

· 专题研究 ·

华北克拉通北缘晚志留世末—早泥盆世钾质碱性岩的成因及对区域构造演化的限定

牛晓露^{1,2}, 刘飞^{1,2}, 冯光英^{1,2}, 毛小红¹

(1. 自然资源部深地动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘要: 华北克拉通北缘晚志留世末—早泥盆世碱性岩的成因研究可以为古生代古亚洲洋与华北克拉通的相互作用过程提供重要信息。本文以内蒙古达茂旗黄合少正长岩为研究对象, 开展了锆石 U-Pb 年代学、矿物化学、地球化学和 Sr-Nd 同位素的研究, 并综合同带其他代表性岩体的岩石矿物及元素特征, 探讨了华北克拉通北缘钾质碱性岩的岩浆体系性质、源区特征及构造动力学背景。黄合少正长岩的主要岩石类型为碱性长石正长岩, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 417.6 ± 4.7 Ma, 为晚志留世末期岩浆作用的产物; 主要组成矿物为霓辉石和钾长石 ($An_0Ab_{2-5}Or_{95-98}$) 及少量钠长石 ($An_0Ab_{95-100}Or_{0-5}$), 可见霓辉石内部部分转化为蓝透闪石或镁钠闪石; 黄合少正长岩具有较高的全碱含量 ($Na_2O + K_2O = 12.79\% \sim 15.30\%$) 和里特曼指数 ($8.48 \sim 11.09$), 较高的 K_2O 含量 ($8.66\% \sim 13.78\%$) 和 K_2O/Na_2O 值 ($2.10 \sim 9.07$), 指示黄合少正长岩属于钾质—超钾质碱性岩系列; 较高的 Sr 含量和富集放射性成因的 Sr 同位素组成 (初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 $0.7041 \sim 0.7061$), 显示岩体起源于被俯冲沉积物交代过的富集岩石圈地幔。华北克拉通北缘晚志留世末—早泥盆世钾质碱性岩的发育, 指示早古生代期间发育古亚洲洋板片向华北克拉通下的俯冲, 俯冲相关物质对华北克拉通岩石圈地幔进行交代, 形成含金云母/角闪石等交代矿物的易熔地幔; 晚志留世末—早泥盆世时, 由于微陆块的拼贴碰撞, 华北克拉通北缘暂时处于碰撞后伸展演化阶段。

关键词: 华北克拉通; 古生代; 钾质碱性岩; 黄合少正长岩; 古亚洲洋; 俯冲作用

中图分类号: P588.15; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)05-0835-24

Petrogenesis of the Late Silurian to Early Devonian potassic alkaline rocks on the northern margin of the North China Craton and their constraints on the tectonic evolution

NIU Xiao-lu^{1,2}, LIU Fei^{1,2}, FENG Guang-ying^{1,2} and MAO Xiao-hong¹

(1. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: The Late Silurian to Early Devonian potassic alkaline rocks on the northern margin of the North China Craton (NCC) is a key geological unit to understand the interaction processes of the Paleo-Asian Ocean and the NCC in the Paleozoic. In this paper, we report new zircon U-Pb age, mineral chemistry, whole-rock geochemistry and Sr-Nd isotopic compositions from the Late Silurian potassic Huangheshao (HHS) syenties on the northern margin

收稿日期: 2021-02-09; 接受日期: 2021-07-15; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金 (41672063, 41773029); 南方海洋科学与工程广东省实验室 (广州) 人才团队引进重大专项 (GML2019ZD0201); 自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题 (J1901-35); 中国地质调查局项目 (DD20190060)

作者简介: 牛晓露 (1983-), 女, 副研究员, 主要从事岩浆岩岩石学和岩石地球化学相关研究, E-mail: niuxiaoludx@126.com。

of the NCC, and discuss its petrogenesis. Sensitive high-resolution ion microprobe (SHRIMP) zircon U-Pb dating has revealed a crystallization age of 417.6 ± 4.7 Ma for the HHS pluton. Alkali-feldspar syenite is the main rock type; Aegirine-augite and sanidine ($An_0Ab_{2-5}Or_{95-98}$) are the major minerals, with subordinate albite ($An_0Ab_{95-100}Or_{0-5}$). Aegirine-augites locally transferred into winchite or magnesio-riebeckite. The HHS syenites have high total alkali contents ($Na_2O+K_2O=12.79\% \sim 15.30\%$), high Rittmann index ($\sigma=8.48 \sim 11.09$), high K_2O contents ($8.66\% \sim 13.78\%$), and high K_2O/Na_2O ratios ($2.10 \sim 9.07$), suggesting their alkaline, potassic-ultrapotassic affinity. High Sr abundances and radiogenic Sr isotopic compositions (initial $^{87}Sr/^{86}Sr=0.7041 \sim 0.7061$) argue for an enriched subcontinental lithospheric mantle (SCLM) source for the HHS magmas, which was previously metasomatized by melts/fluids from the subducted sediments on the down-going oceanic crust. The development of the Late Silurian to Early Devonian potassic alkaline rocks on the northern margin of the NCC indicates that the Paleo-Asian oceanic slab had subducted beneath the NCC in the Early Paleozoic, and the subducted materials metasomatized the SCLM, forming a phlogopite/K-amphibole-bearing, fertile mantle source. During the end of the Late Silurian to Early Devonian, due to the accretion or collision of a microcontinent, the northern margin the NCC has entered into a temporary, post-collisional extension tectonic setting.

Key words: North China Craton; Paleozoic; potassic alkaline rocks; Huangheshao syenites; Paleo-Asian Ocean; subduction process

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41672063, 41773029); Key Special Project for Introduced Talents Team of Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou) (GML2019ZD0201); Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources Fund (J1901-35); Project of China Geological Survey (DD20190060)

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,于古元古代经东、西块体聚合形成(Liu *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 2005; 翟明国, 2019),其基底主要为太古宙-古元古代变质岩系(Jahn *et al.*, 1987; Jahn and Ernst, 1990; Liu S W *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2002; Liu Y S *et al.*, 2004; Wei *et al.*, 2014; 万渝生等, 2017)。中-新元古代沉积岩不整合覆盖于基底之上,指示克拉通在中元古代之前已稳定,之后便进入稳定地台发展阶段。古生代以来,华北克拉通北缘的地质发展与古亚洲洋的演化过程密切相关,包括大量岩浆岩的发育和相关矿产的形成。

关于古亚洲洋的演化以及其与华北克拉通北缘相互作用的过程,多数学者认为,奥陶纪-志留纪时即发育古亚洲洋向华北克拉通下的俯冲,形成白乃庙陆弧型岩浆作用(如, Wang and Liu, 1986; Yue *et al.*, 2001; Xiao *et al.*, 2003, 2010, 2015, 2020; Miao *et al.*, 2007; Windley *et al.*, 2007; Jian *et al.*, 2008; Wilhem *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013, 2015; Song *et al.*, 2015; 肖文交等, 2019); 但 Zhang 等(2014)研究发现,白乃庙弧岩浆岩发育在具有塔里木或扬子克拉通属性的前寒武微陆块之上,通过弧-陆碰撞增生到华北克拉通北缘,并非是发育在华

北克拉通之上的陆弧岩浆,认为古亚洲洋向华北克拉通下的俯冲始于石炭纪。这两种学术观点的主要分歧在于:早古生代期间是否存在古亚洲洋向华北克拉通下的俯冲?也就是说,如果白乃庙岩浆岩不能代表古生代古亚洲洋向华北克拉通下俯冲形成的陆弧岩浆,那是否还有其他岩浆岩证据能够揭示古生代期间古亚洲洋向华北克拉通下俯冲?

近些年来,在华北克拉通北缘陆续识别出一条晚志留世末-早泥盆世碱性岩带。这条碱性岩带沿华北克拉通北缘自西向东展布,其锆石 U-Pb 年龄主要集中在 417~380 Ma 之间(张招崇, 1997; 罗镇宽等, 2001; Jiang, 2005; Zhang *et al.*, 2010; 王惠初等, 2012; Huang and Hou, 2017; Zhang Q Q *et al.*, 2018; 龚弥等, 2019; Niu *et al.*, 2021)。对应上述两种构造演化模式,对这条碱性岩带的成因和构造背景的解释也主要存在两种代表性观点:一些学者认为这套岩石形成于古亚洲洋板片向华北克拉通下俯冲过程中俯冲板片断离而引发的碰撞后伸展(Zhang *et al.*, 2010); 其他学者认为它们是白乃庙岛弧带与华北克拉通北缘弧-陆碰撞后伸展作用的产物(王惠初等, 2012; Teng *et al.*, 2015; Huang and Hou, 2017; Zhang Q Q *et al.*, 2018)。

岩浆岩是地质事件的记录和研究深部地质作用的“探针”,尤其是碱性岩,其特殊的地球化学组成及成因过程可以提供地球深部物质组成、演化和地球动力学等方面的重要信息(如,喻学惠等,2004;赵志丹等,2006;Ying *et al.*, 2007; Zhao *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2014, 2015)。为了从岩浆岩角度探究古生代期间是否存在古亚洲洋向华北克拉通下的俯冲,本文选取了华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世碱性岩带的代表性岩体黄合少正长岩,开展锆石 U-Pb 定年、矿物化学和岩石地球化学的研究,拟从岩浆体系性质、源区特征等方面为这套碱性岩的成因及区域构造演化的讨论提供更多的依据和限定。

1 地质背景

华北克拉通的北面是巨大的中亚造山带(图1a);中亚造山带是古亚洲洋长期俯冲消减增生的产物(Şengör and Natal'in, 1996; Chen *et al.*, 2000, 2009; Xiao *et al.*, 2003, 2009, 2013, 2015; Windley *et al.*, 2007; Kröner *et al.*, 2007; 肖文交等, 2019)。目前为止中亚造山带内发现的最老蛇绿岩为西伯利亚南缘萨彦构造带的 Dunzhugur 杂岩(Banerjee and Martin, 2013),其形成时代为~1 020 Ma,证明古亚洲洋至少在中元古代末期就已经存在(Khain *et al.*, 2002)。Şengör 和 Natal'in(1996)提出集宁-隆化断裂是华北克拉通的北部边界,但考虑到太古宙-早元古代岩石在这条断裂两侧均有分布,更倾向于把赤峰-白云鄂博断裂作为华北克拉通的北部边界(Shao, 1989; Tang and Yan, 1993; Bai *et al.*, 1993a, 1993b; Xiao *et al.*, 2003)。

赤峰-白云鄂博断裂以北发育古生代白乃庙弧岩浆岩和温都尔庙俯冲增生杂岩。白乃庙弧岩浆岩包括钙碱性花岗质侵入岩(花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩、石英闪长岩等)和一套火山-沉积序列(主要由玄武岩、安山岩、流纹岩、火山碎屑岩和火山凝灰岩等组成),侵位时代集中在470~430 Ma(Xiao *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2014)。在温都尔庙俯冲增生杂岩中,发育有早奥陶世的 MORB、岛弧和玻安质地地球化学属性的蛇绿岩相关岩石(Jian *et al.*, 2008; Miao *et al.*, 2008)。

自早石炭世到晚二叠世,华北克拉通北缘广泛分布安第斯型陆弧岩浆岩组合,包括钙碱性辉长岩、

闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩等侵入岩以及玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩、流纹岩和凝灰岩等喷出岩,形成时代集中在347~258 Ma(Zhang *et al.*, 2007b, 2009a, 2016; 张拴宏等, 2010; Ma *et al.*, 2013)。

晚二叠世-早三叠世时,古亚洲洋沿索伦缝合带最终碰撞缝合(Chen *et al.*, 2000, 2009; Xiao *et al.*, 2003, 2015; Li, 2006; Song *et al.*, 2015)。

晚三叠世时,华北克拉通北缘发育大量超钾质碱性岩,包括碱性长石正长岩、辉石正长岩、霞石辉石正长岩、含黑榴石辉石正长岩、煌斑岩(含碳酸岩)和单斜辉石岩、黑云母岩等,侵位时代集中在233~209 Ma之间(牟保磊等, 1992; Yan *et al.*, 1999; 吴福元等, 2005; 任荣等, 2009; Niu *et al.*, 2012, 2017; Yang *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2012; 陈斌等, 2013; 汤艳杰等, 2014; 牛晓露等, 2016)。这套钾质碱性岩西起内蒙古包头市,向东延至吉林省中部,呈带状分布在华北克拉通北缘,绵延数千公里(图1)。

2 岩体特征及岩石组成

黄合少正长岩岩体位于内蒙古达尔罕茂明安联合旗(简称“达茂旗”)大苏吉乡黄合少村西北,岩体中心坐标为41°32'N, 111°10'E。构造位置上属于华北克拉通北缘,集宁-隆化断裂以北,赤峰-白云鄂博断裂以南(图1b)。

岩体为东西向展布长条形,东西长约5.7 km,南北宽约0.6 km,出露面积约3.5 km²。岩体东部和东部被第三系沉积岩和第四系沉积物所覆盖,其余大部分被早二叠世花岗闪长岩所侵入(图1c)。黄合少正长岩为一套肉红色中细粒-中粗粒含辉石碱性长石正长岩,主要由单斜辉石(5%~15%)、正长石(80%~90%)和钠长石(5%~10%)组成(图2),个别样品中出现石英(含量小于3%)。正长石为中粗粒,自形-半自形,发育格子双晶或卡式双晶(图2a~2d)。钠长石为细粒,呈他形填隙状发育于中粗粒正长石颗粒之间(图2d)。单斜辉石为半自形,墨绿色-近黑色,发生绿泥石化和碳酸盐化(图2a、2b);常见单斜辉石内部“长出”单个或多个角闪石颗粒(图2e~2g),这些角闪石多为自形,具灰蓝-深蓝-蓝紫多色性。副矿物可见磷灰石和锆石。

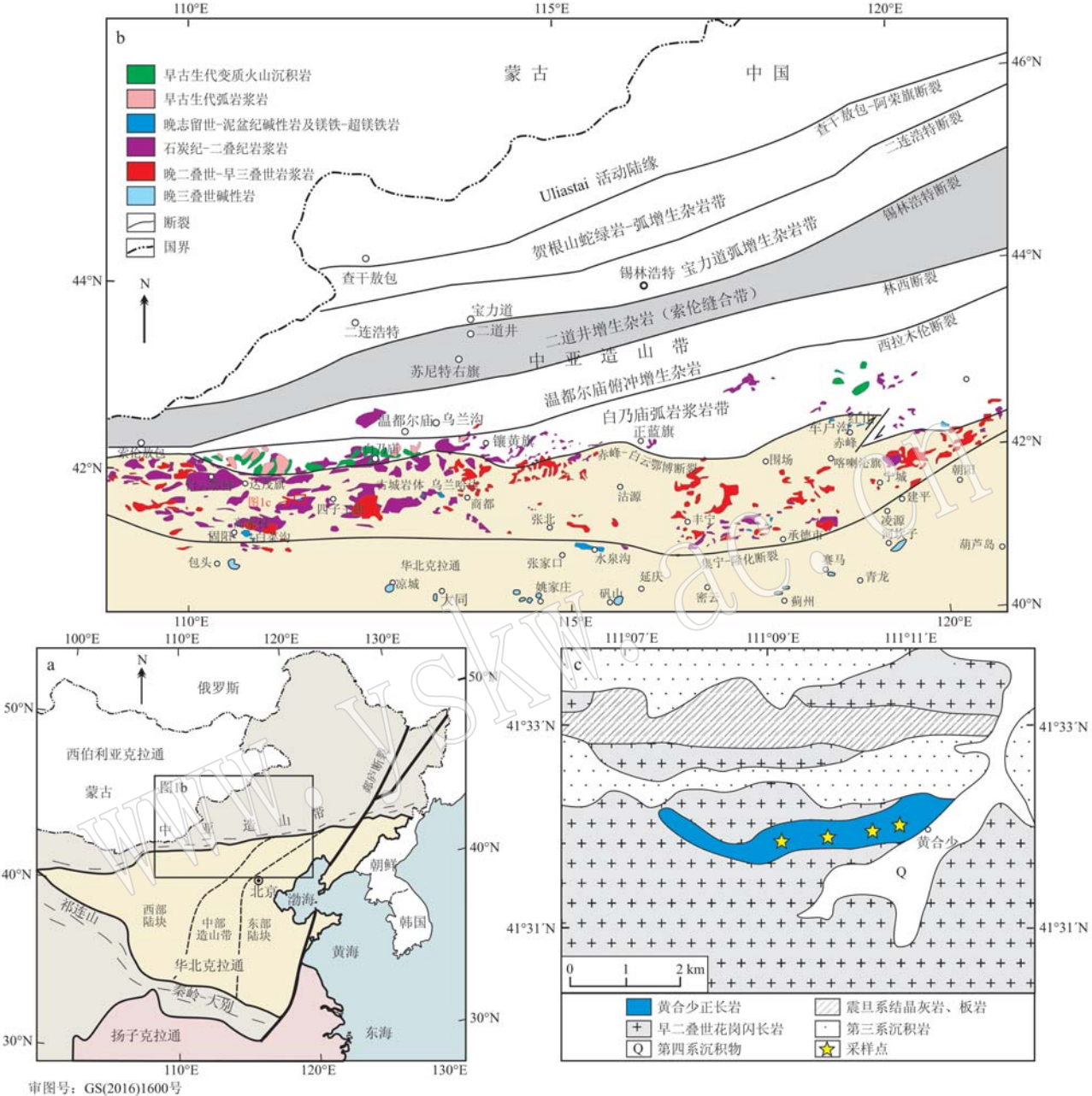


图 1 华北克拉通北缘及内蒙古地区中亚造山带地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the northern North China Craton and southeastern Central Asian Orogenic Belt
a—华北克拉通及周边主要地质单元(据 Zhao *et al.*, 2005); b—华北克拉通北缘及内蒙古地区中亚造山带主要构造单元以及华北克拉通北缘及周边古生代-早中生代岩浆岩分布(据 Xiao *et al.*, 2003; 张拴宏等, 2010); c—黄合少正长岩区地质图
a—major tectonic units of the North China Craton and its ajacements (after Zhao *et al.*, 2005); b—simplified tectonics units of the southeastern Central Asian Orogenic Belt and the northern margin of the North China Craton showing the distributions of the Pleozoic-Early Meozoic magmatic rocks (modified from Xiao *et al.*, 2003; Zhang Shuanhong *et al.*, 2010); c—geological map of the Huangsheshao pluton

3 分析方法

锆石的分选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司完成。利用重液和磁选相结合的方法从粉碎的

岩石样品中把锆石分选出来, 再在双目镜下提纯。锆石制靶、阴极发光图像拍摄、SHRIMP U-Pb 定年均在北京离子探针中心完成。将锆石与标样锆石 TEMORA 一起嵌于树脂样靶中, 并打磨、抛光。利用锆石阴极发光图像, 查明锆石内部结构和成因,

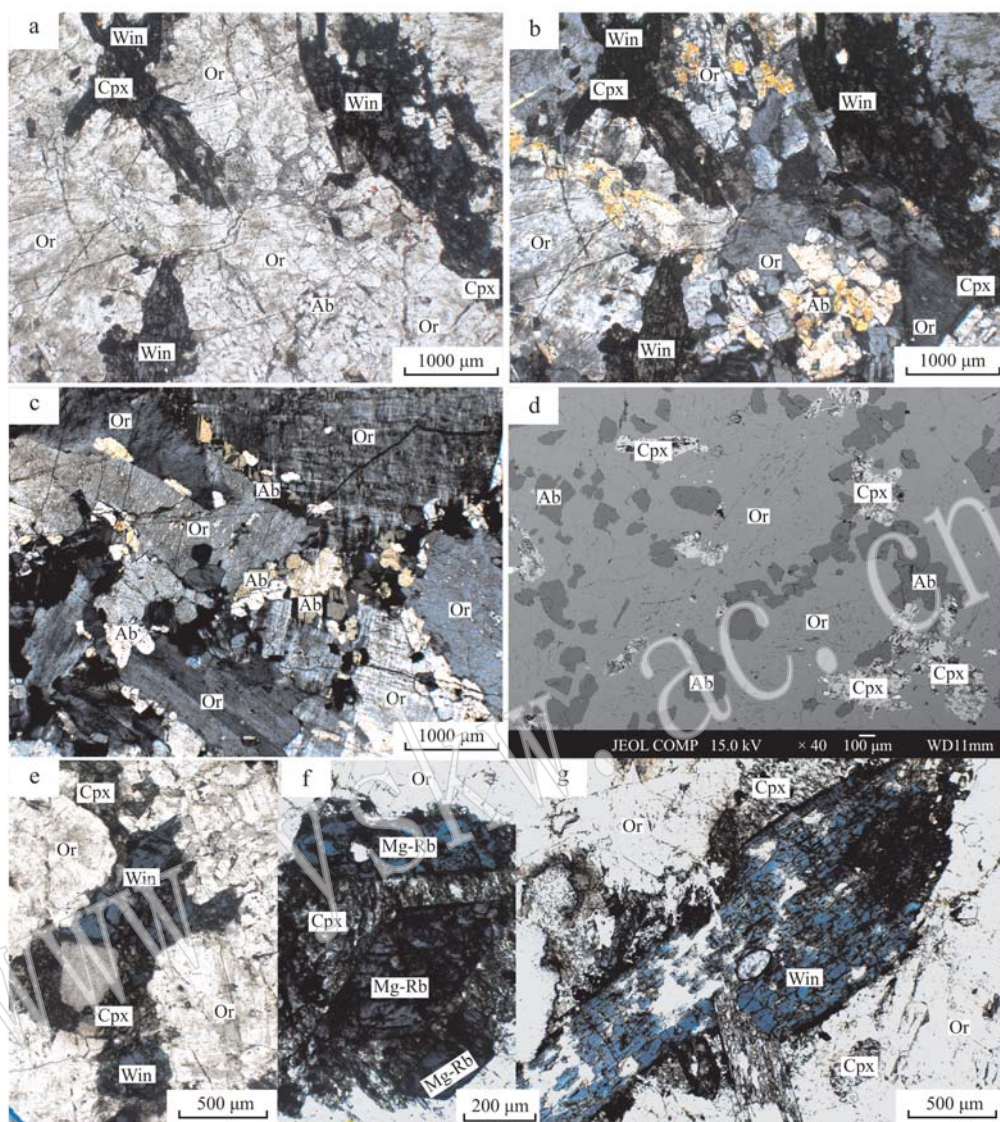


图 2 黄合少含辉石碱性长石正长岩显微照片(a 单偏光, d 背散射图像, 其余为正交偏光)
Fig. 2 Photomicrographs of the Huangheshao clinopyroxene-bearing alkali-feldspar syenites(a, plain-polarized light; d, backscattered electron image; the others are crossed polars)

Or—正长石; Ab—钠长石; Cpx—单斜辉石; Win—蓝透闪石; Mg-Rb—镁钠闪石
Or—orthoclase; Ab—albite; Cpx—clinopyroxene; Win—winchite; Mg-Rb—magnesian riebeckite

以便准确选点。U-Pb 同位素测定仪器为二次离子探针质谱计(SHRIMP IIe-MC)。U-Pb 定年测试流程参考 Williams(1998)。

矿物电子探针主量元素分析在中国地质科学院地质研究所自然资源部深地动力学重点实验室完成。仪器型号为 JXA-8100, 加速电压 15 kV, 束流 1×10^{-8} A, 束斑 1 μm 。采用 PRZ 方法校正, 分析标样为美国 SPI 公司的 53 种矿物, 测试精度优于 1%。

全岩主量和微量元素分析在国家地质实验测试中心完成。样品粉末熔成玻璃饼后, 应用 X 射线荧光光谱仪(PW4400)测定主量元素组成。采用两酸

($\text{HNO}_3 + \text{HF}$) 高压反应釜溶样方法对样品粉末进行溶解, 采用等离子质谱仪(PE300D)测定微量元素含量。

Sr-Nd 同位素分析测试在中国地质科学院地质研究所自然资源部同位素地质重点实验室完成。元素的分离和纯化通过传统的阳离子交换柱法来完成。Sr 同位素比值测定仪器为 MAT262 固体同位素质谱计; 标准样品 SRM 987 SrCO_3 测定结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710\,243 \pm 12(2\sigma)$; Sr 同位素质量分馏采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375\,21$ 校正。Nd 同位素比值测定是用 Nu Plasam HR (Nu Instruments) 型等离子体

质谱仪测定的; 标准样品 GSB 04-3258-2015 测定结果为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\,442\pm10(2\sigma)$; Nd 同位素质量分馏采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.721\,9$ 校正; Nd 同位素详细分析方法可参考唐索寒等(2017)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

对黄合少碱性长石正长岩(样品 HH-16)进行了

锆石 U-Pb 定年。如图 3 锆石阴极发光图像所示, 大部分锆石颗粒发生了明显的“损伤”, 但局部仍可见明显的岩浆震荡环带, 无明显继承核, Th/U 值在 2.2~33.6 之间。选择震荡环带发育较好的部位进行 SHRIMP U-Pb 同位素分析测试。

锆石 U-Pb 定年结果见表 1, 年龄谐和图见图 4。13 颗锆石给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 $402.0\pm8.2\sim433.8\pm9.0$ Ma 之间, 加权平均年龄为 417.6 ± 4.7 Ma(MSWD=1.3), 指示岩体侵位于晚志留世末期。

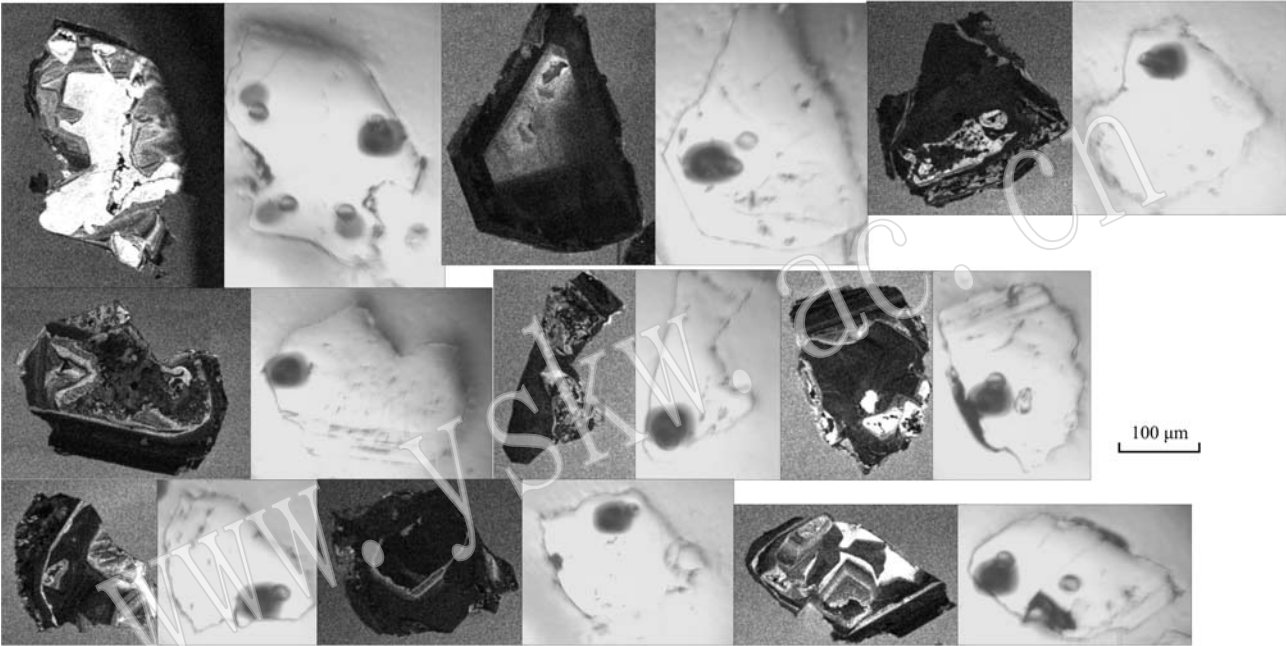


图 3 黄合少正长岩的锆石阴极发光图像及反射光照片(反射光照片上的黑斑为 SHRIMP U-Pb 定年分析位置)
Fig. 3 Cathodoluminescence and reflected-light images of representative zircons from the Huangheshao syenites
(black spots on the reflected-light images are the locations of SHRIMP U-Pb dating)

表 1 黄合少正长岩的锆石 SHIRMP U-Pb 定年结果
Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb dating results for the Huangheshao syenites

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	年龄/Ma	
	$^{206}\text{Pb}^*$	Th	U						$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
HH-16. 2	24.30	426	29	14.7	0.066 2	2.2	0.502	2.9	413.5 ± 8.7	374 ± 37
HH-16. 3	16.70	297	131	2.3	0.064 4	2.1	0.502	5.4	402.0 ± 8.2	395 ± 23
HH-16. 4	19.70	338	155	2.2	0.067 5	2.1	0.510	3.8	421.0 ± 8.5	411 ± 15
HH-16. 5	21.60	365	128	2.9	0.068 6	2.1	0.533	2.6	427.5 ± 8.6	427 ± 11
HH-16. 6	41.80	715	180	4.0	0.068 0	2.1	0.537	2.7	423.9 ± 8.4	426 ± 15
HH-16. 7	38.20	659	142	4.6	0.066 8	2.1	0.515	3.9	416.7 ± 8.3	408 ± 30
HH-16. 9	115.00	1 914	729	2.6	0.069 6	2.1	0.538	2.5	433.8 ± 9.0	425 ± 12
HH-16. 12	48.80	850	248	3.4	0.064 5	2.1	0.485	5.0	403.1 ± 8.1	369 ± 38
HH-16. 13	76.40	1 322	39	33.6	0.066 5	2.1	0.498	2.9	414.9 ± 8.2	328 ± 150
HH-16. 14	107.00	1 794	435	4.1	0.068 2	2.0	0.509	2.9	425.0 ± 8.4	366 ± 23
HH-16. 15	93.70	1 561	398	3.9	0.067 6	2.1	0.511	4.2	421.6 ± 8.4	70 ± 39
HH-16. 16	22.30	389	140	2.8	0.065 4	2.1	0.498	4.8	408.3 ± 8.3	212 ± 25
HH-16. 18	7.46	127	27	4.7	0.067 9	2.3	0.503	6.2	423.3 ± 9.2	353 ± 46

注: $^{206}\text{Pb}^*$ 表示放射性 Pb 同位素组成, 利用 ^{204}Pb 对普通 Pb 进行校正。

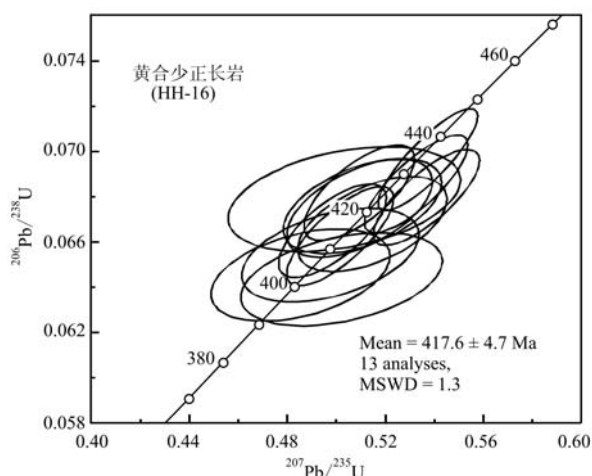


图4 黄合少正长岩的锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 4 Zircon U-Pb concordia age diagram of the Huangheshao syenites

4.2 矿物化学组成

对黄合少正长岩的主要组成矿物单斜辉石(及其中的角闪石)和长石进行了电子探针主量元素分析,分析结果详见表2、表3、表4。

4.2.1 单斜辉石

黄合少正长岩中的辉石均为单斜辉石(表2)。单斜辉石的化学通式为 $M_2M_1[T_2O_6]$ (Morimoto *et al.*, 1988), 其中, T 组离子主要为 Si^{4+} (其次为 Al^{3+}); M_1 为半径较小的阳离子 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 等占据; M_2 为大半径阳离子 Ca^{2+} 、 Na^+ 等占据。黄合少正长岩单斜辉石中存在的类质同像替代反应主要为: M_2 位置的 Ca 和 M_1 位置的 Mg (或 Fe^{2+}) 同时被 M_2 位置的 Na 和 M_1 位置的 Fe^{3+} 替代, 形成 Ca-Na 辉石系列的霓辉石(图5)。其分子式为 $Ca_{0.29-0.64}Na_{0.38-0.74}Mg_{0.12-0.41}Fe_{0.03-0.38}^{2+}Fe_{0.34-0.76}^{3+}[Si_{1.95-2.00}O_6]$ (表2)。

4.2.2 角闪石

黄合少正长岩样品中,角闪石均“长在”辉石颗粒上(图2e~2g),常见单颗单斜辉石内部转化为一颗或多颗自形角闪石(图2f、2g),角闪石多自形,具灰蓝-深蓝-蓝紫多色性。黄合少正长岩的角闪石成分详见表3,计算获得 $(Ca+Na)_B = 1.60 \sim 1.94$, $Na_B = 0.58 \sim 1.50$, 属于钠钙质角闪石或钠质角闪石系列,具体为蓝透闪石-铁蓝透闪石或镁钠闪石-钠闪石(图6)。

4.2.3 长石

黄合少正长岩中的长石成分详见表4,分类图解见图7。黄合少正长岩中的长石为碱性长石(即钾钠长石

系列),在化学组成上集中于钾长石($An_0Ab_{2-5}Or_{95-98}$)和钠长石($An_0Ab_{95-100}Or_{0-5}$)两个端员。

4.3 全岩主量和微量元素组成

黄合少正长岩的主量和微量元素组成见表5。其 SiO_2 含量为 60.44%~65.00%, TiO_2 含量为 0.02%~0.37%, Al_2O_3 含量为 15.30%~18.11%, Na_2O 和 K_2O 含量分别为 1.52%~4.13% 和 8.66%~13.78%, Fe_2O_3 和 MgO 的含量分别为 0.55%~2.83% 和 0.04%~0.73%, CaO 含量为 0.08%~3.27%。黄合少正长岩具有较高的全碱含量($Na_2O+K_2O=12.79\% \sim 15.30\%$)和较高的里特曼指数($\sigma=8.48 \sim 11.09$);在深成岩的全碱-硅(TAS)分类命名图解上,样品落入霞石正长岩-正长岩及其上方区域,指示样品碱度较高,属于碱性岩系列(图8a);较高的 K_2O/Na_2O 值(2.10~9.07)指示其为钾质碱性岩(图8b)。

在主量元素哈克图解上(图9),随着 SiO_2 含量增加, Al_2O_3 含量呈线性增加, Na_2O 含量无规律性变化; K_2O 含量和全碱含量(Na_2O+K_2O)略微增加; CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 和 TiO_2 含量明显降低。元素的含量演化趋势与不同样品的矿物组成直接相关: SiO_2 含量增加,伴随着辉石含量降低,钾长石含量升高,从而导致全岩 Al_2O_3 和 K_2O 含量增加,而 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 P_2O_5 和 TiO_2 含量降低。全岩 Na_2O 含量与钠长石和钠钙质角闪石(或钠质角闪石)含量相关。

为比较研究,图8还给出了华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世其他代表性碱性岩体的成分,自西向东这些岩体有:固阳东高家村角闪正长岩、白菜沟石英正长岩-碱性花岗岩、四子王旗以东古城正长岩和乌兰哈达石英正长岩(Zhang *et al.*, 2010; Huang and Hou, 2017; Zhang Q Q *et al.*, 2018; Niu *et al.*, 2021)。如图所示,这些岩体均具有较高的全碱含量,属于碱性岩系列(图8a)。在 K_2O-Na_2O 图解上(图8b),古城正长岩与本文黄合少正长岩相似, K_2O/Na_2O 值高于1,属钾质碱性岩;而其他岩体的 K_2O/Na_2O 值低于1,为钠质碱性岩。

黄合少正长岩的球粒陨石标准化稀土元素(REE)配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图见图10。黄合少正长岩的REE总量较低,为 $3.63 \times 10^{-6} \sim 84.28 \times 10^{-6}$;尽管不同样品REE总量变化范围较大,但总体上具有一致的右倾型配分模式,富集轻稀土元素、亏损重稀土元素, $(La/Yb)_{CN} = 4.58 \sim$

表 2 华北克拉通北缘黄合少正长岩单斜辉石电子探针分析结果

Table 2 Microprobe analysis results of clinopyroxene from the Huangshao syenites																			
点号	H31-3.3	H31-5.4	H31-5.10	H31-5.11	H31-1.3	H31-1.5	H31-2.2	H5-3.7	H5-3.8	H5-1.1	H5-1.2	H10-2.1	H10-1.1	H10-1.2	H14-1.1	H14-1.2	H14-2.1	H14-2.4	H14-4.1
SiO ₂	52.60	52.08	52.54	51.91	52.67	51.98	52.19	49.70	50.97	50.45	50.67	51.03	51.61	51.13	51.17	51.57	51.81	50.91	51.44
TiO ₂	0.12	0.08	0.07	0.13	0.11	0.08	0.08	0.02	0.01	0.06	0.07	0.09	0.06	0.04	0.04	0.02	0.09	0.02	0.10
Al ₂ O ₃	0.86	0.84	0.76	0.89	0.76	0.78	0.99	0.76	0.96	0.86	0.87	0.39	0.62	0.63	0.56	0.62	0.66	0.79	0.53
Cr ₂ O ₃	0.02	0.01	-	0.02	0.05	-	-	0.02	0.05	-	0.01	0.05	-	-	0.01	0.01	0.01	-	0.01
TFe ₂ O ₃	17.50	18.14	18.38	18.41	18.90	20.65	17.99	22.48	21.75	22.54	21.76	22.35	25.11	24.89	26.29	26.09	23.10	24.93	25.56
MnO	0.20	0.26	0.18	0.25	0.18	0.18	0.25	0.40	0.36	0.38	0.39	0.38	0.39	0.35	0.26	0.36	0.37	0.33	0.31
MgO	7.23	6.80	6.85	6.68	6.30	5.33	7.12	3.92	4.09	3.82	4.00	4.66	3.15	3.08	2.01	2.33	4.08	2.68	2.74
CaO	12.38	13.61	12.28	13.62	11.54	9.40	13.28	15.25	13.24	14.90	14.53	9.98	8.50	9.00	6.88	7.13	8.61	7.98	7.84
Na ₂ O	7.23	6.16	7.14	6.22	7.86	8.66	6.74	5.25	6.37	5.24	4.96	8.32	8.77	8.87	9.87	9.65	8.92	9.36	9.20
K ₂ O	-	-	-	-	-	0.05	0.01	0.02	0.02	0.03	-	0.03	0.01	-	-	-	0.02	0.03	-
NiO	-	-	0.06	0.01	-	0.01	-	0.02	-	-	0.02	-	-	-	0.02	0.01	-	-	0.02
总计	98.13	97.97	98.27	98.13	98.37	97.11	98.64	97.84	97.81	98.28	97.28	97.28	98.22	97.99	97.09	97.78	97.66	97.03	97.76
基于 6 个氧原子计算的离子数																			
T-Si	1.976	1.981	1.978	1.972	1.978	1.980	1.959	1.946	1.974	1.968	1.998	1.956	1.975	1.958	1.976	1.978	1.975	1.963	1.976
T-Al	0.024	0.019	0.022	0.028	0.022	0.020	0.041	0.035	0.026	0.032	0.002	0.017	0.025	0.028	0.024	0.022	0.025	0.036	0.024
T-Fe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0.019	0	0	0	0.027	0	0.014	0	0	0	0.001	0
M ₁ -Al	0.014	0.019	0.012	0.012	0.011	0.015	0.003	0	0.018	0.008	0.039	0	0.003	0	0.002	0.006	0.005	0	0
M ₁ -Fe ³⁺	0.522	0.451	0.527	0.466	0.564	0.625	0.525	0.452	0.486	0.419	0.338	0.654	0.669	0.698	0.758	0.732	0.674	0.736	0.703
M ₁ -Ti	0.003	0.002	0.002	0.004	0.003	0.002	0.002	0	0	0.002	0.002	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.003
M ₁ -Mg	0.405	0.385	0.384	0.378	0.353	0.302	0.398	0.229	0.236	0.222	0.235	0.266	0.180	0.176	0.115	0.133	0.232	0.154	0.157
M ₁ -Fe ²⁺	0.027	0.126	0.052	0.118	0.030	0.033	0.039	0.265	0.218	0.316	0.380	0.036	0.134	0.085	0.091	0.105	0.062	0.066	0.118
M ₁ -Mn	0.006	0.008	0.006	0.008	0.006	0.006	0.008	0.013	0.012	0.013	0.013	0.012	0.013	0.011	0.008	0.012	0.012	0.011	0.010
M ₂ -Ca	0.498	0.554	0.496	0.554	0.464	0.383	0.534	0.640	0.549	0.623	0.614	0.410	0.349	0.369	0.285	0.293	0.352	0.330	0.323
M ₂ -Na	0.527	0.454	0.521	0.459	0.572	0.640	0.491	0.399	0.479	0.397	0.379	0.618	0.650	0.659	0.739	0.718	0.659	0.700	0.686

注：T、M₁ 和 M₂ 为辉石晶体结构中的 T、M₁ 和 M₂ 位置 (Morimoto *et al.*, 1988)。

表 3 华北克拉通北缘黄台少正长岩角闪石电子探针分析结果

Table 3 Microprobe analysis results of amphibole from the Huangshao syenites

点号	H31-3.1	H31-5.1	H31-1.1	H33-1.2	H33-2.4	H33-1.20	H5-2.1	H10-2.3	H10-1.3	H10-1.4	H14-1.9	H31-3.2	H31-1.2	H33-1.7	H33-2.2	H33-2.13	H33-3.2	H14-1.4	H14-2.3	$w_B/\%$
SiO ₂	55.48	55.60	55.64	55.49	56.22	54.42	53.96	52.52	54.10	52.94	52.51	55.58	55.49	55.48	55.74	55.23	55.54	54.41	53.70	
TiO ₂	—	0.23	0.01	0.02	0.07	0.03	0.15	0.17	0.19	0.14	0.18	0.04	0.13	0.01	0.06	0.05	—	0.13	0.02	
Al ₂ O ₃	0.56	0.47	0.54	0.48	0.54	0.75	1.00	0.55	0.92	1.12	1.00	0.58	0.68	0.51	0.50	0.59	0.55	0.77	0.64	
TFe ₂ O ₃	19.88	17.39	16.65	18.26	19.73	23.84	17.84	28.00	22.11	19.22	24.18	21.06	19.65	20.15	20.49	22.86	22.20	24.72	29.81	
MnO	0.22	0.23	0.19	0.24	0.18	0.14	0.37	0.31	0.35	0.40	0.31	0.15	0.20	0.12	0.17	0.15	0.15	0.31	0.31	
MgO	12.07	13.26	13.84	13.09	12.07	9.15	12.91	7.75	10.83	11.72	9.03	11.58	12.02	12.04	11.67	10.13	10.72	8.88	6.02	
CaO	2.17	3.55	3.48	3.39	2.51	2.20	8.28	1.03	3.56	6.01	2.24	1.61	2.22	1.47	1.45	0.88	1.28	1.83	0.53	
Na ₂ O	5.32	4.76	5.02	5.23	5.41	5.22	2.47	6.59	4.89	3.89	5.37	5.86	5.92	6.07	5.98	6.14	5.77	5.64	6.27	
K ₂ O	0.53	0.98	0.99	0.66	0.65	0.45	0.58	0.11	0.64	0.87	0.52	0.50	0.68	0.78	0.59	0.41	0.48	0.40	0.08	
总计	96.29	96.47	96.40	96.88	97.40	96.21	97.61	97.03	97.61	96.38	95.36	96.96	96.97	96.72	96.67	96.45	96.68	97.15	97.46	
基于 23 个氧原子计算的离子数																				
T-Si	8.017	8.015	7.995	7.971	8.026	8.020	7.892	7.952	7.922	7.888	7.917	7.994	7.974	7.987	8.012	8.016	8.029	7.982	7.973	
T-Al	0	0	0.005	0.029	0	0	0.108	0.048	0.078	0.112	0.083	0.006	0.026	0.013	0	0	0	0.018	0.027	
C-Al	0.096	0.080	0.086	0.051	0.090	0.13	0.064	0.049	0.080	0.085	0.094	0.091	0.089	0.074	0.085	0.100	0.093	0.116	0.084	
C-Ti	0	0.025	0.001	0.002	0.008	0.003	0.016	0.019	0.021	0.016	0.020	0.004	0.014	0.002	0.006	0.005	0	0.014	0.002	
C-Fe ³⁺	1.326	1.048	1.116	1.199	1.316	1.307	0.360	0.869	0.894	0.479	1.098	1.426	1.335	1.435	1.482	1.571	1.484	1.335	1.621	
C-Mn	0.027	0.027	0.023	0.029	0.021	0.017	0.046	0.040	0.043	0.050	0.039	0.018	0.024	0.014	0.021	0.018	0.019	0.039	0.039	
C-Fe ²⁺	1.077	1.049	0.886	0.995	1.040	1.632	1.822	2.676	1.814	1.916	1.950	1.108	1.025	0.992	0.981	1.204	1.200	1.699	2.080	
C-Mg	2.474	2.771	2.888	2.724	2.522	1.910	2.690	1.347	2.145	2.451	1.799	2.353	2.513	2.478	2.425	2.102	2.204	1.797	1.171	
B-Mg	0.125	0.077	0.076	0.077	0.046	0.101	0.124	0.401	0.218	0.152	0.229	0.130	0.060	0.105	0.075	0.090	0.104	0.144	0.162	
B-Ca	0.336	0.548	0.535	0.522	0.383	0.348	1.297	0.167	0.559	0.960	0.362	0.248	0.341	0.226	0.224	0.136	0.197	0.288	0.085	
B-K	0.048	0.043	0	0	0.073	0.058	0	0	0	0	0	0	0	0	0.035	0.045	0.083	0	0	
B-Na	1.491	1.332	1.389	1.401	1.498	1.493	0.579	1.432	1.223	0.888	1.409	1.622	1.599	1.669	1.666	1.729	1.616	1.568	1.804	
A-Na	0	0	0.010	0.055	0	0	0.121	0.503	0.165	0.235	0.160	0.011	0.050	0.026	0	0	0	0.036	0	
A-K	0.050	0.137	0.181	0.121	0.046	0.026	0.108	0.020	0.120	0.166	0.101	0.091	0.125	0.143	0.072	0.030	0.005	0.076	0.015	
种属	Win	Win	Win	Win	Win	Win	Win	Win	Win	Win	Win	Mg-Rb	Mg-Rb	Mg-Rb	Mg-Rb	Mg-Rb	Mg-Rb	Mg-Rb	Rb	

注：Win—蓝透闪石；Mg-Rb—镁钠闪石；Rb—钠闪石；A、B、C 和 T 为角闪石晶体结构中的 A、B、C 和 T 位置(Leake *et al.*, 1997)。

表 4 华北克拉通北缘黄台少正长岩长石电子探针分析结果

Table 4 Microprobe analysis results of feldspar from the Huangsheshao syenites																				
点号	H31-3.5	H31-3.6	H31-5.5	H31-5.6	H33-3.3	H33-3.5	H33-1.12	H33-1.16	H5-3.5	H5-1.4	H5-1.6	H10-3.3	H10-2.4	H10-1.5	H14-1.6	H14-1.8	H14-2.5	H14-4.3		
SiO ₂	64.76	70.26	64.19	69.30	64.65	68.43	64.41	68.53	69.50	64.43	69.50	64.62	69.57	65.32	69.81	64.43	64.37	69.45		
TiO ₂	0.03	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.02	0.02	-	-		
Al ₂ O ₃	17.87	18.45	17.84	18.89	17.93	19.28	17.78	19.00	19.04	17.73	18.72	17.41	18.81	17.61	18.78	17.35	17.34	18.80		
TFe ₂ O ₃	0.10	0.13	0.08	0.15	0.03	0.22	0.05	0.13	0.20	0.15	0.17	0.25	0.19	0.23	0.23	0.28	0.19	0.22		
MgO	0.02	0.03	0.01	-	-	0.02	-	-	0.01	0.02	0.01	-	0.00	0.01	-	-	0.03	0.01		
CaO	0.01	-	0.03	0.01	-	-	0.01	-	0.03	-	0.03	-	-	-	-	-	-	0.03		
Na ₂ O	0.47	10.58	0.56	10.91	0.34	11.18	0.41	11.46	10.62	0.39	10.57	0.47	10.31	0.39	10.85	0.43	0.24	11.31		
K ₂ O	16.64	0.13	16.28	0.25	16.40	0.20	16.47	0.07	0.15	16.68	0.25	16.59	0.80	16.56	0.21	16.44	16.82	0.19		
NiO	0.01	-	0.04	0.02	-	0.04	0.04	0.02	-	-	-	-	0.01	0.01	0.02	0.02	-	0.05		
总计	99.91	99.59	99.02	99.55	99.35	99.39	99.18	99.22	99.56	99.46	99.26	99.33	99.73	100.18	99.94	98.97	98.99	100.08		
基于 8 个氧原子计算的离子数																				
Si	3.005	3.060	3.003	3.030	3.010	3.004	3.009	3.013	3.032	3.005	3.042	3.017	3.038	3.019	3.038	3.017	3.018	3.027		
Ti ⁴⁺	0.001	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0	0.001	0	0		
Al	0.977	0.947	0.984	0.974	0.984	0.998	0.979	0.985	0.979	0.975	0.966	0.958	0.969	0.960	0.964	0.958	0.959	0.966		
Fe ³⁺	0.004	0.005	0.003	0.006	0.001	0.008	0.002	0.005	0.007	0.006	0.006	0.010	0.007	0.009	0.008	0.011	0.008	0.008		
Mg	0.001	0.002	0	0	0	0.001	0	0	0.001	0.001	0.001	0	0	0.001	0	0	0.002	0.001		
Ca	0.001	0	0.001	0	0	0	0	0	0.001	0	0.001	0	0	0	0	0	0	0.001		
Na	0.042	0.893	0.051	0.925	0.031	0.951	0.037	0.976	0.898	0.035	0.897	0.042	0.873	0.035	0.915	0.039	0.021	0.956		
K	0.985	0.007	0.972	0.014	0.974	0.011	0.982	0.004	0.008	0.993	0.014	0.988	0.044	0.977	0.012	0.982	1.006	0.011		
An	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Ab	4	99	5	99	3	99	4	100	99	3	98	4	95	3	99	4	2	99		
Or	96	1	95	1	97	1	96	0	1	97	2	96	5	97	1	96	98	1		

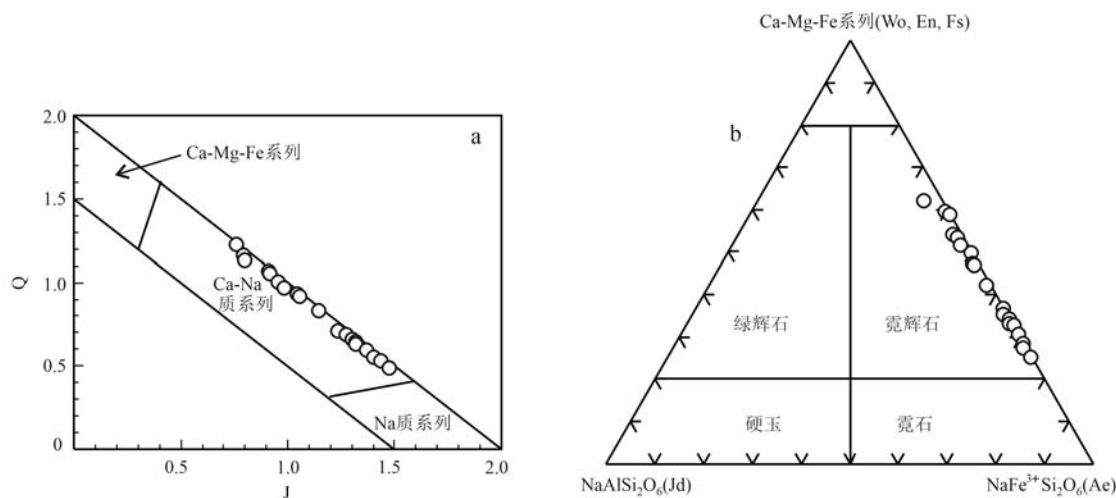


图 5 黄合少正长岩单斜辉石成分分类图解 (据 Morimoto *et al.*, 1988)

Fig. 5 Classification diagrams of clinopyroxene from the Huangheshao syenites (after Morimoto *et al.*, 1988)

a—辉石系列划分图解: $Q = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$, $J = 2 \text{ Na}$ (基于 6 个氧原子计算的离子个数); b—辉石分类图解: Wo—硅灰石;

En—顽火辉石; Fs—斜方铁辉石; Jd—硬玉; Ae—霓石

a—series discrimination diagram of clinopyroxene, $Q = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Fe}^{2+}$, $J = 2 \text{ Na}$ (atoms per formula unit calculated based on 6 oxygens);

b—classification diagram of clinopyroxene; Wo—wollastonite; En—enstatite; Fs—ferrosilite; Jd—jadeite; Ae—aeirine

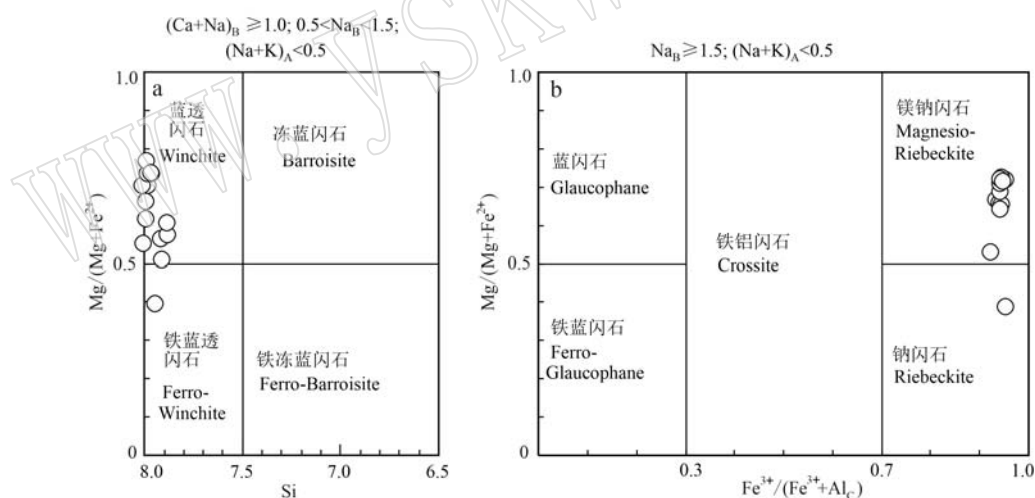


图 6 黄合少正长岩角闪石成分分类图解 (据 Leake *et al.*, 1997)

Fig. 6 Classification diagrams of amphibole from the Huangheshao syenites (after Leake *et al.*, 1997)

a—钠钙质角闪石分类图解; b—钠质角闪石分类图解; 图中横纵坐标为 23 个氧原子计算的离子数或离子数比值

a—classification diagram of sodic-calcic amphibole; b—classification diagram of sodic amphibole; The values of abscissa and ordinate in the figures are the atoms (or their ratios) per formula unit calculated based on 23 oxygens

23.47; Eu 异常不明显, 呈轻微 Eu 负异常或正异常, $\delta\text{Eu} = 0.61 \sim 1.05$ 。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 样品以富集 Rb、Ba、K、Pb、Sr、Zr 和 Hf, 亏损 Nb、Ta 和 Ti 为特征 (图 10b)。为对比研究, 图 10 中也给出了同为钾质碱性岩的古城岩体的 REE 配分模式和微量元素蛛网图分布; 总体上, 古城岩

体具有与黄合少正长岩一致的 REE 及微量元素配分模式。在黄合少正长岩的微量元素对 SiO_2 哈克图解上 (图 11), 相容元素 V、Ni 和 Co 随 SiO_2 含量增加而降低; 这是因为这 3 个元素主要赋存在暗色矿物辉石和角闪石内, 样品的 SiO_2 含量越高, 辉石或角闪石含量就低, V、Ni 和 Co 的含量就降低。

表 5 黄合少正长岩主量($w_B/\%$)和微量、稀土元素($w_B/10^{-6}$)组成

Table 5 Major($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) compositions of the Huangheshao syenites

样号	HH-31	HH-33	HH-5	HH-10	HH-14	HH-3	HH-16	HH-6
SiO ₂	60.44	62.28	64.46	64.02	64.09	64.54	64.96	65.00
TiO ₂	0.37	0.31	0.22	0.02	0.02	0.06	0.06	0.04
Al ₂ O ₃	15.30	16.16	17.42	17.23	17.37	17.80	17.70	18.11
^T Fe ₂ O ₃	2.83	2.18	1.12	1.60	1.26	0.61	0.74	0.55
MnO	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
MgO	0.73	0.46	0.16	0.15	0.13	0.04	0.04	0.09
CaO	3.27	2.42	0.27	0.35	0.23	0.08	0.09	0.11
Na ₂ O	2.91	4.13	2.01	1.65	1.84	1.52	1.60	4.04
K ₂ O	10.28	8.66	12.84	13.62	13.38	13.78	13.55	10.24
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.05	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02
LOI	2.32	1.85	0.23	0.32	0.52	0.39	0.29	0.45
Total	98.65	98.64	98.8	98.99	98.86	98.85	99.05	98.66
σ	9.98	8.48	10.28	11.09	10.98	10.87	10.45	9.27
K ₂ O/Na ₂ O	3.53	2.10	6.39	8.25	7.27	9.07	8.47	2.53
K ₂ O+Na ₂ O	13.19	12.79	14.85	15.27	15.22	15.30	15.15	14.28
Sc	1.75	1.76	0.78	0.40	0.92	0.18	0.17	0.39
Ti	1 751.0	1 847.0	1 389.0	94.5	77.4	378.0	296.0	234.0
V	144.0	132.0	82.3	56.1	41.4	21.8	31.9	20.8
Cr	11.50	6.68	9.61	4.51	3.68	4.52	4.13	5.52
Co	4.71	3.51	1.07	1.23	0.98	0.57	0.89	0.62
Ni	5.66	4.68	3.32	1.75	1.23	0.98	2.48	2.03
Ga	17.6	21.7	28.3	28.6	28.1	24.3	21.3	20.7
Rb	70	62	132	114	120	129	111	82
Sr	835	538	233	135	124	111	109	479
Y	8.35	7.76	4.14	0.58	0.54	0.60	0.80	0.65
Zr	202	134	151	44	66	48	27	45
Nb	42.50	41.90	31.70	3.48	2.73	11.20	12.30	7.35
Cs	0.35	0.47	0.70	0.74	0.69	0.50	0.41	0.57
Ba	1 125	1 106	395	241	261	617	284	1 712
La	19.80	18.10	11.60	0.92	0.68	3.14	4.34	6.07
Ce	36.20	34.70	20.30	2.14	1.66	6.22	7.62	9.65
Pr	4.34	4.01	2.65	0.25		0.65	0.84	0.91
Nd	2.76	2.45	1.56	0.26	0.26	0.64	0.49	1.25
Sm	15.00	13.60	9.05	0.89	0.70	2.20	2.70	2.62
Eu	0.82	0.74	0.42	0.05	<0.05	0.11	0.12	0.17
Gd	1.85	1.75	1.10	0.12	0.09	0.21	0.34	0.29
Tb	0.26	0.22	0.14	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Dy	1.35	1.10	0.70	0.08	0.08	0.12	0.17	0.15
Ho	0.24	0.22	0.13	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Er	0.79	0.68	0.42	0.07	0.06	0.06	0.08	0.07
Tm	0.11	0.09	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Yb	0.66	0.52	0.38	0.11	0.10	<0.05	<0.05	<0.05
Lu	0.10	0.08	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Hf	4.35	3.21	3.40	1.05	1.50	0.97	0.68	1.18
Ta	0.31	0.27	0.44	<0.05	<0.05	0.10	0.09	0.07
Pb	30.60	5.52	4.79	2.76	2.73	5.26	25.4	9.01
Th	3.85	2.72	9.15	0.73	1.73	1.33	1.12	8.29
U	0.86	0.86	1.58	0.22	0.37	0.26	0.31	0.56
ΣREE	84.28	78.26	48.57	4.89	3.63	13.35	16.7	21.18
(La/Yb) _{CN}	20.23	23.47	20.58	5.64	4.58			
δEu	1.05	1.04	0.93	0.76		0.73	0.85	0.61

注: CN 代表球粒陨石标准化, 球粒陨石标准化数据据 Boynton (1984)。

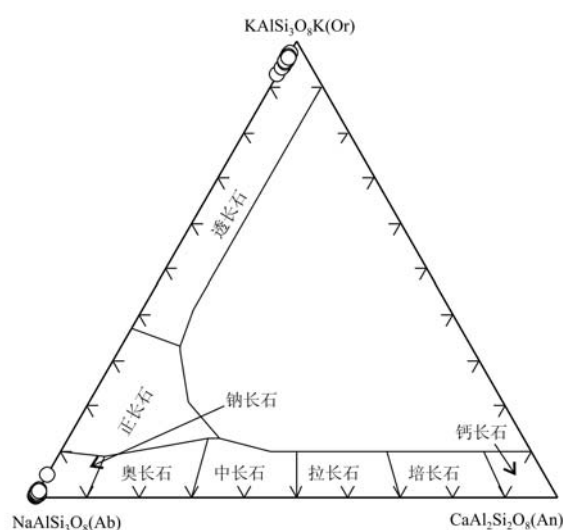
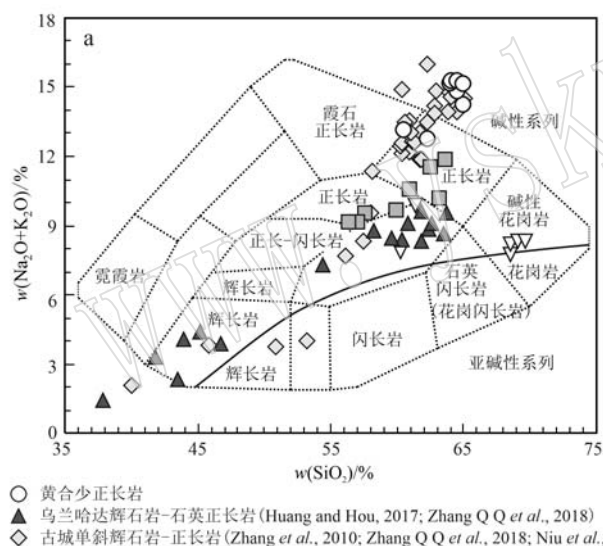


图7 黄合少正长岩长石成分分类图解

Fig. 7 Classification diagrams of feldspar from the Huangheshao syenites



而如图 11 所示, 不相容元素 Ba 和 Th 含量与 SiO_2 含量无相关性; 元素 Sr、La、Nb 和 Zr 总体上随 SiO_2 含量增加而降低, 但相关性不明显。

4.4 全岩 Sr-Nd 同位素组成

黄合少正长岩的 Sr-Nd 同位素组成见表 6。根据锆石 U-Pb 年龄, 采用 417 Ma 进行初始同位素组成的计算。黄合少正长岩样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.704 1~0.706 1, $\varepsilon\text{Nd}(t) = -25.5 \sim -22.1$ 。

5 讨论

5.1 华北克拉通北缘发育晚志留世末-早泥盆世碱性岩浆作用

黄合少正长岩的锆石 U-Pb 加权平均年龄为 417.6 ± 4.7 Ma (MSWD=1.3), 指示岩体侵位于晚志

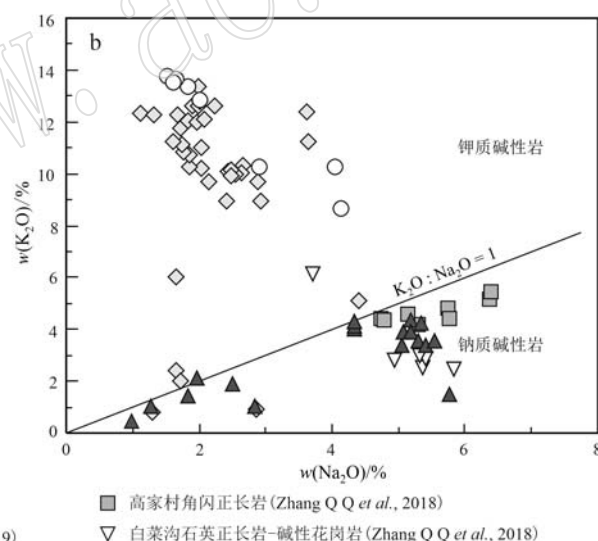


图8 黄合少正长岩及华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世其他代表性碱性岩的分类图解

Fig. 8 Chemical classification diagrams of Huangheshao syenites and other representative Late Silurian to Early Devonian potassic alkaline rocks on the northern margin of the North China Craton

留世末期。除了本文研究的黄合少正长岩, 华北克拉通北缘在晚志留世末-早泥盆世期间还发育其他碱性侵入体, 如: 内蒙古固阳东高家村角闪正长岩 [锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 399 Ma (王惠初等, 2012); 锆石 LA-ICP MS U-Pb 年龄为 396 Ma (Zhang Q Q et al., 2018)]、固阳东白菜沟石英正长岩-二长花岗岩 [锆石 LA-ICP MS U-Pb 年龄为 402~395 Ma (Zhang Q Q et al., 2018)]、四子王旗东古城岩体

(又称三道沟岩体) 碱性长石正长岩和单斜辉石岩 [正长岩锆石 LA-ICP MS U-Pb 年龄为 409~408 Ma 和 401~398 Ma (Zhang et al., 2010, Zhang Q Q et al., 2018); 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 415 Ma (Niu et al., 2021)]、乌兰哈达二长岩-辉石岩 [382~377 Ma (Huang and Hou, 2017; Zhang Q Q et al., 2018)], 水泉沟碱性杂岩体 [锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 390 Ma (罗镇宽等, 2001; Jiang, 2005)]。

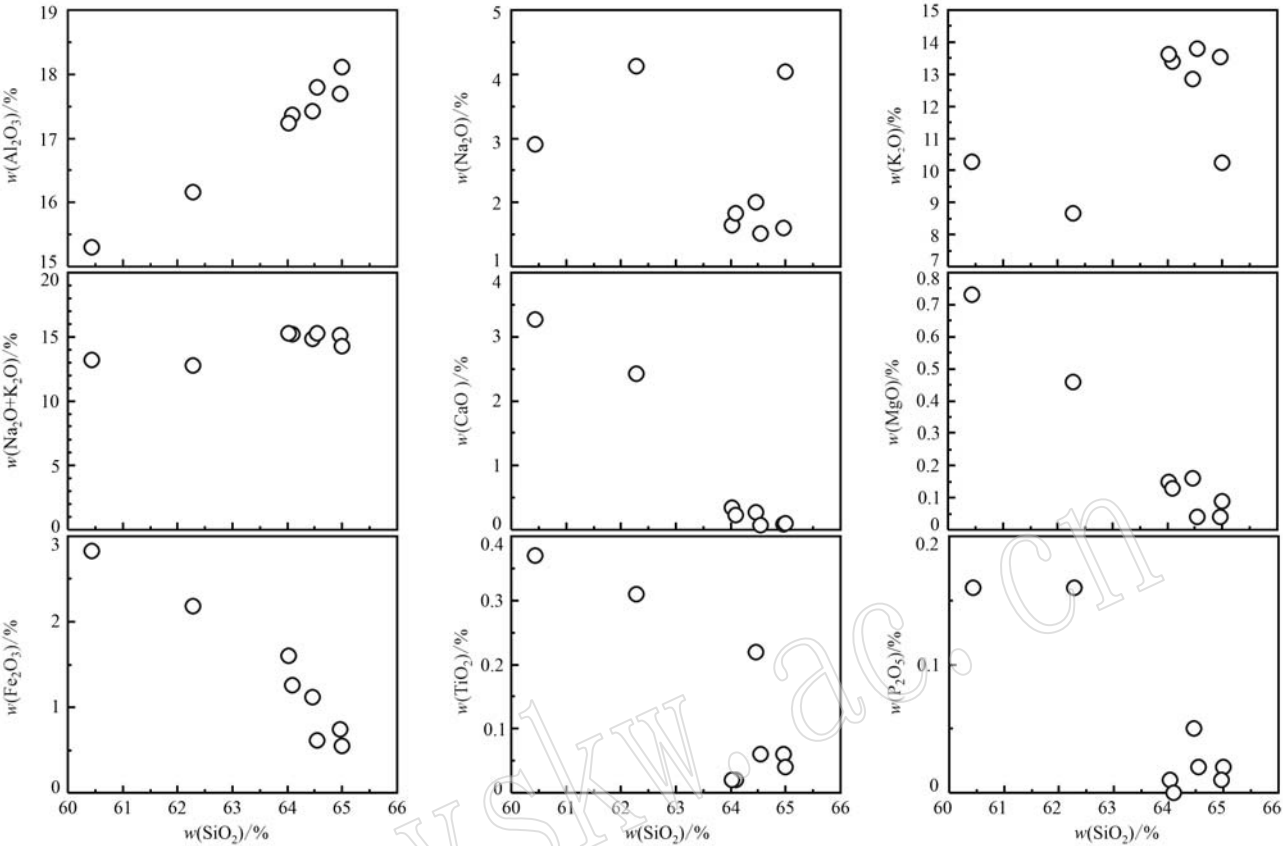


图 9 黄合少正长岩主量元素对 SiO₂ 哈克图解

Fig. 9 Hark diagram of major elements versus SiO₂ contents for the Huangheshao syenites

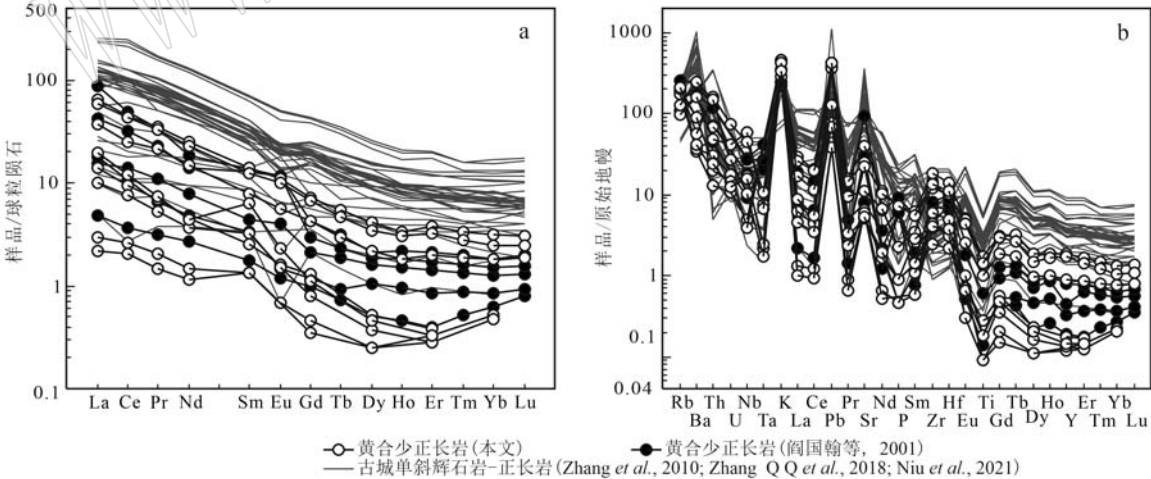


图 10 黄合少正长岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a, 标准化数据据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 10 Chondrite-normalized REE patterns (a, chondrite values are from Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace element diagrams (b, the primitive mantle values are from Sun and McDonough, 1989) for the Huangheshao syenites

这些碱性岩沿华北克拉通北缘自西向东展布 (图 1b), 主要分布于集宁-隆化断裂以北; 侵位时代主要集中在晚志留世末-早泥盆世; 岩石类型以

正长岩为主, 个别岩体见二长岩和单斜辉石岩。其中, 单斜辉石岩常见堆晶结构, 在岩体中呈团块状或条带状产出, 可能形成于母岩浆强烈结晶-分异-

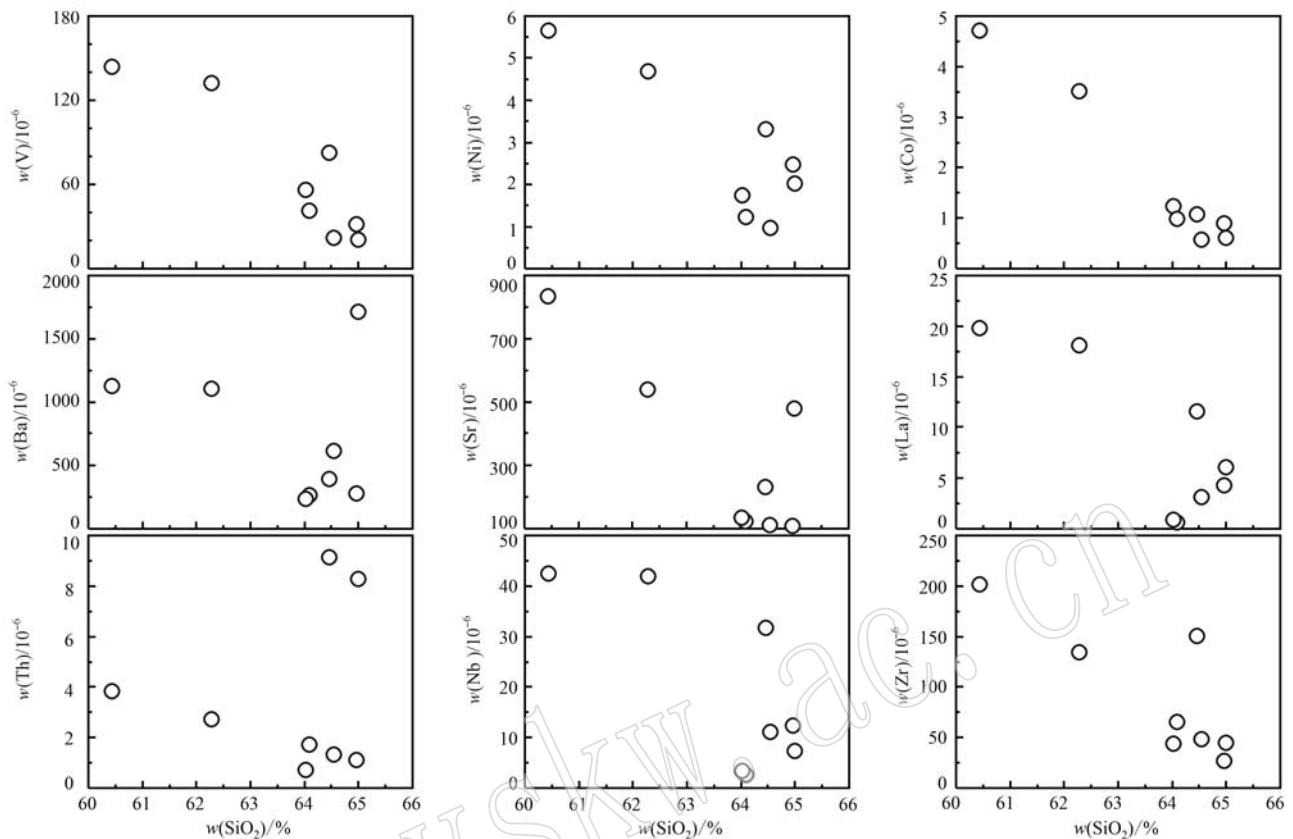
图 11 黄合少正长岩微量元素对 SiO_2 哈克图解Fig. 11 Hark diagram of representative trace elements versus SiO_2 contents for the Huangheshao syenites

表 6 黄合少正长岩体的 Sr-Nd 同位素组成

Table 6 Sr-Nd isotopic compositis of the Huangheshao syenites

样号	$w_B/10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$w_B/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	$\varepsilon\text{Nd}(0)$	$\varepsilon\text{Nd}(t)$	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
	Rb	Sr					Sm	Nd						
HH-31	70.4	835.0	0.238 1	0.707 524	15	0.706 1	2.76	15.00	0.116 7	0.511 112	10	-29.8	-25.5	-0.41
HH-33	61.5	538.0	0.322 9	0.707 912	14	0.706 0	2.45	13.60	0.114 3	0.511 153	7	-29.0	-24.6	-0.42
HH-5	132.0	233.0	1.600 2	0.713 616	15	0.704 1	1.56	9.05	0.109 4	0.511 268	5	-26.7	-22.1	-0.44

堆晶作用(Niu *et al.*, 2021)。

其实,除上述以正长岩为主的碱性岩外,华北克拉通北缘还发育一些其他早泥盆世岩浆岩。在冀北承德地区沿大庙断裂带出露一些主要由辉石岩和角闪岩组成的基性-超基性杂岩体,分布在红石砬、二道沟、下喇叭沁和龙王庙等地,侵位时代集中在 399~382 Ma 之间(Zhang *et al.*, 2009b; Teng *et al.*, 2015);承德北部孤山二长闪长岩,侵位年龄在 390 Ma 左右(Zhang *et al.*, 2007a);在赤峰地区红山、红庙子和鸡冠山等地发育正长花岗岩-正长花岗斑岩,它们具有 A 型花岗岩的成因特征,锆石 U-Pb 年龄分布在 393~377 Ma 之间(Shi *et al.*, 2010; 徐博文

等, 2015; Zhang Q Q *et al.*, 2018)。

上述碱性岩、基性-超基性岩及 A 型花岗岩沿华北克拉通北缘东西向展布,指示华北克拉通北缘在晚志留世末-早泥盆世期间发育了一期与古亚洲洋俯冲相关的岩浆作用,这期岩浆作用的发育,对探讨古亚洲洋与华北克拉通北缘的地质演化至关重要。

5.2 岩浆体系性质

黄合少正长岩的矿物组成及全岩主量元素组成指示其岩浆体系为钾质碱性岩系列。岩石的矿物组合、成分及结晶序列直接受岩浆体系成分和物理化学条件的控制。黄合少岩体主要岩石类型为含辉石

碱性长石正长岩,主要组成矿物为霓辉石和钾长石;出现钠长石、钠钙质和钠质角闪石。钠长石为细粒、他形填隙状发育于中粗粒正长石颗粒之间,指示其为岩浆演化后期的产物;钠钙质和钠质角闪石均长在辉石颗粒内部,为辉石与富钠残余岩浆反应的产物。黄合少正长岩具有较高的全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=12.79\%\sim15.30\%$)和里特曼指数($\sigma=8.48\sim11.09$),较高的 K_2O 含量($8.66\%\sim13.78\%$)和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值($2.10\sim9.07$)。矿物组成和全岩地化数据表明黄合少正长岩为 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-Na}_2\text{O-CaO-FeO}$ 体系。

同带的古城岩体具有与黄合少正长岩相似的矿物组合和元素组成。古城岩体也以含辉石碱性长石正长岩为主,并出现堆晶单斜辉石岩;组成矿物以单斜辉石(透辉石-钙铁辉石-普通辉石)和钾长石为主,钠长石也呈细粒填隙状发育(Niu *et al.*, 2021);也具有较高的全碱含量($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=3.74\%\sim15.36\%$)、里特曼指数($\sigma=1.60\sim10.78$)及 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值($1.19\sim9.36$; Niu *et al.*, 2021);同黄合少正长岩一样,也为钾质碱性岩系列(图8)。

华北克拉通北缘其他晚志留世末-早泥盆世碱性岩体(以高家村角闪正长岩、白菜沟石英正长岩-碱性花岗岩和乌兰哈达石英正长岩为代表; Huang and Hou, 2017; Zhang Q Q *et al.*, 2018)主要组成矿物为斜长石、钾长石、角闪石和单斜辉石;在全岩主量元素组成上,也具有较高的全碱含量和里特曼指数($\sigma=2.35\sim19.01$)。但与黄合少和古城岩体不同的是,这些岩体具有较低的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值($0.26\sim1.09$),为钠质碱性岩系列(图8)。

因此,华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世碱性岩可以分为两类:一类为钾质碱性岩,以古城和黄合少正长岩为代表;一类为钠质碱性岩,以高家村角闪正长岩、白菜沟石英正长岩和乌兰哈达二长岩为代表。

5.3 富集岩石圈地幔源区

如上所述,华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世的碱性岩可以分为钾质碱性岩和钠质碱性岩两类。本文主要探讨以古城和黄合少正长岩为代表的钾质碱性岩的成因。

碱性长石正长岩不是与地幔橄榄岩平衡的熔体,而是经过结晶分异排除更多铁镁组分的残余岩浆,但其岩浆体系性质及元素和同位素组成仍可以提供重要的成因信息(Niu *et al.*, 2012, 2016,

2021)。黄合少正长岩的岩浆体系性质、元素和同位素组成特征支持其母岩浆起源于富集地幔的部分熔融。主要依据如下:

(1) 黄合少正长岩的主要岩石类型为含辉石碱性长石正长岩;同带的古城岩体主要岩石类型除含辉石碱性长石正长岩以外,还发育单斜辉石岩。这两个岩体具有相似的岩浆体系性质和主微量元素组成(图8、图9),均为钾质碱性岩。这样的岩石组成和岩浆体系性质要求岩体起源于地幔。地壳岩石(中基性麻粒岩或片麻岩)部分熔融形成的岩浆通常为闪长质或花岗质(Rapp and Watson, 1995)。

(2) 黄合少正长岩具有富集放射性成因的Sr同位素组成(初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.704\ 1\sim0.706\ 1$)特征。在微量元素对 SiO_2 哈克图解上,随着 SiO_2 含量增加,Sr含量总体呈下降趋势;演化程度最低的样品HH-31(SiO_2 含量最低,为60.44%)的Sr含量(835×10^{-6})远远高于地壳的Sr含量(地壳平均Sr含量为 320×10^{-6} ; Rudnick and Gao, 2003),这表明岩体母岩浆具有远高于地壳的Sr含量,使得岩体的Sr同位素组成对地壳混染不敏感。因此,黄合少岩体的Sr同位素组成可以反映地幔源区的Sr同位素组成,指示源区地幔为富集岩石圈地幔。同样的,古城岩体也具有较高的Sr含量($1\ 591\times10^{-6}\sim4\ 807\times10^{-6}$),其Sr同位素组成(初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.705\ 4\sim0.706\ 3$; Niu *et al.*, 2021)也反映了其源区为富集岩石圈地幔。

(3) 在微量元素组成上,这两个岩体均富集轻稀土元素,富集大离子亲石元素,也支持源区为富集岩石圈地幔。

5.4 俯冲沉积物的地幔交代作用

钾质-超钾质碱性岩通常形成于交代地幔的部分熔融(Foley *et al.*, 1987),越来越多的证据表明源区沉积物和/或碳酸盐交代作用在碱性岩成因中发挥了重要作用(如, Conticelli *et al.*, 2007, 2015; Prelević *et al.*, 2008; Avanzinelli *et al.*, 2009; Tommasini *et al.*, 2011; Niu *et al.*, 2012, 2017; Guo *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014, 2015)。

黄合少和古城岩体的Sr同位素组成也要求其源区地幔发生来自俯冲沉积物的交代作用。山东蒙阴奥陶纪金伯利岩中钙钛矿原位初始Sr同位素组成为0.703 71(Yang *et al.*, 2009),可以代表古生代时华北克拉通岩石圈地幔的Sr同位素组成。如上所述,黄合少和古城这两个岩体的Sr同位素可以

反映其源区岩石圈地幔的 Sr 同位素组成, 其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为 0.704 1~0.706 1 和 0.705 4~0.706 3, 均高于金伯利岩所反映的当时华北克拉通岩石圈地幔的 Sr 同位素比值。此富集放射性成因的 Sr 同位素组成可以由俯冲沉积物对岩石圈地幔的交代作用引起。基于二元简单混合模型 (Langmuir *et al.*, 1978) 模拟计算表明, 约 1%~30% 的俯冲沉积物 [全球俯冲沉积物平均成分 $\text{Sr} = 380 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.718$ (Plank and Langmuir, 1998)] 对华北克拉通古生代岩石圈地幔 [$\text{Sr} = 600 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704$ (郑建平等, 1999; Yang *et al.*, 2009)] 的交代, 即可以成功解释黄合少和古城这两个岩体的 Sr 同位素组成 (也即其源区岩石圈地幔的 Sr 同位素组成) (图 12)。图 12 中, 线 A 为华北克拉通古生代岩石圈地幔 (SCLM; 郑建平等, 1999; Yang *et al.*, 2009) 与全球俯冲沉积物 (GLOSS; Plank and Langmuir, 1998) 的 Sr-Nd 同位素混合趋势线; 线 B~F 为地幔部分熔融形成的熔体与 TTG 片麻岩 (Jahn *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 2000) 二元混合趋势线 (Langmuir *et al.*, 1978): 线 B 为未受俯冲沉积物 (GLOSS) 交代的岩石圈地幔熔体与 TTG 片麻岩二元混合趋势线, 线 C、D、E 和 F 分别为受到 10%、20%、30% 和 40% 俯冲沉积物交代后的地幔部分熔融形成的熔体与 TTG 片麻岩的混合趋势线。各混合端员的 Sr、Nd 含量及同位素比值详见表 7。为比较研究, 图中也给出了同带钾质碱性岩古城岩体的 Sr-

Nd 同位素分布 (Zhang *et al.*, 2010; Zhang Q Q *et al.*, 2018; Niu *et al.*, 2021) 以及亏损地幔 (DM; Rudnick *et al.*, 2004) 和华北克拉通镁铁质下地壳 (张国辉等, 1998; Zhou *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2004) 的 Sr-Nd 同位素组成。此外, 黄合少和古城岩体均具有较高的 Sr、CaO 和 K_2O 含量, 这些元素特征也是源区发生俯冲沉积物交代作用的表现 (Conticelli *et al.*, 2007, 2015; Avanzinelli *et al.*, 2009)。

表 7 Sr-Nd 同位素混合计算过程中各端员参数

Table 7 Parameters used in Sr-Nd modelling calculations

	岩石圈地幔 SCLM	全球俯冲沉积物平均成分 (GLOSS)	岩石圈地幔部分熔融熔体	TTG 片麻岩
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	600	380	1 600	320
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.704	0.718	0.704	0.718
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	8	70	6	35
εNd	-5	-11	-5	-40

注: 表中数据来源 Jahn *et al.*, 1987; Kerr *et al.*, 1996; Plank and Langmuir, 1998; 郑建平等, 1999; Yang *et al.*, 2009; Niu *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2000。

古生代以来, 华北克拉通北缘的构造岩浆演化与古亚洲洋的地质演化密切相关。黄合少和古城正长岩的成因表明, 在早古生代时即存在古亚洲洋板片向华北克拉通下的俯冲; 俯冲板片及上覆沉积物会发生部分熔融, 形成的熔体和/或流体交代上部岩石圈地幔, 会形成含金云母/角闪石、单斜辉石等交代矿物的脉体 (McInnes and Cameron, 1994)。Foley (1992) 提出“脉体+围岩”熔融模型来解释钾质碱性岩的成因, 认为岩浆是由来自脉体熔融形成的熔体和来自围岩熔融形成的熔体不同程度混合而成, 以脉体为主部分熔融形成的岩浆通常为超钾质碱性岩。黄合少和古城正长岩为钾质-超钾质碱性岩, 可以用中等或较高的脉体/围岩熔融比例来解释。

黄合少和古城正长岩均具有变化范围较大且富集非放射性成因的 Nd 同位素组成, 黄合少正长岩 $\varepsilon\text{Nd}(t) = -25.5 \sim -22.1$ (表 6), 古城正长岩的 $\varepsilon\text{Nd}(t) = -23.4 \sim -10.1$ (Niu *et al.*, 2021), 这可能是岩浆在侵位过程中遭受 TTG 片麻岩的混染引起的。

不同于 Sr 元素, 黄合少正长岩的 Nd 含量较低 ($0.26 \times 10^{-6} \sim 2.76 \times 10^{-6}$; 表 5), 这使得其 Nd 同位素组成极易受到地壳混染的影响。华北克拉通基底岩石主要由前寒武 TTG 片麻岩、基性麻粒岩/角闪岩组成 (Jahn *et al.*, 1987; Liu S W *et al.*, 2000; Zhou

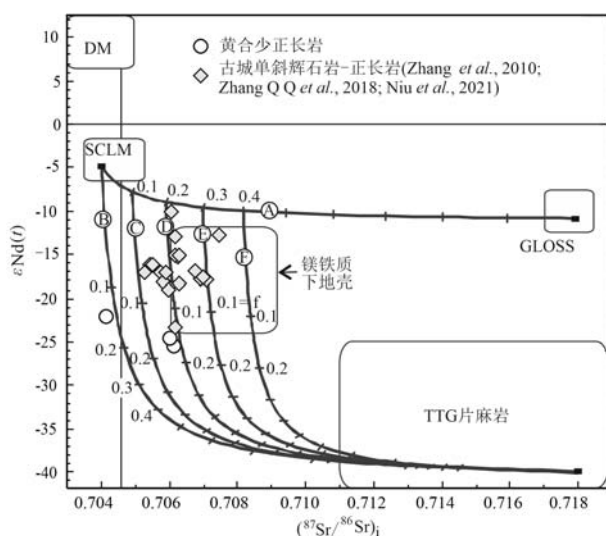


图 12 黄合少正长岩的 Sr-Nd 同位素组成

Fig. 12 Sr-Nd isotopic compositions of the Huangheshao syenites

et al., 2002; Liu Y S *et al.*, 2004)。基性麻粒岩/角闪岩的 Nd 同位素组成 ($\varepsilon\text{Nd} = -24 \sim -12$; 张国辉等, 1998; Zhou *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2004) 与古城正长岩相似, 但较黄合少正长岩更为富集放射性成因同位素, 因此, 黄合少和古城正长岩的 Nd 同位素组成不可能由基性麻粒岩或角闪岩的混染引起。而 TTG 片麻岩具有较低的 Nd 同位素组成 ($\varepsilon\text{Nd} = -44 \sim -25$; Jahn *et al.*, 1987; Liu *et al.*, 2000), 少量 TTG 片麻岩的混染即可引起岩浆体系 Nd 同位素的明显变化。二元简单混合 (Langmuir *et al.*, 1978) 模拟计算表明, 分别 10%~15% 和 1%~10% 左右 TTG 片麻岩的混染即可解释黄合少正长岩和古城正长岩的 Nd 同位素组成 (图 12)。

5.5 构造背景及区域地质演化

一般认为, 寒武纪至早奥陶世之前, 华北克拉通北缘为被动陆缘; 中晚奥陶世时, 华北克拉通北缘已演化为活动陆缘 (Wang and Liu, 1986; Yue *et al.*, 2001; Xiao *et al.*, 2003; Miao *et al.*, 2007)。早奥陶世时, 古亚洲洋内发育北向洋内俯冲作用, 形成乌兰岛弧 (Xiao *et al.*, 2003); 随着俯冲作用的进行, 此岛弧与华北克拉通北缘发生碰撞, 导致了乌兰岛弧增生到华北克拉通之上, 形成了由俯冲增生杂岩和蛇绿岩序列组成的乌兰岛弧杂岩 (Xiao *et al.*, 2003; Wilhem *et al.*, 2012)。此弧-陆碰撞之后, 新的南向俯冲作用开始发生, 导致华北克拉通北缘开始处于安第斯型活动陆缘构造阶段, 发育了中奥陶世-早志留世白乃庙陆弧岩浆以及温都尔庙增生杂岩 (Wang and Liu, 1986; Yue *et al.*, 2001; Xiao *et al.*, 2003)。但 Zhang 等 (2014) 研究发现, 白乃庙弧岩浆岩的基底具有塔里木或扬子克拉通属性, 与华北克拉通基底性质不一致; 白乃庙弧岩浆岩带是通过弧-陆碰撞增生到华北克拉通北缘的, 并非是发育在华北克拉通之上的陆弧岩浆, 认为古亚洲洋向华北克拉通下的俯冲始于石炭纪。

如上文所述, 华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世钾质碱性岩的发育, 要求在岩体形成之前, 即早-中志留世或晚奥陶世时便发育古亚洲洋板片向华北克拉通下的俯冲; 俯冲板片 (及上覆沉积物) 相关熔体或流体对岩石圈地幔进行交代, 形成含金云母/角闪石、单斜辉石等交代矿物脉体的易熔地幔。实际上, 温都尔庙群奥陶纪-志留纪高 p/T 变质作用以及华北克拉通北缘弧前和弧后盆地的发育, 也被认为与古生代期间古亚洲洋向华北克拉通下的

俯冲作用相关 (Tang and Yan, 1993; De *et al.*, 2006; Xu *et al.*, 2013, 2015; Zhang J R *et al.*, 2018)。

晚志留世时, 华北克拉通北缘的地质演化被一次构造事件所影响, 表现为白乃庙弧岩浆岩和温都尔庙增生杂岩被浅海碎屑沉积岩不整合覆盖 (Wang and Liu, 1986; Shao, 1989; Yue *et al.*, 2001; Xiao *et al.*, 2003), 意味着古亚洲洋向华北克拉通俯冲相关的地质作用已不再活跃。但是, 自石炭纪到二叠纪, 华北克拉通北缘继续发育大量的陆弧岩浆作用 (Zhang *et al.*, 2007b, 2009a, 2016; 张拴宏等, 2010; Ma *et al.*, 2013), 表明晚志留世时古亚洲洋向华北克拉通下的俯冲作用只是暂时性的中断 (Wilhem *et al.*, 2012), 自石炭纪开始, 俯冲作用又重新启动。

实际上, 晚志留世时, 不仅华北克拉通北缘, 中亚造山带兴蒙地区也经历了一次明显的构造事件。在内蒙古达茂旗巴特敖包附近, 发育志留系西别河组与奥陶系火山岩的不整合 (Zhang and Tang, 1989; Rong *et al.*, 2001; Johnson *et al.*, 2001); 在苏尼特左旗-锡林浩特一带, 志留系磨拉石不整合于早期花岗质岩体之上 (Zhang and Tang, 1989), 表明在晚志留世末之前曾发生过一次区域上较强烈的造山或地壳运动 (Tang, 1990; 石玉若等, 2014)。

导致晚志留世时古亚洲洋向华北克拉通下俯冲作用中断的构造事件, 学者们普遍认为是古亚洲洋上的某微陆块与华北克拉通北缘在此时发生了碰撞拼贴; Yue 等 (2001) 提出苏尼特 (或锡林浩特) 微陆块与华北克拉通发生了碰撞; Jian 等 (2008) 认为图林凯岛弧增生到巴特微陆块上; Wilhem 等 (2012) 从全球板块构造角度的空间及动力学研究认为, 志留纪时哈萨克斯坦陆块和华北克拉通位置很接近, 可能发生了哈萨克斯坦与华北克拉通的斜碰撞。也有部分学者认为, 古亚洲洋在晚志留世末 (泥盆纪之前) 已发生了闭合 (Xu *et al.*, 2013, 2015; Chen *et al.*, 2015; Zhang J R *et al.*, 2018)。

不论是上述哪种构造过程, 可以确定的是, 华北克拉通北缘在晚志留世末期至早泥盆世时处于碰撞后伸展地球动力学背景下, 从而导致被俯冲沉积物交代的、含金云母/角闪石和单斜辉石等交代矿物的易熔岩石圈地幔发生部分熔融, 形成了以黄合少和古城正长岩为代表的碱性岩带。

除了本文研究的晚志留世末-早泥盆世这期碱

性岩,在华北克拉通北缘还发育一期晚三叠世钾质-超钾质碱性岩,分布于集宁-隆化断裂以南(图1b),也呈东西向带状展布,自西向东代表性岩体有:内蒙古包头东霞石正长岩(214 Ma; Zhang *et al.*, 2012; 牛晓露等, 2016)、凉城正长岩(227 Ma; 未发表数据)、山西大同煌斑岩(229 Ma; Niu *et al.*, 2017)、河北姚家庄超镁铁岩-正长岩杂岩体(209 Ma; 陈斌等, 2013)、矾山超镁铁岩-正长岩杂岩体(225~218 Ma; 任荣等, 2009; Niu *et al.*, 2012)、辽西凌源河坎子霞石正长岩(226~224 Ma; Yang *et al.*, 2012)、辽东赛马-柏林川正长岩(233 Ma; 吴福元等, 2005)。与晚志留世末-早泥盆世碱性岩相比,晚三叠世碱性岩更为富钾贫硅,多为二氧化硅不饱和过碱性岩,未受明显地壳混染或混染程度极低(Niu *et al.*, 2012, 2017; 陈斌等, 2013; 牛晓露等, 2016)。研究表明这些碱性岩形成于含金云母/角闪石-单斜辉石富集地幔的低程度部分熔融,源区地幔受到了来自古亚洲洋俯冲板片(及上覆沉积物,包括碳酸盐)相关熔体/流体的交代作用(Yang *et al.*, 2012; Niu *et al.*, 2012, 2017; 陈斌等, 2013; Hou *et al.*, 2015; 牛晓露等, 2016)。这套三叠纪钾质-超钾质碱性岩的发育,指示华北克拉通北缘此时已处于强烈伸展构造动力学背景中,为中亚造山带各块体最终拼贴完成之后的陆内伸展演化阶段。

碱性岩一般多在构造旋回的晚期阶段形成(Faure, 2001),华北克拉通北缘两期钾质碱性岩的发育,指示古亚洲洋与华北克拉通北缘相互作用过程中可能存在两个构造旋回。综合本文发现及前人关于古亚洲洋演化及华北克拉通北缘岩浆岩相关研究成果,认为古亚洲洋与华北克拉通北缘的相互作用可能经历了如下过程:

(1) 奥陶纪-泥盆纪构造旋回:奥陶纪时,由于乌兰岛弧增生拼贴到华北克拉通北缘,启动了古亚洲洋向华北克拉通下的俯冲;晚志留世时,古亚洲洋上的微陆块拼贴碰撞到华北克拉通北缘,导致俯冲作用暂停;晚志留世末-早泥盆世时,华北克拉通北缘处于碰撞后伸展构造环境,导致被俯冲沉积物交代的岩石圈地幔发生部分熔融,从而发育晚志留世末-早泥盆世碱性岩。

(2) 石炭纪-三叠纪构造旋回:石炭纪时,古亚洲洋向华北克拉通下的俯冲作用重新启动,导致克拉通北缘发育大量安第斯型陆弧岩浆;晚二叠世-早三叠世时,古亚洲洋闭合,华北克拉通与蒙古陆

块沿索伦缝合带最终碰撞缝合;晚三叠世时,华北克拉通北缘进入陆内强烈伸展演化阶段,发育晚三叠世钾质-超钾质碱性岩。

6 结论

(1) 华北克拉通北缘发育一期晚志留世末-早泥盆世碱性岩岩浆作用;在岩浆体系性质上,这套碱性岩分为两类:一类为钾质碱性岩,以古城和黄金少正长岩为代表;一类为钠质碱性岩,以高家村角闪正长岩、白菜沟石英正长岩和乌兰哈达二长岩为代表。

(2) 华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世钾质碱性岩起源于被俯冲沉积物交代的富集岩石圈地幔源区,在侵位过程中,普遍受到地壳物质不同程度的混染。

(3) 华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世钾质碱性岩的发育,指示在古生代期间,发育古亚洲洋板片向华北克拉通下的俯冲,俯冲相关物质对上覆岩石圈地幔进行交代;晚志留世末期-早泥盆世时,由于微陆块的碰撞拼贴,华北克拉通北缘暂时处于碰撞后伸展演化阶段。

(4) 华北克拉通北缘晚志留世末-早泥盆世及晚三叠世两期碱性岩的发育,指示古亚洲洋与华北克拉通北缘相互作用过程中可能存在两个构造旋回:奥陶纪-泥盆纪期间的大洋俯冲-微陆块碰撞-克拉通北缘区域伸展(晚志留世末-早泥盆世碱性岩发育)构造旋回;石炭纪-三叠纪期间的大洋俯冲-陆陆碰撞-克拉通北缘陆内强烈伸展(晚三叠世碱性岩发育)。

致谢 中国地质科学院地质研究所唐索寒研究员和离子探针中心车晓超在 Sr-Nd 同位素分析测试和锆石定年相关工作中给予了指导和帮助;两位审稿专家对论文进行了细致认真的审阅,并提出了宝贵的建设性修改意见,在此一并表示衷心感谢!

References

- Avanzinelli R, Lustrino M, Mattei M, *et al.* 2009. Potassic and ultrapotassic magmatism in the circum-Tyrrhenian region: Significance of carbonated pelitic vs. pelitic sediment recycling at destructive plate margins[J]. *Lithos*, 113: 213~217.

- Bai D H, Zhang L and Kong X R. 1993a. A magnetotelluric study of the Paleozoic collision zone in the east of Inner Mongolia, I: Observations and data analysis[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 36: 326~336.
- Bai D H, Zhang L and Kong X R. 1993b. A magnetotelluric study of the Paleozoic collision zone in the east of Inner Mongolia, II: Two-dimensional modelling[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 36: 773~783.
- Banerjee S and Matin A. 2013. Evolution of microstructures in Precambrian shear zones: An example from eastern India[J]. *Journal of Structural Geology*, 50: 199~208.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the earth elements: Meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*[C]. New York: Elsevier, 63~114.
- Chen B, Jahn B M and Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotopic compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 34(3): 245~257.
- Chen B, Jahn B M, Wilde S, *et al.* 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 328: 157~182.
- Chen B, Niu X L, Wang Z Q, *et al.* 2013. Geochronology, petrology, and geochemistry of the Yaojiazhuang ultramafic-syenitic complex from the North China Craton[J]. *Science China Earth Science*, 56: 1 294~1 307.
- Chen Y P, Wei C J, Zhang J R, *et al.* 2015. Metamorphism and zircon U-Pb dating of garnet amphibolite in the Baoyintu Group, Inner Mongolia[J]. *Science Bulletin*, 60(19): 1 698~1 707.
- Conticelli S, Avanzinelli R, Ammannati E, *et al.* 2015. The role of carbon from recycled sediments in the origin of ultrapotassic igneous rocks in the Central Mediterranean[J]. *Lithos*, 232: 174~190.
- Conticelli S, Carlson R W, Widom E, *et al.* 2007. Chemical and isotopic composition (Os, Pb, Nd, and Sr) of Neogene to Quaternary calc-alkalic, shoshonitic, and ultrapotassic mafic rocks from the Italian peninsula: Inferences on the nature of their mantle sources [A]. Beccaluva L, Bianchini G and Wilson M. *Cenozoic Volcanism in the Mediterranean Area*[C]. Geological Society of America Special Paper, 418: 171~202.
- De J K, Xiao W J, Windley B F, *et al.* 2006. Ordovician $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phengite ages from the blueschist-facies Ondor Sum subduction-accretion complex (Inner Mongolia) and implications for the Early Paleozoic history of continental blocks in China and adjacent areas [J]. *American Journal of Science*, 306: 799~845.
- Faure G. 2001. *Origin of igneous rocks: The isotopic evidence*[J]. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 281~349.
- Foley S F. 1992. Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas[J]. *Lithos*, 28: 435~453.
- Foley S F, Venturelli G, Green D H, *et al.* 1987. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models[J]. *Earth-Science Reviews*, 24: 81~134.
- Gong Mi, Cai Jianhui, Yan Guohan, *et al.* 2019. Petrogeochemical characteristics and zircon SHRIMP U-Pb ages of the alkaline intrusions on northern side of the Yinshan Mountains-Yanshan Mountains and their tectonic significances[J]. *Geological Review*, 65(4): 894~915(in Chinese with English abstract).
- Guo P Y, Niu Y L and Yu X H. 2014. A synthesis and new perspective on the petrogenesis of kamafugites from West Qinling, China, in a global context[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 79: 86~96.
- Hou T, Zhang Z C, Keiding J K, *et al.* 2015. Petrogenesis of the ultrapotassic Fanshan intrusion in the North China Craton: Implications for lithospheric mantle metasomatism and the origin of apatite ores [J]. *Journal of Petrology*, 56: 893~918.
- Huang D L and Hou Q Y. 2017. Devonian alkaline magmatism in the northern North China Craton: Geochemistry, SHRIMP zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Geoscience Frontiers*, 8: 171~181.
- Jahn B M, Auvray B, Cornichet J, *et al.* 1987. 3.5 Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrography, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 34: 311~346.
- Jahn B M and Ernst W G. 1990. Late Archean Sm-Nd isochron age for mafic-ultramafic supracrustal amphibolites from the northeastern Sino-Korean Craton, China[J]. *Precambrian Research*, 46: 295~306.
- Jian P, Liu D Y and Kröner A. 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth [J]. *Lithos*, 101: 233~259.
- Jiang N. 2005. Petrology and geochemistry of the Shuiquangou syenitic complex, northern margin of the North China Craton[J]. *Journal of the Geological Society*, 162: 203~215.
- Johnson M E, Rong J Y, Wang C Y, *et al.* 2001. Continental island from the Upper Silurian (Ludfordian Stage) of Inner Mongolia: Implications for eustasy and paleogeography[J]. *Geology*, 29(10): 955~958.
- Kerr A C, Tarney J, Marriner G F, *et al.* 1996. The geochemistry and petrogenesis of the late cretaceous picrites and basalts from Curaçao, Netherland Antilles: A remnant of an oceanic plateau[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 124: 29~43.
- Khain E V, Bibikova E V, Kröner A, *et al.* 2002. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 199: 311~325.
- Kröner A, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2007. Accretionary growth

- and crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian~Nubian shield[A]. Hatcher R D, Carlson M P, McBride J H, *et al.* 4-D Framework of Continental Crust[C]. Geological Society of America, Memoir, 200: 181~209.
- Langmuir C H, Vocke Jr R D, Hanson G N, *et al.* 1978. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 37: 380~392.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles; Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on New Minerals and Mineral Names[J]. *Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 26: 207~224.
- Liu D, Zhao Z D, Zhu D C, *et al.* 2014. Postcollisional potassic and ultrapotassic rocks in southern Tibet: Mantle and crustal origins in response to India-Asia collision and convergence[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 207~231.
- Liu D, Zhao Z D, Zhu D C, *et al.* 2015. Identifying mantle carbonatite metasomatism through Os-Sr-Mg isotopes in Tibetan ultrapotassic rocks[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 430: 458~469.
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. *Geology*, 20: 339~342.
- Liu S W, Liang H H, Zhao G C, *et al.* 2000. Isotopic geochronology and geological events of early Precambrian complexes in Taihangshan [J]. *Science in China (Series D)*, 30: 18~24.
- Liu Y S, Gao S, Yuan H L, *et al.* 2004. U-Pb zircon ages and Nd, Sr and Pb isotopic of lower crustal xenoliths from North China; insights on evolution of the lower continental crust[J]. *Chemical Geology*, 211: 87~109.
- Luo Zhenkuan, Miao Laicheng, Guan Kang, *et al.* 2001. SHRIMP chronological study of Shuiquangou intrusive body in Zhangjiakou Area, Hebei Province and its geochemical significance[J]. *Geochimica*, 30(2): 116~122(in Chinese with English abstract).
- Ma X, Chen B, Chen J F, *et al.* 2013. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemical, Sr-Nd isotopic, and in-situ Hf isotopic data of the Late Carboniferous-Early Permian plutons in the northern margin of the North China Craton[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 56: 126~144.
- McInnes B I A and Cameron E M. 1994. Carbonated, alkaline hybridizing melts from a sub-arc environment: Mantle wedge samples from the Tabar-Lihir-Tanga-Feni arc, Papua New Guinea[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 122: 125~141.
- Miao L, Fan W, Liu D, *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 32: 348~370.
- Miao L, Zhang F, Fan W M, *et al.* 2007. Phanerozoic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt in North China: Constraints from geochronology of ophiolites and associated formations [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 280: 223~237.
- Morimoto N, Fabries J, Ferguson A K, *et al.* 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. *American Mineralogist*, 52: 535~550.
- Mu Baolei and Yanguohan, 1992. Geochemistry of Triassic alkaline or subalkaline igneous complexes in the Yan-Liao area and their significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 66: 108~121 (in Chinese with English abstract).
- Niu X L, Chen B, Feng G Y, *et al.* 2017. Origin of Lamprophyres from the northern margin of the North China Craton: Implications for mantle metasomatism[J]. *Journal of the Geological Society*, 174: 353~364.
- Niu X L, Chen B, Liu A K, *et al.* 2012. Petrological and Sr-Nd-Os isotopic constraints on the origin of the Fanshan ultrapotassic complex from the North China Craton[J]. *Lithos*, 149: 146~158.
- Niu X L, Yang J S, Liu F, *et al.* 2016. Origin of Baotoudong syenites in North China Craton: Petrological, mineralogical and geochemical Evidence[J]. *Science China Earth Science*, 59: 95~110.
- Niu X L, Yildirim D, Liu F, *et al.* 2021. Early Devonian ultrapotassic magmatism in the North China Craton: Geochemical and isotopic evidence for subcontinental lithospheric mantle metasomatism by subducted sediment-derived fluids[J]. *Geological Magazine*, 158: 158~174.
- Plank T and Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. *Chemical Geology*, 145: 325~394.
- Prelević D, Foley S F, Romer R, *et al.* 2008. Mediterranean Tertiary lamproites derived from multiple source components in postcollisional geodynamics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 2125~2156.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36: 891~931.
- Ren Rong, Mu Baolei, Han Baofu, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Fanshan potassic alkaline ultramafite-syenite complex in Hebei Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 588~594(in Chinese with English abstract).
- Rong J Y, Johnson M E, Baarli B G, *et al.* 2001. Continental island from the Upper Silurian (Ludlow) Sino-Korean plate[J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(3): 238~241.
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the continental crust[A]. Holland H D and Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*[C]. Oxford: Elsevier-Perigamon, 3: 1~64.

- Rudnick R L, Gao S, Ling W L, *et al.* 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China craton[J]. *Lithos*, 77: 609~637.
- Şengör A M C and Natal'in B A. 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis [A]. Yin A and Harrison T M. *The Tectonic Evolution of Asia*[C]. Cambridge: Cambridge University Press, 486~641.
- Shao J. 1989. Continental crust accretion and tectono-magmatic activity at the northern margin of the Sino-Korean plate[J]. *Journal of South-east Asian Earth Sciences*, 3: 57~62.
- Shi Y R, Liu D Y, Miao L C, *et al.* 2010. Devonian A-type granitic magmatism on the northern margin of the North China Craton: SHRIMP U-Pb zircon dating and Hf isotopes of the Hongshan granite at Chifeng, Inner Mongolia, China[J]. *Gondwana Research*, 17: 632~641.
- Shi Yuruo, Liu Cui, Deng Jinfu, *et al.* 2014. Geochronological frame of granitoids from Central Inner Mongolia and its tectonomagmatic evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3 155~3 171(in Chinese with English abstract).
- Song S G, Wang M M, Xu X, *et al.* 2015. Ophiolites in the Xing'an-Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events[J]. *Tectonics*, 34: 2 221~2 248.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313~345.
- Tang K D. 1990. Tectonic development of the Paleozoic foldbelts on the northern margin of the Sino-Korean craton[J]. *Tectonics*, 9: 249~260.
- Tang K and Yan Z. 1993. Regional metamorphism and tectonic evolution of the Inner Mongolian suture zone[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 511~522.
- Tang Suohan, Li Jin, Liang Xirong, *et al.* 2017. Reference material preparation of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotope ratio [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(2): 163~170(in Chinese with English abstract).
- Tang Yanjie, Zhang Hongfu and Ying Jifeng. 2014. Genetic significance of Triassic alkali-rich intrusive rocks in the Yinshan and neighboring areas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2 031~2 040(in Chinese with English abstract).
- Teng X M, Yang Q Y and Santosh M. 2015. Devonian magmatism associated with arccontinent collision in the northern North China Craton: Evidence from the Longwangmiao ultramafic intrusion in the Damiao area[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 113: 626~643.
- Tommasini S, Avanzinelli R and Conticelli S. 2011. The Th/La and Sm/La conundrum of the Tethyan realm lamproites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 469~478.
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Ren Peng, *et al.* 2017. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton: Asynthesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1 405~1 419(in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Xiang Zhenqun, Zhao Fengqing, *et al.* 2012. The alkaline plutons in eastern part of Guyang County, Inner Mongolia: Geochronology, petrogenesis and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 843~2 854(in Chinese with English abstract).
- Wang Q and Liu X. 1986. Paleoplate tectonics between Cathaysia and Angaraland in Inner Mongolia of China[J]. *Tectonics*, 5: 1 073~1 088.
- Wei C J, Qian J H and Zhou X W. 2014. Paleoproterozoic crustal evolution of the Hengshan-Wutai-Fuping region, North China Craton[J]. *Geoscience Frontiers*, 5: 485~497.
- Wilhem C, Windley B F and Stampfli G M. 2012. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review [J]. *Earth-Science Reviews*, 113: 303~341.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe, applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes[A]. McKibben M A, Shanks W C and Ridley W I. *Reviews in Economic Geology*, vol. 7: Application of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes [C]. Littleton, Colorado: Society of Economic Geologists, 1~35.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 31~47.
- Wu Fuyuan, Yang Jinhui and Liu Xiaoming. 2005. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 305~317(in Chinese with English abstract).
- Xiao W, Song D, Windley B F, *et al.* 2020. Accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt: Advances and perspectives[J]. *Science China Earth Sciences*, 63(3): 329~361.
- Xiao W, Windley B F, Allen M B, *et al.* 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 316~1 341.
- Xiao W, Windley B F, Hao J, *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22: 1 069.
- Xiao W, Windley B F, Sun S, *et al.* 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Orocines, sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 477~507.
- Xiao W J, Mao Q G, Windley B F, *et al.* 2010. Paleozoic multiple ac-

- cretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage [J]. *American Journal of Science*, 310: 1 553~1 594.
- Xiao W J, Windley B F, Yuan C, *et al.* 2009. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids [J]. *American Journal of Science*, 309: 221~270.
- Xu B, Charvet J, Chen Y, *et al.* 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): Framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 342~1 364.
- Xu B, Zhao P, Wang Y Y, *et al.* 2015. The pre-Devonian tectonic framework of Xing'an-Mongolia orogenic belt (XMOB) in north China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 183~196.
- Xu Bowen, Xi Aihua, Ge Yuhui, *et al.* 2015. Zircon U-Pb ages of the Late Paleozoic A-type granites in Chifeng, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 58~69(in Chinese with English abstract).
- Yan G H, Mu B L, Xu B L, *et al.* 1999. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area; Their chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implication[J]. *Science in China (Series D)*, 42: 582~587.
- Yan Guohan, Tan Linkun, Xu Baoliang, *et al.* 2001. Petrogeochemical characteristics of Indosinian alkaline intrusions in Yinshan area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 281~292(in Chinese with English abstract).
- Yang J H, Sun J F, Zhang M, *et al.* 2012. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern margin North China Craton related to post-collisional and intraplate extension[J]. *Chemical Geology*, 328: 149~167.
- Yang Y H, Wu F Y, Wilde S A, *et al.* 2009. In situ perovskite Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton[J]. *Chemical Geology*, 264: 24~42.
- Ying J F, Zhang H F, Sun M, *et al.* 2007. Petrology and geochemistry of Zijinshan alkaline intrusive complex in Shanxi Province, western North China Craton: Implication for magma mixing of different sources in an extensional regime[J]. *Lithos*, 98: 45~66.
- Yu Xuehui, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, *et al.* 2004. Trace elements, REE and Sr, Nd, Pb isotopic geochemistry of Cenozoic Kamafugite and carbonatite from west Qinling, Gansu province; Implications of plume-lithosphere interaction[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 483~494(in Chinese with English abstract).
- Yue Y, Liou J and Graham S A. 2001. Tectonic correlation of Beishan and Inner Mongolia orogens and its implications for the palinspastic reconstruction of North China[J]. *Memoir of the Geological Society of America*, 194: 101~116.
- Zhai Mingguo. 2019. Tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 722~745(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guohui, Zhou Xinhua, Sun Min, *et al.* 1998. Sr, Nd and Pb isotopic characteristics of granulite and pyroxenite xenoliths in Hannuoba basalts, Hebei Province, and their implications for geological processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14: 190~197(in Chinese with English abstract).
- Zhang J R, Wei C J and Chu H. 2018. Multiple metamorphic events recorded in the metamorphic terranes in central Inner Mongolia, Northern China: Implication for the tectonic evolution of the Xing'an-Inner Mongolia Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 167: 52~67.
- Zhang Q Q, Zhang S H, Zhao Y, *et al.* 2018. Devonian alkaline magmatic belt along the northern margin of the North China Block: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Lithos*, 302~303: 496~518.
- Zhang S H, Zhao Y, Kröner A, *et al.* 2009a. Early Permian plutons from the northern North China Block: Constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1 441~1 467.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu J M, *et al.* 2016. Different sources involved in generation of continental arc volcanism: The Carboniferous-Permian volcanic rocks in the northern margin of the North China block[J]. *Lithos*, 240~243: 382~401.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu X C, *et al.* 2009b. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic-ultramafic complexes from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle[J]. *Lithos*, 110: 229~246.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, *et al.* 2007a. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan diorite pluton on the northern margin of the North China Block and its tectonic implications[J]. *Geological Magazine*, 144: 553~568.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, *et al.* 2007b. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China Block: Implications for a Late Paleozoic active continental margin[J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 451~463.
- Zhang S H, Zhao Y, Ye H, *et al.* 2012. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: Implication for cratonic lithosphere destruction[J]. *Lithos*, 155: 1~18.
- Zhang S H, Zhao Y, Ye H, *et al.* 2014. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt: Implications for crustal growth in the southern Central Asian orogenic belt[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126: 1 275~1 300.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, *et al.* 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[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6):

- 824~842 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X H, Zhang H F, Jiang N, *et al.* 2010. Early Devonian alkaline intrusive complex from the northern North China craton: A petrological monitor of post-collisional tectonics[J]. *Journal of the Geological Society*, 167: 717~730.
- Zhang Y P and Tang K D. 1989. Pre-Jurassic tectonic evolution of inter-continental region and the suture zone between the North China and Siberian platforms[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 3(1~4): 47~55.
- Zhang Zhaochong. 1997. The isotopic geochemical characteristics and its petrogenesis of the Shuiquangou complex, North Hebei[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 27(1): 36~43 (in Chinese with English abstract).
- 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 Z, Mo X, Dilek Y, *et al.* 2009. Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet[J]. *Lithos*, 113: 190~212.
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Nomade S, *et al.* 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block, Tibetan Plateau: Spatial and temporal and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 787~794 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping and Lu Fengxiang. 1999. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning: Paleozoic mantle character and its heterogeneity[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(1): 65~74 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X H, Sun M, Zhang G H, *et al.* 2002. Continental crust and lithospheric mantle interaction beneath North China: Isotopic evidence from granulite xenoliths in Hannuoba, Sino-Korean craton [J]. *Lithos*, 62: 111~124.
- 牛晓露, 杨经绥, 刘飞, 等. 2016. 华北克拉通北缘包头东正长岩的成因: 来自岩石矿物学和地球化学的证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 46(3): 374~391.
- 任荣, 牟保磊, 韩宝福, 等. 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[J]. *岩石学报*, 25(3): 588~594.
- 石玉若, 刘翠, 邓晋福, 等. 2014. 内蒙古中部花岗质岩类年代学格架及该区构造岩浆演化探讨[J]. *岩石学报*, 30(11): 3155~3171.
- 唐索寒, 李津, 梁细荣, 等. 2017. 钕同位素比值 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 标准溶液研制[J]. *岩矿测试*, 36(2): 163~170.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 2014. 阴山及邻区三叠纪富碱侵入岩的成因意义[J]. *岩石学报*, 30(7): 2031~2040.
- 万渝生, 董春艳, 任鹏, 等. 2017. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述[J]. *岩石学报*, 33(5): 1405~1419.
- 王惠初, 相振群, 赵凤清, 等. 2012. 内蒙古固阳东部碱性侵入岩: 年代学、成因与地质意义[J]. *岩石学报*, 28(9): 2843~2854.
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架[J]. *高校地质学报*, 11(3): 305~317.
- 肖文交, 宋东方, Windley B F, 等. 2019. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(10): 1512~1545.
- 徐博文, 郝爱华, 葛玉辉, 等. 2015. 内蒙古赤峰地区晚古生代 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地质学报*, 89(1): 58~69.
- 阎国翰, 谭林坤, 许保良, 等. 2001. 阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 281~292.
- 喻学惠, 赵志丹, 莫宣学, 等. 2004. 甘肃西秦岭新生代钾霞黄长岩和碳酸岩的微量, 稀土和 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学: 地幔柱-岩石圈交换的证据[J]. *岩石学报*, 20(3): 483~494.
- 翟明国. 2019. 华北克拉通构造演化[J]. *地质力学学报*, 25(5): 722~745.
- 张国辉, 周新华, 孙敏, 等. 1998. 河北汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石岩类捕虏体 Sr、Nd、Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 14(2): 190~197.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 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[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 824~842.
- 张招崇. 1997. 冀北水泉沟杂岩体的同位素地球化学特征及其成因意义[J]. *长春地质学院学报*, 27(1): 36~43.
- 赵志丹, 莫宣学, Nomade S, 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩的时空分布及其意义[J]. *岩石学报*, 22(4): 787~794.
- 郑建平, 路凤香. 1999. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性[J]. *岩石学报*, 15(1): 65~74.
- 陈斌, 牛晓露, 王志强, 等. 2013. 华北克拉通北缘姚家庄超镁铁岩-正长岩杂岩体的锆石 U-Pb 年代学, 岩石学和地球化学特征[J]. *中国科学(地球科学)*, 43: 1073~1087.
- 龚弥, 蔡剑辉, 阎国翰, 等. 2019. 阴山-燕山北麓富碱侵入岩体的岩石地球化学特征、锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地质论评*, 65(4): 894~915.
- 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 2001. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. *地球化学*, 30(2): 116~122.
- 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[J]. *地质学报*, 66: 108~121.

附中文参考文献