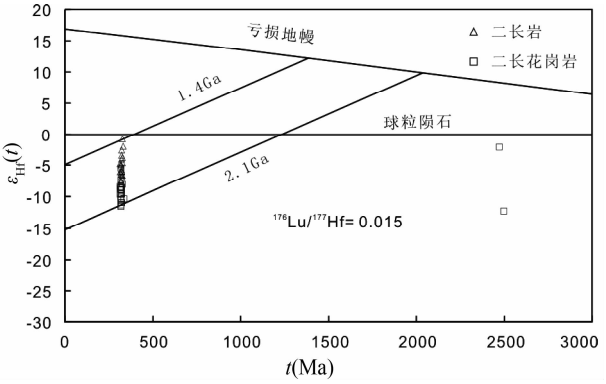


图 9 海沟岩体锆石 Lu-Hf 同位素组成演化

Fig. 9 Zircon Lu-Hf isotopic evolution diagram of Haigou granitoids

本次研究获得的两颗捕获锆石的 Hf 同位素数据很可能反映了华北地台古老地壳形成时的信息。

5.2 构造意义

古亚洲构造域演化的重要问题是古亚洲洋在本区消失的时间与地点(吴福元等,1999)。虽然之前存在较多的争论(Tang *et al.*,1990;赵春荆等,1996;邵济安等,1997;王玉净和樊志勇,1997),但随着东北显生宙花岗岩年代学的研究取得的重大进展,早期被认为形成于古生代的花岗岩岩体,其精确的锆石年龄显示为中生代产物。这些中生代花岗岩厘定,使得更多的学者倾向于认为古亚洲洋在二叠纪末于西拉木伦河-长春-延吉一线消失(Zhang *et al.*,2004;孙德有等,2004)。而在大兴安岭地区,大量早古生代的岩浆活动,表明古亚洲洋在早古生代确实存在俯冲作用(刘敦一等,2003;石玉若等,2004),但在东北东部地区,却很少有较精确的晚古生代花岗岩的报道。本次研究中,精确的锆石 U-Pb 年龄表明,海沟岩体形成于 320Ma,为古生代产物。其微量元素表明,该岩体形成于陆缘弧环境。结合该区构造演化,认为海沟岩体形成于古亚洲洋板块向华北板块俯冲过程中的陆缘弧环境。这表明到晚古生代,在华北克拉通北缘东段古亚洲洋板块仍然在向华北板块进行俯冲,古亚洲洋仍未闭合,还处在消亡的过程中,其闭合过程可能一直持续到二叠纪末。

5.3 成岩与矿化的关系

海沟岩体是海沟金矿的赋矿围岩,数十条 NE 向的含金石英大脉就位于海沟岩体中。该矿区矿化与围岩的关系是历来研究中争论的焦点,主要观点有成矿与海沟岩体有关(陈殿芬和孙淑琼,1994;戴薪义等,1996),成矿与脉岩相关(曾庆栋等,1999)。其中,"成矿与海沟岩体相关"观点的提出多基于对海沟岩体的形成时间与海沟金矿矿化时间两者基本一致的认识。然而,本次研究表明,海沟岩体形成于 320Ma,为晚古生代;海沟金矿成矿时代在 124~130Ma 之间,为早白垩世成矿(张松,2011)。晚古生代,该区处于古亚洲构造域演化阶段,而到早白垩世,该区处于滨太平洋构造域演化阶段。即海沟岩体的形成和矿体的形成分别受到不同构造体制的制约。巨大的矿岩时差使得海沟岩体不可能为海沟金矿的形成提供热量。另外,海沟岩体的规模相对较小,且岩体中金的含量与世界花岗岩平均值相当(曾庆栋,1997),虽然岩体发生大规模的蚀变,但在蚀变剖面上,蚀变岩石与新鲜岩石的金含量差别不大,故认为海沟岩体不可能为海沟金矿提供大量的成矿物质。因此,海沟岩体与海沟金矿即不可能是"父子"关系,更不会是"兄弟"关系。与此相反,海沟金矿成矿时代与成矿前闪长玢岩同是早白垩世形成的,且两者具有更加紧密的空间关系。海沟金矿的形成可能与成矿前的闪长玢岩关系更为密切。

6 结论

海沟岩体中二长岩和二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 322.9Ma 和 320.3Ma,为海西期产物,成岩与成矿没有直接的联系。其地球化学特征显示,海沟岩体形成于陆缘弧环境。这说明在晚古生代,在华北克拉通北缘东段古亚洲洋板块仍然在向华北板块进行俯冲,古亚洲洋的闭合过程仍在继续。岩石 Sr、Nd 同位素和锆石 Hf 同位素表明,海沟岩体可能形成于中元古代和古元古代地壳物质的部分熔融,同时可能有地幔物质的加入,且二长岩的 ε_{Hf} 值明显高于二长花岗岩的 ε_{Hf} 值,表明在二长岩的形成过程中,有更多地幔物质的加入。

致谢 在野外工作期间,得到海沟黄金矿业有限责任公司领导的关心和指导,以及海沟金矿上多位地质同行、员工的鼎力支持和协助;中国科学院地质与地球物理研究所离子 LA-ICP-MS 实验室杨岳衡老师在 U-Pb 和 Hf 同位素分析测试时给予帮助;在此一并表示感谢。

References

Amelin Y, Lee DC, Halliday AN and Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. Nature, 399: 252 – 255

Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-Middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. Geochim. Cosmochim. Acta, 64(24): 4205 – 4225

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analysis that do not report ^{204}Pb. Chemical Geology, 192(1 – 2): 59 – 79

Bowring SA and Schmitz MD. 2003. High-precision U-Pb zircon geochronology and the stratigraphic record. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 305 – 326

Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1988. Regional Geology of Jilin Province. Beijing: Geological Publishing House, 301 – 386 (in Chinese)

Cherniak DJ and Watson EB. 2003. Diffusion in zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 113 – 143

Chen DF and Sun SQ. 1994. Main characteristics of ore minerals in the

Haigou gold deposit, Jilin Province. Journal of Hebei College of Geology, 17(1): 65 – 73 (in Chinese with English abstract)

Chen FK, Hegner E and Todt W. 2000. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc. International Journal of Earth Sciences, 88(4): 791 – 802

Chen FK, Siebel W, Satir M, Terzioglu MN and Saka K. 2002. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone. International Journal of Earth Sciences, 91(3): 469 – 481

Corfu F, Hanchar JM, Hoskin PWO and Kenny P. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 469 – 500

Dai XY, Zeng QD and Jin FZ. 1996. The geological features of the Haigou granitic body in Antu, Jilin Province and its relation to Au deposit. Jinli Geology, 15(1): 30 – 37 (in Chinese with English abstract)

Fang WC. 1992. Granitoid and Mineralization in Jilin Province. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House, 1 – 271 (in Chinese)

Kinny PD and Maas R. 2003. Lu-Hf and Sm-Nd isotope systems in zircon. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 327 – 341

Li CD, Zhang FQ, Miao LC, Xie HQ, Hua YQ and Xu YW. 2007. Reconsideration of the Seluohe Group in Seluohe area, Jilin Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 37(5): 841 – 847 (in Chinese with English abstract)

Li JY. 1998. Some new ideas on tectonics of NE China and its neighboring areas. Geological Review, 44(4): 339 – 347 (in Chinese with English abstract)

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

Liu DY, Jian P, Zhang Q, Zhang FQ, Shi YR, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulinkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction. Acta Geologica Sinica, 77(3): 317 – 327 (in Chinese with English abstract)

Liu HT, Sun SH, Liu JM and Zhai MG. 2002a. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Geochemistry and source region. Acta Petrologica Sinica, 18(3): 257 – 274 (in Chinese with English abstract)

Liu HT, Zhai MG, Liu JM and Sun SH. 2002b. The Mesozoic granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Evolution from post-collisional to anorogenic settings. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 433 – 448 (in Chinese with English abstract)

Ludwig KR. 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1 – 56

Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25(4): 956 – 983

Pei FP. 2008. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic intrusive rocks in southern Liaoning and Jilin Province: Constraints on the spatial-temporal extent of the North China Craton destruction. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1 – 168 (in Chinese with English summary)

Peng YJ and Zhao CB. 2001. The evolution of the paleo Ji-Hei orogenic belt and accretion of the continental crust. Jilin Geology, 20(2): 1 – 9 (in Chinese with English abstract)

Shao JA, Zang SX, Mou BL, Li XB and Wang B. 1994. Extension of orogenic belts and upwelling of asthenosphere: The example of Hinggan-Mongolian orogenic belt. Chinese Science Bulletin, 39(6): 533 – 537 (in Chinese)

Shao JA, Mou BL, He GQ and Zhang LQ. 1997. The geological process of the northern region of North China in the tectonic overprinting process of Palaeoasia and Pacific regimes. Science in China (Series D), 27(5): 390 – 394 (in Chinese)

Shi YR, Liu DY, Zhang Q, Jian P, Zhang FQ, Miao LC, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2004. SHRIMP dating of diorites and granites in southern Suzuoqi, Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica, 78(6): 789 – 799 (in Chinese with English abstract)

Song B, Zhang YH and Liu DY. 2002. Introduction to the naissance of SHRIMP and its contribution to isotope geology. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 23(1): 58 – 62 (in Chinese with English abstract)

Sun DY, Wu FY, Zhang YB and Gao S. 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone: Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 34(2): 174 – 181 (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 Ocean Basin. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 – 345

Tang KD. 1990. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korean Craton. Tectonics, 9(2): 249 – 260

Wang YJ and Fan ZY. 1997. Discovery of Permian Radiolarians in ophiolite belt on northern side of Xar Moron River, Inner Mongolia, and its geological significance. Acta Palaeontologica Sinica, 36(1): 58 – 69 (in Chinese with English abstract)

Wilde SA, Dorsett-Bain HL and Liu JL. 1997. The identification of a Late Pan-African granulite facies event in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon dating of the Mashan Group at Liu Mao, Heilongjiang Province, China. Proceedings of the 30th IGC: Precambrian Geol. Metamorphic Petrol., 17: 59 – 74

Woodhead J, Hergt J, Shelley M, Eggins S and Kemp R. 2004. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation. Chemical Geology, 209(1 – 2): 121 – 135

Wu FY, Ge WC, Sun DY, Lin Q and Zhou Y. 1997. The Sm-Nd, Rb-Sr isotopic ages of the Archean granites in southern Jilin Province. Acta Petrologica Sinica, 13(4): 499 – 506 (in Chinese with English abstract)

Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. Acta Petrologica Sinica, 15(2): 181 – 189 (in Chinese with English abstract)

Wu FY, Jahn BM, Wilde S and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. Tectonophysics, 328(1 – 2): 89 – 113

Wu FY, Wilde, S and Sun DY. 2001. Zircon SHRIMP U-Pb ages of gneissic granites in Jiamusi Massif, northeastern China. Acta Petrologica Sinica, 17(3): 443 – 452 (in Chinese with English abstract)

Wu FY, Yang JH, Liu XM, Li TS, Xie LW and Yang YH. 2005. Hf isotopes of the 3.8Ga zircons in eastern Hebei Province, China: Implications for early crustal evolution of the North China Craton. Chinese Science Bulletin, 50(18): 1996 – 2003 (in Chinese)

Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. Chemical Geology, 234(1 – 2): 105 – 126

Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotope systematics and their applications in petrology. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185 – 220 (in Chinese with English abstract)

Zeng QD. 1997. The geology and the metallogenic model of Haigou gold-uranium deposit. Ph. D. Dissertation. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 1 – 121 (in Chinese with English summary)

Zeng QD, Shen YC and Meng QL. 1999. The characteristics of vein rocks and relationship with gold metallogenesis in Haigou gold ore area, Jilin Province. Journal of Precious Metallic Geology, 8(2): 70 – 75 (in Chinese with English abstract)

Zeng QD, Liu TB and Shen YC. 2001. The Tanlu fault zone and gold ore metallogenesis in eastern China. International Geology Review, 43(2): 176 – 190

Zhang S. 2011. The metallogenesis and the evolution of structure, magma and fluid in Haigou lode gold deposit, Jilin Province. Ph. D.

Dissertation. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1 – 151 (in Chinese with English summary)
Zhang XZ, Mu SM, Yang BJ *et al*. 1999. Geodynamics of Heilongjiang plates. In: Zhang YX, Sun YS, Zhang XZ and Yang BJ (eds.). The 1 : 1000000 Direction of the Area Crossed by M-S GGT. Beijing: Geological Publishing House, 20 – 23 (in Chinese)
Zhang YB, Wu FY, Sun DY and Li HM. 2002a. Single grain zircon U-Pb ages of the "Early Hercynian" Miantian granites and Zhongping hypersthene diorite in the Yanbian area. Geological Review, 48(4): 424 – 429 (in Chinese with English abstract)
Zhang YB, Wu FY, Li HM, Lu XP, Sun DY and Zhou HY. 2002b. Single grain zircon U-Pb ages of the Huangniling granite in Jilin Province. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 475 – 481 (in Chinese with English abstract)
Zhang YB, Wu FY, Wilde SA, Zhai MG, Lu XP and Sun DY. 2004. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of 'Early Paleozoic' granitoids at Yanbian, Jilin Province, northeast China. The Island Arc, 13(4): 484 – 505
Zhao CJ, Li ZT and Ma WC. 1986. The geological characters of Jiamusi Massif and the affection to regional tectonics. In: Contributions on North China plate (No. 1). Beijing: Geological Publishing House, 185 – 198 (in Chinese with English abstract)
Zhao CJ, Peng YJ, Dang ZX, Zhang YP, Zhu F, Su YZ, Wang ZF, Tai CB, Gu F, Zhang JF, Zheng CZ and Dang YS. 1996. Tectonic Framework and Crust Evolution of Eastern Jilin and Heilongjiang Provinces. Shenyang: Liaoning University Press, 1 – 186 (in Chinese with English abstract)
Zhou YC, Jiang KJ and Huo QL. 1992. The tectonic-magmatic and genesis series of Phanerozoic granites in Yanbian area. In: Contributions to 40th Anniversary of Changchun College of Geology. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House, 204 – 212 (in Chinese)

附中文参考文献

陈殿芬, 孙淑琼. 1994. 吉林海沟金矿床金属矿物的主要特征. 河北地质学院学报, 17(1): 65 – 73
戴薪义, 曾庆栋, 金逢洙. 1996. 吉林省安图县海沟花岗岩体的地质特征及其与金矿关系. 吉林地质, 15(1): 30 – 37
方文昌. 1992. 吉林省花岗岩类及成矿作用. 长春: 吉林科学技术出版社, 1 – 271
吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社, 301 – 386
李承东, 张福勤, 苗来成, 颉颃强, 花艳秋, 许雅雯. 2007. 吉林色洛河群的重新认识. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 841 – 847
李锦轶. 1998. 中国东北及邻区若干地质构造问题的新认识. 地质论评, 44(4): 339 – 347
刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据. 地质学报, 77(3): 317 – 327
刘红涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002a. 华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩类: 地球化学与源区性质. 岩石学报, 18(3): 257 – 274
刘红涛, 翟明国, 刘建明, 孙世华. 2002b. 华北克拉通北缘中生代花岗岩: 从碰撞后到非造山. 岩石学报, 18(4): 433 – 448
裴福萍. 2008. 辽南-吉南中生代侵入岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学: 对华北克拉通破坏时空范围的制约. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 1 – 168
彭玉鲸, 赵成弼. 2001. 古吉黑造山带的演化与陆壳的增生. 吉林地质, 20(2): 1 – 9
邵济安, 臧绍先, 牟保磊, 李晓波, 王冰. 1994. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例. 科学通报, 39(6): 533 – 537
邵济安, 牟保磊, 何国琦, 张履桥. 1997. 华北北部在古亚洲域与古太平洋域构造叠加过程中的地质作用. 中国科学(D 辑), 27(5): 390 – 394
石玉若, 刘敦一, 张旗, 简平, 张福勤, 苗来成, 施光海, 张履桥, 陶华. 2004. 内蒙古苏左旗地区闪长-花岗岩类 SHRIMP 年代学. 地质学报, 78(6): 789 – 799
宋彪, 张玉海, 刘敦一. 2002. 微量原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学. 质谱学报, 23(1): 58 – 62
孙德有, 吴福元, 张艳斌, 高山. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 174 – 181
王玉净, 樊志勇. 1997. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义. 古生物学报, 36(1): 58 – 69
吴福元, 葛文春, 孙德有, 林强, 周燕. 1997. 吉林南部太古代花岗岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素年龄测定. 岩石学报, 13(4): 499 – 506
吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 15(2): 181 – 189
吴福元, Wilde S, 孙德有. 2001. 佳木斯地块片麻状花岗岩的锆石离子探针 U-Pb 年龄. 岩石学报, 17(3): 443 – 452
吴福元, 杨进辉, 柳小明, 李铁胜, 谢烈文, 杨岳衡. 2005. 冀东 3.8Ga 锆石 Hf 同位素特征与华北克拉通早期地壳时代. 科学通报, 50(18): 1996 – 2003
吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185 – 220
曾庆栋. 1997. 吉林省海沟金铀矿床成矿地质背景及成矿模式. 博士学位论文. 长春: 长春科技大学, 1 – 121
曾庆栋, 沈远超, 孟庆丽. 1999. 海沟金矿区脉岩特征及其与金矿成矿关系. 贵金属地质, 8(2): 70 – 75
张松. 2011. 吉林省海沟金矿床构造-岩浆-流体演化与金的成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1 – 151
张兴洲, 穆石敏, 杨宝俊等. 1999. 黑龙江板块群的地球动力学. 见: 张贻侠, 孙运生, 张兴洲, 杨宝俊主编. 中国满洲里-绥芬河地学断面 1 : 1000000 说明书. 北京: 地质出版社, 20 – 23
张艳斌, 吴福元, 孙德有, 李惠民. 2002a. 延边"早海西期"棉田花岗岩和仲坪紫苏辉石闪长岩的单颗粒锆石 U-Pb 定年. 地质论评, 48(4): 424 – 429
张艳斌, 吴福元, 李惠民, 路孝平, 孙德有, 周红英. 2002b. 吉林黄泥岭花岗岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄. 岩石学报, 18(4): 475 – 481
赵春荆, 李之彤, 马万昌. 1986. 佳木斯中间地块的地质特征及其对区域地质构造发展的影响. 见: 中国北方板块论文集(第一集). 北京: 地质出版社, 185 – 198
赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 张允平, 朱峰, 苏养正, 王占福, 邰成彬, 谷峰, 张炯飞, 郑春子, 党延松. 1996. 吉黑东部构造格架及地壳演化. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1 – 186
周永昶, 姜开君, 霍秋立. 1992. 延边地区显生宙花岗岩成因系列及其构造岩浆演化序列. 长春地质学院 40 周年科学研究论文集. 长春: 吉林科技出版社, 204 – 212