

doi: [10.12097/gbc.2022.02.018](https://doi.org/10.12097/gbc.2022.02.018)

内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩形成时代、成因及构造环境

胡新苗¹, 杨济远^{2*}, 邓雯², 田光昊¹, 孙肖¹, 秦丹鹤¹

HU Xinzhuo¹, YANG Jiyuan^{2*}, DENG Wen², TIAN Guanghao¹, SUN Xiao¹, QIN Danhe¹

1. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000;

2. 河北省区域地质调查院(河北省地学旅游研究中心), 河北 廊坊 065000

1. Lang Fang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China;

2. Hebei Institute of Regional Geological Survey(Geotourism Research Center of Hebei Province), Langfang 065000, Hebei, China

摘要: 通过1:5万区域地质调查,在内蒙古北山地区小黄山一带早石炭世侵入岩中新解体出片麻状中细粒花岗闪长岩、片麻状细粒二长花岗岩和片麻状似斑状细中粒黑云母二长花岗岩,其中片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩在空间上紧密伴生。本文研究小黄山一带片麻状花岗岩的形成时代、成因及构造环境。采用锆石LA-ICP-MS U-Pb法在片麻状中细粒花岗闪长岩、片麻状细粒二长花岗岩中分别获得了443.0±1.2 Ma和441.9±1.6 Ma的岩浆结晶年龄,时代为早志留世早期。岩石地球化学分析表明,片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩均为钙碱性系列岩石,碱度率AR为1.82~2.86,较低,且变化范围小,戈蒂尼指数τ为21.22~64.24($\tau>10$);岩石富集轻稀土元素及K、Rb、Ba等大离子亲石元素,亏损高场强元素Nb、P、Ti,具有岛弧岩浆岩或造山带岩浆岩的特征。结合前人研究成果综合分析,片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩形成于岛弧构造环境,是东七一山—公婆泉岛弧带的重要组成部分。

关键词: 内蒙古北山; 小黄山; 片麻状花岗岩质岩石; 形成时代; 构造环境; 岛弧; 地质调查工程

中图分类号: P588.12¹; P597^{+.3} **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)06-1059-13

Hu X Z, Yang J Y, Deng W, Tian G H, Sun X, Qin D H. The formation age, origin and tectonic environment of gneissic granite in Xiaohuangshan, Beishan area, Inner Mongolia. Geological Bulletin of China, 2024, 43(6): 1059–1071

Abstract: Through a 1:50000 regional geological survey, gneissic medium-fine-grained granodiorite, gneissic fine-grained monzogranite and gneiss-like intrusive rocks were newly disintegrated in the Xiaohuangshan area of Beishan area, Inner Mongolia. Porphyry medium-fine-grained biotite monzonitic granite, among which gneissic-to-medium-grained granodiorite and gneissic fine-grained monzonitic granite are closely associated in space. The formation age, origin and tectonic environment of gneissic granite in Xiaohuangshan area was studied in this paper. The zircon LA-ICP-MS U-Pb method was used to obtain magma crystallization ages of 443.0±1.2 Ma and 441.9±1.6 Ma respectively in gneissic medium-fine-grained granodiorite and gneissic fine-grained monzogranite. The era is early Silurian. Rock geochemical analysis shows that both gneissic medium-fine-grained granodiorite and gneissic fine-grained monzogranite are calc-alkaline series rocks, with a low alkalinity rate AR of 1.82 to 2.86, and a small range of variation. The Gordini index τ is 21.22 ~ 64.24 ($\tau>10$); the rock is enriched in light rare earth elements and large ion lithophile elements such as K, Rb, and Ba, and is depleted in high field strength elements Nb, P, and Ti, and has characteristics of island arc magmatic rocks or orogenic igneous rocks. Based on the comprehensive analysis of previous research results, the gneissic medium-fine-grained

收稿日期: 2023-04-20; 修订日期: 2023-08-29

资助项目: 中国地质调查局项目《内蒙古1:5万旱山(K47E015013)、小尘包(K47E015014)、望京山(K47E016013)、涌珠泉幅(K47E016014)区域地质调查》(编号: 1212011220463)

作者简介: 胡新苗(1989-), 女, 硕士, 工程师, 从事矿产地质调查与项目管理研究。E-mail: 1261392324@qq.com

* 通信作者: 杨济远(1990-), 男, 工程师, 从事区域地质与矿产地质调查研究。E-mail: 705748681@qq.com

granodiorite and gneissic fine-grained monzogranite were formed in the island arc tectonic environment and are important components of the East Qiyishan–Gongpoquan island arc zone.

Key words: Beishan, Inner Mongolia; Xiaohuangshan; gneissic granite rocks; formation age; tectonic environment; island arc; geological survey engineering

北山地区构造单元划分始终存在不同认识。20世纪70年代以前,槽台观点将其划归天山地槽褶皱系,地质力学观点划为天山–阴山构造带,多旋回观点称为天山–兴安地槽区优地槽褶皱带(李四光,1973;黄汲清等,1980;李春昱,1983)。近年来,众多学者采用板块构造理论,通过对红柳河–月牙山–洗肠井蛇绿构造混杂岩带内的深入研究,确认其为塔里木板块与哈萨克斯坦板块的早古生代缝合带(于福生等,2000;杨合群等,2010;候青叶等,2012;武鹏等,2012;郑荣国等,2012;胡新苗等,2015;胡醒民等,2016;廖云峰等,2016;王国强等,2021)。研究区位于塔里木板块与哈萨克斯坦板块结合部位(图1-a)(廖云峰等,2016),区内古生代岩浆岩十分发育,呈北西西向带状展布,是东七一山–公婆泉奥陶纪–志留纪岛弧带的重要组成部分,但由于缺少同位素测年资料,前人1:20万区域地质调查资料未充分解体石炭纪–奥陶纪侵入岩,并将志留纪侵入岩大部分归入早石炭世侵入岩,少部分归入泥盆纪侵入岩。2014–2016年,笔者在研究区开展1:5万区域地质调查期间,对研究区内的志留纪花岗岩进行了详细调查研究,本文以最新1:5万填图资料为基础,对片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状变质二长花岗岩体开展了岩相学、岩石地球化学和锆石U–Pb(LA–ICP–MS)同位素测年分析;探讨了岩石成因及形成的区域大地构造背景,为进一步研究红柳河–月牙山–洗肠井板块缝合带板块俯冲、造山和大陆地壳的形成、演化提供了新的依据。

1 区域地质背景

研究区地处北山造山带东段塔里木板块与哈萨克斯坦板块结合部位,红柳河–洗肠井板块缝合带从研究区西南角通过,明水–石板井–小黄山深断裂横亘研究区中部。古生代以来历经了板块俯冲、碰撞造山、碰撞后伸展等多期构造运动的叠加改造(周国庆等,2000;龚全胜等,2003;杨建国等,2012;杨合群等,2012),总体构造线呈近东西–北西西向。

出露地层主要包括古元古代北山岩群和奥陶

纪–志留纪公婆泉组(梁国庆等,2016)。古元古代北山岩群为一套变质碎屑岩系、碳酸盐岩系夹少量变质火山岩组合,属基底变质岩系,变质程度为低角闪岩–高绿片岩相;奥陶纪–志留纪公婆泉组为变质基性–中性火山岩夹碎屑岩、碳酸盐岩,变质程度为绿片岩相–低绿片岩相;中生代以来,研究区相继沉积了早白垩世赤金堡组砾岩、砂岩、砂质泥岩夹泥灰岩及煤层(线)和上新世苦泉组、全新世松散–半固结堆积地层。

研究区侵入岩十分发育,通过1:5万区域地质调查,项目组将其详细解体为奥陶纪、志留纪、泥盆纪和石炭纪侵入岩,与奥陶纪–志留纪公婆泉组火山岩共同构成横亘研究区的东七一山–公婆泉岛弧带(梁国庆等,2016)。奥陶纪侵入岩仅分布于中北部小黄山断裂带附近,划分为角闪闪长岩、橄榄岩、辉长岩;志留纪侵入岩分布于中东部小黄山及其两侧、小尘包南东等地,受后期构造变形影响,岩石普遍发育片麻状–弱片麻状构造,划分为片麻状中细粒花岗闪长岩、片麻状细粒二长花岗岩和片麻状斑状细中粒黑云母二长花岗岩;泥盆纪侵入岩主要分布于涌珠泉东,在小黄山南东也有少量分布,由早到晚划分为石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩4种岩类的侵入体;石炭纪侵入岩呈岩基、岩珠状广泛分布于研究区中南部,由早到晚划分为花岗闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩3种岩类的侵入体(图1-b)。

研究区志留纪片麻状花岗岩较发育,主要出露于研究区北部及东南部,划分为片麻状中细粒花岗闪长岩、片麻状变质二长花岗岩和片麻状斑状黑云二长花岗岩。片麻状中细粒花岗闪长岩与片麻状变质二长花岗岩空间上紧密伴生,本文重点对其形成时代、成因及构造环境开展了研究。

2 地质特征及岩石学特征

片麻状中细粒花岗闪长岩主要分布于小尘包南东一带,侵入古元古代北山岩群,被早泥盆世和早石炭世侵入岩侵入,岩石变质较弱,原岩的结构未遭受

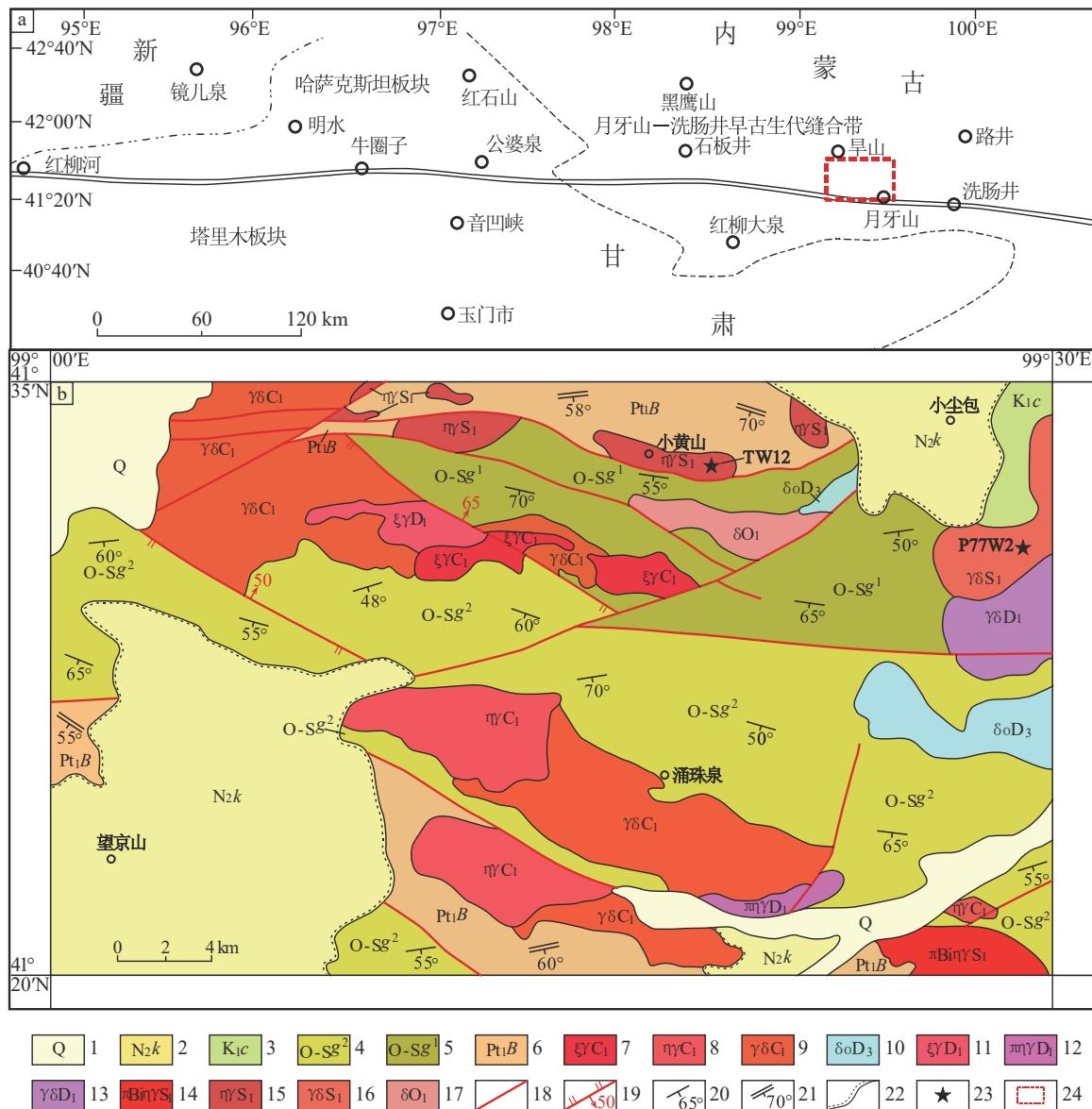


图1 研究区大地构造位置(a, 据杨合群等, 2010 修改)及地质简图(b, 据梁国庆等, 2016 修改)

Fig. 1 Tectonic subdivisions and sutures (a) and geologic map (b) of the study area

1—第四系; 2—上新统苦泉组; 3—早白垩世赤金堡组; 4—奥陶纪-志留纪公婆泉组一段; 5—奥陶纪-志留纪公婆泉组二段; 6—古元古代北山岩群; 7—早石炭世正长花岗岩; 8—早石炭世二长花岗岩; 9—早石炭世花岗闪长岩; 10—晚泥盆世石英闪长岩; 11—早泥盆世正长花岗岩; 12—早泥盆世斑状二长花岗岩; 13—早泥盆世花岗闪长岩; 14—早志留世斑状黑云二长花岗岩; 15—早志留世二长花岗岩; 16—早志留世花岗闪长岩; 17—早奥陶世侵入岩; 18—性质不明断层; 19—逆断层及产状; 20—地层产状; 21—片理产状; 22—不整合界线; 23—同位素样品采样位置; 24—研究区位置

变质作用改造, 变形相对较明显, 总体发育北西向弱片麻理(图2-a)。岩石呈灰色—灰白色, 中细粒花岗结构, 变余花岗结构, 定向构造。由斜长石(50%~60%)、石英(20%)、黑云母+角闪石(10%~15%)和钾长石(10%~20%)组成。斜长石呈近半自形板状, 0.2~2.0 mm, 少量2.0~3.0 mm, 长轴多定向, 集合体定向分布, 不均匀绢云母化、少量帘石化等,

少量见隐约环带构造, 个别被钾长石交代呈蠕虫状; 钾长石呈他形粒状, 0.1~1.5 mm, 星散状分布, 粒内可见格子双晶, 局部交代斜长石; 石英呈他形粒状, 0.1~0.5 mm, 粒间镶嵌状分布, 集合体似条带状、似透镜状分布, 粒内可见波状、带状消光, 边界呈不规则状; 黑云母呈叶片状, 0.1~1.0 mm, 长轴多定向, 集合体呈断续似线痕状分布, 绿泥石化明显、少帘石

化,多呈假象少残留;角闪石呈柱状,2.0~3.0 mm,少部分0.1~2.0 mm,长轴多定向,集合体呈似条痕状分布,局部被黑云母不均匀交代。岩内见被少量碳酸盐、绿帘石充填的细小裂隙(图2-b)。在QAP图解

(图3-a)中1件样品落入花岗闪长岩区,另一件样品落入二长花岗岩区,但投点位置位于花岗闪长岩与二长花岗岩区分界线附近。

片麻状细粒二长花岗岩主要分布于小黄山及其

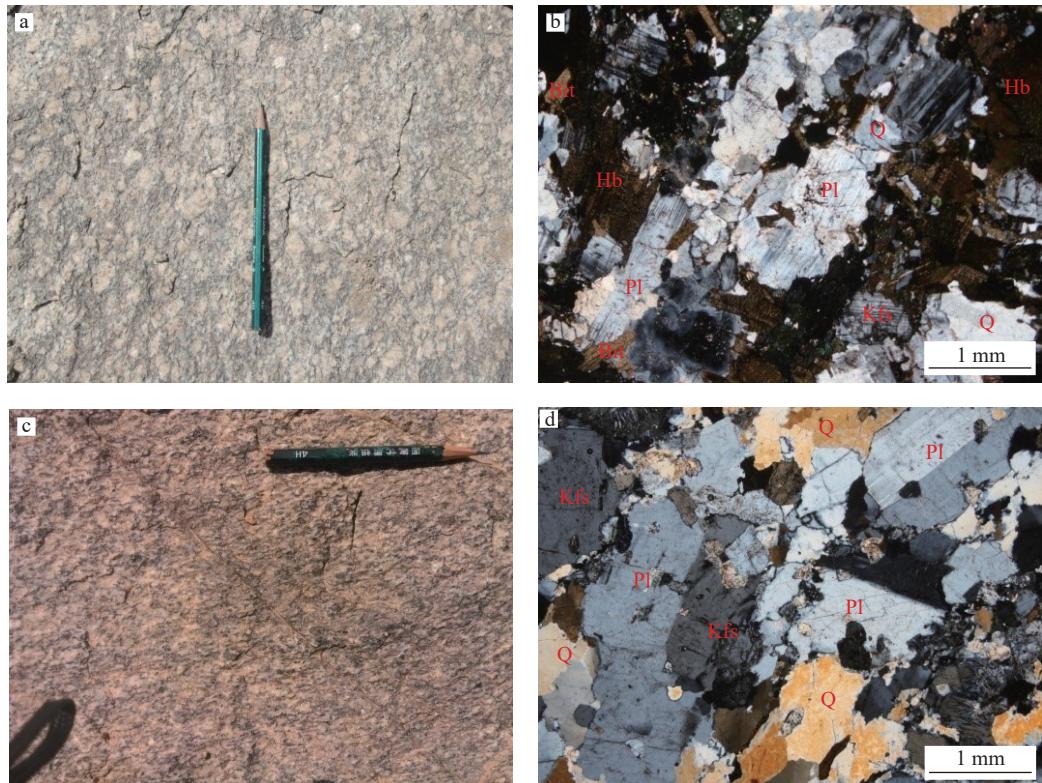


图2 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩岩石宏观特征及显微镜下特征

Fig. 2 Outcrop and microscopic characteristics of gneissic granite rocks in Xiaohuangshan, Beishan area, Inner Mongolia
a—一片麻状中细粒花岗闪长岩野外宏观特征;b—一片麻状中细粒花岗闪长岩显微镜下特征;c—一片麻状细粒二长花岗岩野外宏观特征;
d—一片麻状细粒二长花岗岩显微镜下特征。Bit—黑云母;Hb—角闪石;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Q—石英

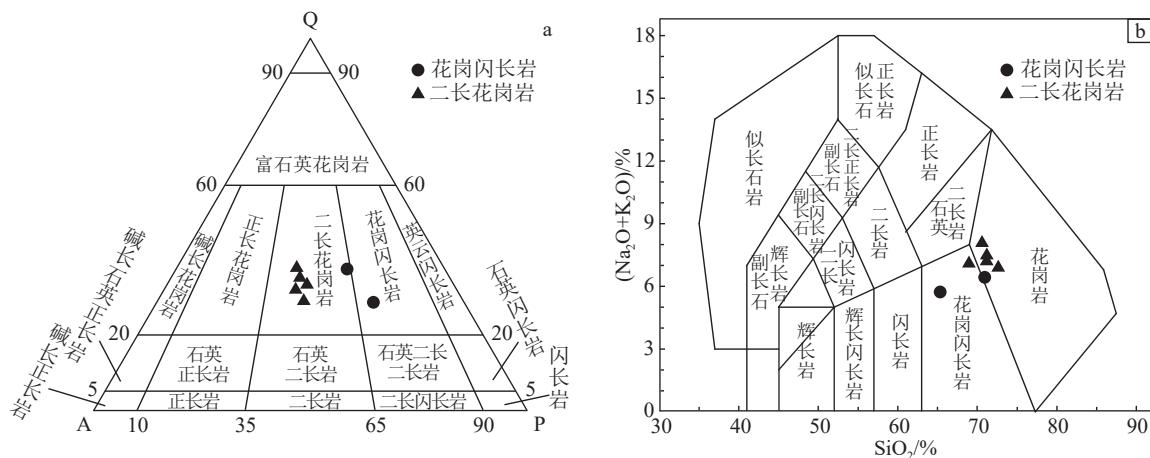


图3 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩QAP图解(a, 据 Maniar et al., 1989)和TAS图解(b, 据 Middlemost, 1994)

Fig. 3 QAP diagram (a) and TAS diagram (b) of gneissic granite in Xiaohuangshan, Beishan area, Inner Mongolia

东西两侧,侵入古元古代北山岩群,被早石炭世花岗闪长岩侵入,岩石变质变形总体较弱,局部发育北西向弱片麻理(图 2-c)。岩石呈粉灰色—肉红色,变余细粒花岗结构,定向构造,岩石由斜长石(35%)、钾长石(35%~40%)、石英(约 25%)、暗色矿物假象(1%~5%)组成。斜长石、钾长石呈近半自形板状、似眼球状、他形粒状,断续呈条带状定向分布,0.1~2 mm,少量 2~2.3 mm,局部细粒化,绕大颗粒分布。斜长石具轻绢云母化、轻高岭土化,多隐约可见环带构造。钾长石具轻高岭土化,局部粒内嵌布斜长石颗粒。石英呈他形粒状,0.1~3 mm,呈变晶集合体产出,定向分布,局部发育亚颗粒,粒内具波状、带状消光。暗色矿物假象呈微晶状,<0.15 mm,定向分布,绿泥石化明显(图 2-d)。在 QAP 图解中 5 件样品均落入二长花岗岩区(图 3-a)。

3 测试方法

为了准确确定内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩的形成时代、岩石地球化学特征及岩石成因、形成环境,本次在路线地质调查和实测剖面过程中对片麻状花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩各采集了 1 件同位素测年样品,样品编号分别为 P7TW2、TW12,并系统采集了主量、稀土、微量元素分析测试样品,样品均采自新鲜的基岩露头,同位素测年样品采样位置及编号见图 1-b。

3.1 同位素测年

河北区域地质矿产调查研究所实验室承担完成同位素测年样品的破碎、锆石颗粒挑选及制靶工作;在北京离子探针中心完成锆石显微照相和阴极发光(CL)照相;天津地质矿产研究所同位素实验室承担完成锆石 U-Pb 测年工作。

首先将同位素测年样品破碎至 40~60 目,并采用重矿物分离法分选重矿物,之后在双目镜下人工挑选单颗粒锆石,最终将挑选出的锆石样品与数粒 Temora(标样)置于环氧树脂中制靶,待干燥固结后磨蚀、抛光至锆石内部暴露,然后进行锆石显微照相和阴极发光照相。

使用 Neptune 电感耦合等离子质谱仪和 193 nm 激光取样系统(LA-ICP-MS)对锆石内部进行微区原位 U-Th-Pb 同位素测定,激光剥蚀斑束直径 35 μm,详细仪器配置和实验流程据 Jackson et al. (2004)。采用 GJ-1 作为外部锆石年龄标准,进行

U-Pb 同位素分馏校正(Liu et al., 2010);采用 ICP-MS DataCal 程序(Ludwig K R, 2003)和 Isoplot 程序(Anderson, 2002)进行数据处理;对普通铅进行了校正,利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量,利用 ISO-PLOTEx3.23 程序进行锆石年龄加权平均值计算及谐和图绘制。

3.2 主量、微量和稀土元素分析

河北区域地质矿产调查研究所实验室承担完成主量、稀土和微量元素样品分析测试工作。为保证主量、稀土、微量元素分析测试样品无污染,首先使用玛瑙球磨机将样品粉碎研磨至 200 目。主量元素采用碱熔法将样品制备,使用 X 射线荧光光谱仪(Axios max X)完成分析测试,烧失量、H₂O⁻、H₂O⁺采用电子分析天平(P1245)测试;对 X 射线荧光光谱仪测定的 TFe₂O₃,首先采用滴定方法测定 FeO 含量,再根据 TFe₂O₃ 和 FeO 含量计算出 Fe₂O₃ 含量。稀土、微量元素分析采用等离子体质谱仪(ICP-MS)(X Serise 2)完成测试,同时用 10 个国家标准样和 10 个密码样品检验分析结果的可靠程度,分析精度优于 5%。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

2 件同位素测年样品均采自变形很弱的新鲜基岩露头中,主要分析数据见表 1。

P7TW2 样品锆石多呈短柱状—长柱状,自形一半自形,透明度好,表面光滑,大部分锆石振荡环带清晰,没有由变质重结晶作用形成的锆石增生边,与变质锆石 CL 图像差异明显,说明测年样品中的锆石未遭受后期变质变形作用改造和影响,为典型的岩浆结晶锆石(图 4)。锆石的 Th/U 值主要介于 0.2~0.64 之间,平均 0.40,显示岩浆锆石的特征。TW12 样品中锆石多呈长柱状,自形晶,透明度好,表面光滑,均发育清晰的振荡环带,没有由变质重结晶作用形成的锆石增生边,与变质锆石 CL 图像差异明显,说明测年样品中的锆石未遭受后期变质变形作用改造和影响,为典型的岩浆结晶锆石(图 5)。锆石的 Th/U 主要介于 0.11~0.40 之间,平均 0.23,亦显示岩浆锆石的特征。

P7TW2 样品中 25 粒锆石测点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄介于 447~429 Ma 之间,较集中,在锆石 U-Pb 年龄谐和图中均位于 U-Pb 谐和线上或其附近

表1 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩(P7TW2、TW12)锆石LA-ICP-MS分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon analysis results of gneissic granite (P7TW2, TW12) in Xiaohuangshan, Beishanarea, Inner Mongolia

样品号	含量/ 10^{-6}		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		年龄/Ma			
	Pb	U	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
P7TW2-1	21	287	0.0718	0.0005	0.5532	0.0108	0.0558	0.0011	0.0215	0.0001	0.3647	0.0010	447	3	447	9
P7TW2-2	12	162	0.0714	0.0004	0.5483	0.0087	0.0557	0.0009	0.0185	0.0001	0.4947	0.0019	445	3	444	7
P7TW2-3	13	175	0.0711	0.0004	0.5792	0.0107	0.0591	0.0011	0.0196	0.0002	0.4764	0.0028	443	3	464	9
P7TW2-4	14	191	0.0713	0.0004	0.5490	0.0073	0.0559	0.0007	0.0204	0.0002	0.3955	0.0009	444	3	444	6
P7TW2-5	24	345	0.0717	0.0004	0.5453	0.0084	0.0551	0.0008	0.0221	0.0001	0.2080	0.0006	446	3	442	7
P7TW2-6	15	206	0.0709	0.0004	0.5455	0.0121	0.0558	0.0012	0.0194	0.0001	0.3538	0.0002	442	3	442	10
P7TW2-7	15	207	0.0709	0.0004	0.5439	0.0277	0.0556	0.0029	0.0187	0.0002	0.4072	0.0012	442	3	441	22
P7TW2-8	17	245	0.0709	0.0005	0.5508	0.0052	0.0563	0.0005	0.0198	0.0008	0.3826	0.0013	442	3	445	4
P7TW2-9	23	309	0.0717	0.0004	0.5498	0.0111	0.0556	0.0011	0.0226	0.0001	0.4227	0.0008	446	3	445	9
P7TW2-10	12	170	0.0712	0.0004	0.5511	0.0113	0.0561	0.0011	0.0192	0.0001	0.4455	0.0020	443	3	446	9
P7TW2-11	12	162	0.0708	0.0004	0.5526	0.0097	0.0566	0.0010	0.0198	0.0001	0.3929	0.0022	441	3	447	8
P7TW2-12	12	176	0.0713	0.0004	0.5455	0.0079	0.0555	0.0008	0.0202	0.0001	0.3135	0.0011	444	3	442	6
P7TW2-13	17	228	0.0714	0.0005	0.5515	0.0089	0.0561	0.0009	0.0195	0.0001	0.4231	0.0007	444	3	446	7
P7TW2-14	16	216	0.0714	0.0004	0.5487	0.0135	0.0558	0.0014	0.0191	0.0002	0.4168	0.0011	444	3	444	11
P7TW2-15	10	143	0.0715	0.0004	0.5466	0.0086	0.0555	0.0008	0.0186	0.0001	0.3706	0.0011	445	3	443	7
P7TW2-16	21	310	0.0711	0.0005	0.5547	0.0053	0.0566	0.0005	0.0192	0.0008	0.2400	0.0003	443	3	448	4
P7TW2-17	19	262	0.0709	0.0004	0.5478	0.0099	0.0560	0.0010	0.0186	0.0001	0.4373	0.0010	442	3	444	8
P7TW2-18	14	200	0.0707	0.0004	0.5612	0.0110	0.0576	0.0011	0.0193	0.0001	0.4123	0.0021	440	3	452	9
P7TW2-19	11	161	0.0709	0.0005	0.5596	0.0245	0.0572	0.0025	0.0179	0.0004	0.0628	0.0001	442	3	451	20
P7TW2-20	12	170	0.0707	0.0005	0.5474	0.0085	0.0561	0.0008	0.0201	0.0002	0.3398	0.0010	440	3	443	7
P7TW2-21	21	304	0.0711	0.0004	0.5510	0.0128	0.0562	0.0013	0.0210	0.0001	0.1981	0.0003	443	3	446	10
P7TW2-22	12	153	0.0711	0.0004	0.5450	0.0105	0.0556	0.0011	0.0190	0.0001	0.6372	0.0084	443	3	442	9
P7TW2-23	12	170	0.0688	0.0004	0.5251	0.0089	0.0554	0.0009	0.0194	0.0002	0.4614	0.0002	429	3	429	7
P7TW2-24	14	196	0.0706	0.0005	0.5436	0.0197	0.0558	0.0020	0.0207	0.0003	0.3008	0.0005	440	3	441	16
P7TW2-25	9	124	0.0708	0.0005	0.5427	0.0056	0.0556	0.0005	0.0196	0.0009	0.3889	0.0075	441	3	440	5
TW12-1	26	372	0.0711	0.0004	0.5394	0.0134	0.0550	0.0013	0.0183	0.0005	0.2885	0.0034	443	2	438	11
TW12-2	34	447	0.0706	0.0005	0.8501	0.0135	0.0873	0.0013	0.0420	0.0003	0.2480	0.0008	440	3	625	10
TW12-3	51	648	0.0709	0.0004	0.9976	0.0236	0.1021	0.0027	0.0595	0.0019	0.2020	0.0012	441	3	703	17
TW12-4	21	300	0.0711	0.0005	0.5423	0.0113	0.0553	0.0011	0.0290	0.0005	0.1491	0.0005	443	3	440	9
TW12-5	10	151	0.0713	0.0009	0.5442	0.0359	0.0553	0.0034	0.0140	0.0008	0.2168	0.0026	444	6	441	29
TW12-6	40	602	0.0697	0.0005	0.5413	0.0216	0.0563	0.0018	0.0080	0.0005	0.2924	0.0042	434	3	439	18
TW12-7	88	1138	0.0707	0.0005	1.0701	0.0144	0.1098	0.0012	0.0858	0.0008	0.1240	0.0025	440	3	739	10
TW12-8	15	220	0.0711	0.0004	0.5415	0.0096	0.0553	0.0009	0.0150	0.0001	0.4041	0.0047	443	2	439	8
TW12-9	47	672	0.0706	0.0004	0.7127	0.0077	0.0732	0.0008	0.0220	0.0002	0.2384	0.0017	440	3	546	6
TW12-10	24	347	0.0707	0.0004	0.5476	0.0077	0.0562	0.0008	0.0200	0.0001	0.2478	0.0013	440	2	443	6
TW12-11	68	960	0.0708	0.0004	0.5472	0.0062	0.0560	0.0006	0.0230	0.0001	0.3198	0.0010	441	2	443	5
TW12-12	65	919	0.0710	0.0004	0.5364	0.0070	0.0548	0.0007	0.0250	0.0002	0.2548	0.0051	442	2	436	6
TW12-25	13	199	0.0708	0.0005	0.5402	0.0163	0.0553	0.0015	0.0140	0.0006	0.1102	0.0001	441	3	439	13
TW12-26	40	579	0.0708	0.0004	0.5458	0.0063	0.0559	0.0006	0.0223	0.0001	0.2592	0.0034	441	2	442	5

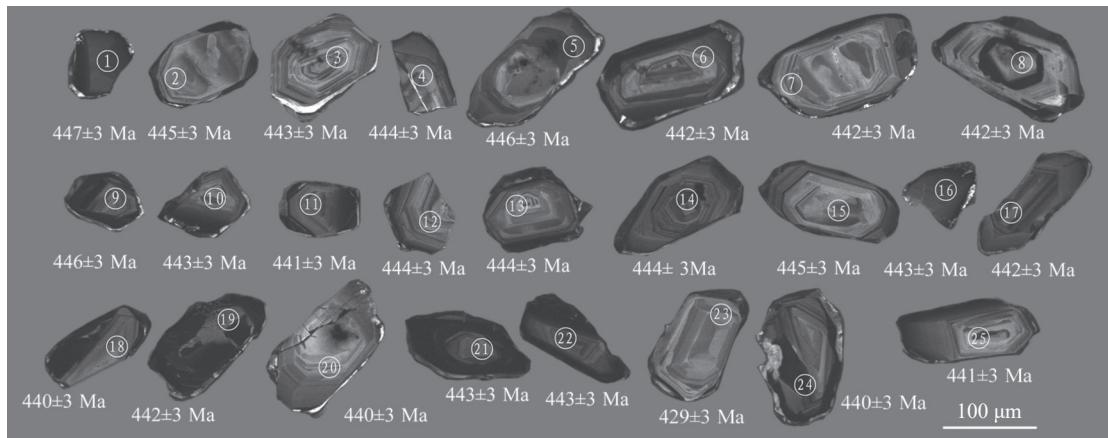


图4 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗闪长岩锆石CL图像及测点图(P7TW2)

Fig. 4 Zircon CL images and measurement points of gneissic granodiorite in Xiaohuangshan, Beishan area, Inner Mongolia (P7TW2)



图5 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状细粒二长花岗岩锆石CL图像及测点图(TW12)

Fig. 5 Zircon CL images and measurement points of gneissic fine-grained monzogranite in Xiaohuangshan, Beishan area, Inner Mongolia (TW12)

(图6-a), 年龄加权平均值为 443.0 ± 1.2 Ma(图6-b); TW12样品中14粒锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄主要介于444~434 Ma之间, 较集中, 在锆石U-Pb年龄谐和图中均位于U-Pb谐和线上或其附近(图6-c), 年龄加权平均值为 441.9 ± 1.6 Ma。由于2件测年样品中的锆石均未遭受后期变质变形作用改造, 因此测年结果均为岩浆结晶年龄(图6-d)。

4.2 主量元素

研究区片麻状花岗质岩石样品元素地球化学分析结果及主要参数见表2。

与中国花岗闪长岩化学成分平均值相比, 研究区片麻状花岗闪长岩除 SiO_2 偏高外, 其他成分含量不同程度偏低。 SiO_2 含量为65.34%~70.98%, 平均68.16%, 属于酸性岩类; 分异指数 $DI=66.45\sim81.37$, 平均73.91, 固结指数 $SI=7.77\sim16.57$, 平均12.17, 岩浆分异程度中等; 里特曼指数 $\sigma=1.47$, 属钙性岩; $K/\text{Na}=0.76\sim0.83$, 平均0.80, 属钠质系列岩石;

$\text{Al}_2\text{O}_3>\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$ (分子数), 属铝过饱和系列; 碱度率 $AR=1.82\sim2.17$, 平均2.0, 岩石碱度较低, 且变化范围小, 具有岛弧岩浆岩特征; 戈蒂尼指数 $\tau=21.22\sim42.65$, 平均31.94, 属于造山带岩浆岩($\tau>10$)(李昌年, 1992; 戴霜等, 2003; 董洪凯等, 2018; 孟庆涛等, 2021)。在TAS图解(图3-b)中, 1件样品落入花岗闪长岩区, 另一件样品落入花岗岩与花岗闪长岩分界线靠近花岗岩一侧。

与中国花岗岩化学成分平均值相比, 研究区片麻状细粒二长花岗岩 Al_2O_3 含量偏高, 其他成分含量基本相当。 SiO_2 含量平均为70.71%, 属于酸性岩类; 分异指数 $DI=78.46\sim85.88$, 平均84.03, 固结指数 $SI=6.21\sim9.53$, 平均7.37, 岩浆分异程度较高; $K/\text{Na}=0.93\sim1.40$, 平均1.10, 属钾质系列岩石; 里特曼指数 $\sigma=1.66\sim2.36$, 平均2.0, 为钙碱性系列岩石; $\text{Al}_2\text{O}_3>\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}+\text{CaO}$ (分子数), 属铝过饱和系列; 碱度率 $AR=2.3\sim2.86$, 平均2.60, 岩石碱度较低, 且

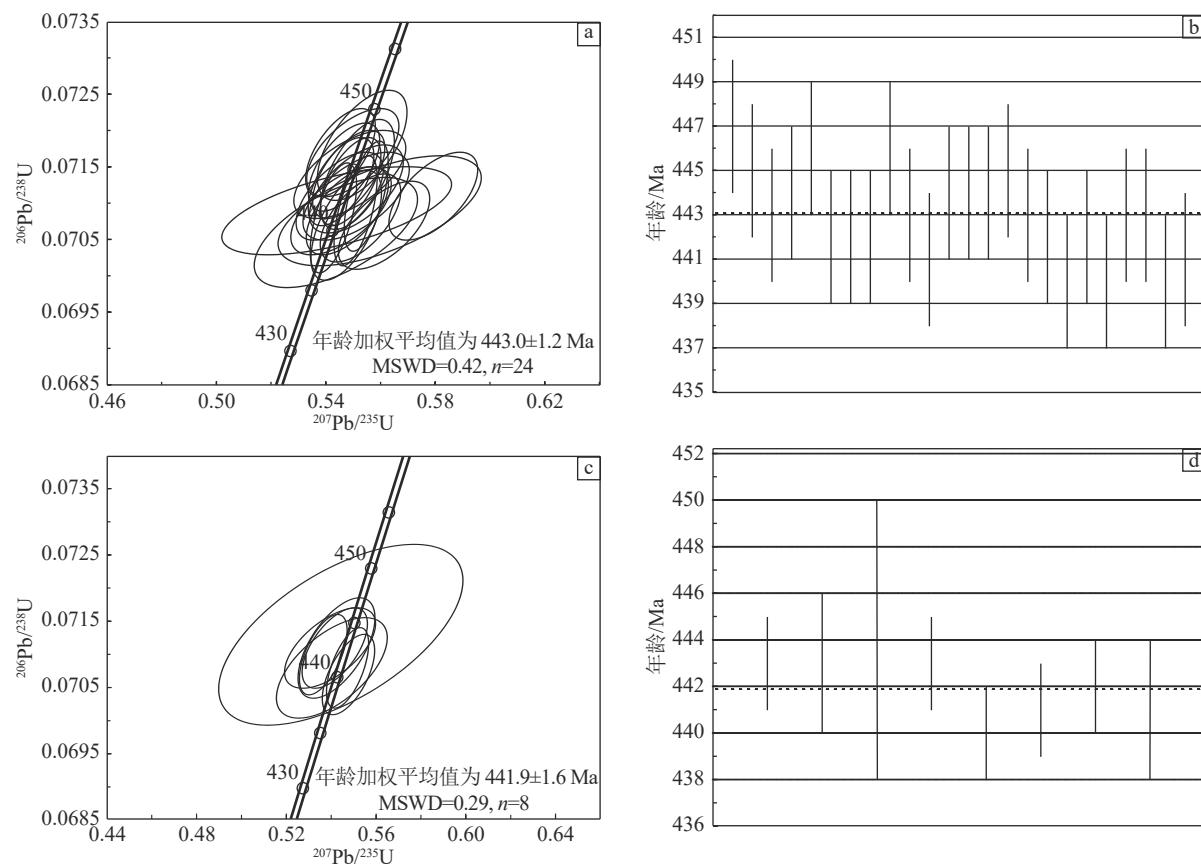


图 6 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩 U-Pb 年龄谐和图与年龄加权平均值

Fig. 6 U-Pb age concordance diagrams and weighted average age of gneissic granite in Xiaohuangshan, Beishan area, Inner Mongolia

变化范围小, 具有岛弧岩浆岩特征; 戈蒂尼指数 $\tau=27.44\sim64.24$, 平均 46.20, 属于造山带岩浆岩 ($\tau>10$) (邱家骥等, 1991; 戴霜等, 2003; 董洪凯等, 2018; 孟庆涛等, 2021)。在 TAS 图解 (图 3-b) 中, 4 件样品落入花岗岩区, 1 件样品落入花岗岩与花岗闪长岩分界线靠近花岗闪长岩一侧。

4.3 微量元素

与维氏酸性岩(表 3)相比, 研究区片麻状花岗闪长岩 Rb、Zr、Nb 等微量元素含量明显偏低, Hf 含量明显偏高, 其他元素基本相当(黎彤, 1984; 吴福元等, 2007)。K/Rb=237.24~240.61, K/Cs=10088~117399, Rb/Cs=42.52~48.79, Rb/Li=4.68~11.75, Rb/Sr=0.18~0.32, 与同熔型(I型)花岗岩特征相近(高秉璋等, 1991; 戴霜等, 2003; 吴福元等, 2007; 杨合群等, 2009)。Rb/Sr=0.18~0.32, 平均 0.25, 与地壳值(0.44)接近, 但明显高于原始地幔值(0.037), 说明其物质来源主要为下地壳; 在微量元素蛛网图(图 7-a)中, 大离子亲石元素 K、Rb、Ba 及放射性生热元素

U、Th 明显富集, 高场强元素 Nb、P、Ti 亏损, 与 Pearce (Pearce et al., 1984) 划分的火山弧花岗岩基本一致(李昌年, 1992)。

与维氏酸性岩(表 3)相比, 研究区片麻状二长花岗岩 Rb、Nb、Ta 等微量元素含量明显偏低, Hf、Ba 含量明显偏高, 其他元素基本相当(黎彤, 1984; 李昌年, 1992)。K/Rb=234.34~340.33, K/Cs=13410~28669, Rb/Cs=57.23~84.24, Rb/Li=10.86~24.26, Rb/Sr=0.34~0.60, 与同熔型(I型)花岗岩特征相近(高秉璋等, 1991; 戴霜等, 2003; 吴福元等, 2007; 杨合群等, 2009); Rb/Sr=0.34~0.60, 平均 0.466, 与地壳值(0.44)接近或偏高, 说明其物质来源主要为地壳(表 2)。微量元素蛛网图与片麻状花岗闪长岩特征一致, 同样表现为大离子亲石元素 K、Rb、Ba 及放射性生热元素 U、Th 明显富集, 高场强元素 Nb、P、Ti 亏损, 具有火山弧花岗岩特征(图 7-a)。

4.4 稀土元素

片麻状中细粒花岗闪长岩: $\Sigma \text{REE} = 103.38 \times$

表2 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩主量、微量元素分析结果

Table 2 Analysis results of major, trace and rare earth elements of gneissic granite in Xiaohuangshan, Beishan area, Inner Mongolia

元素	片麻状中细粒花岗闪长岩		片麻状细粒二长花岗岩					元素	片麻状中细粒花岗闪长岩		片麻状细粒二长花岗岩				
	P7YQ7	YQ46	YQ41	YQD05	YQD06	YQD41	YQD42		P7YQ7	YQ46	YQ41	YQD05	YQD06	YQD41	YQD42
SiO ₂	65.34	70.98	71.25	71.51	72.58	67.54	70.65	Dy	2.24	1.91	1.78	1.39	1.39	1.97	1.78
TiO ₂	0.59	0.28	0.25	0.22	0.18	0.48	0.27	Ho	0.39	0.38	0.24	0.23	0.22	0.31	0.32
Al ₂ O ₃	15.65	15.47	15.11	14.96	14.75	16.11	15.44	Er	1.01	1.02	0.65	0.61	0.58	0.74	0.84
Fe ₂ O ₃	1.21	1.49	0.86	0.71	0.51	1.36	0.72	Tm	0.17	0.16	0.09	0.10	0.09	0.10	0.14
FeO	2.73	0.61	0.98	1.01	0.81	1.56	1.03	Yb	0.98	0.90	0.53	0.57	0.57	0.53	0.85
MnO	0.061	0.012	0.021	0.016	0.013	0.032	0.025	Lu	0.16	0.26	0.21	0.19	0.19	0.20	0.20
MgO	1.92	0.72	0.70	0.65	0.55	1.06	0.79	Y	11.05	10.8	7.67	6.87	6.49	9.02	8.86
CaO	4.13	1.91	1.42	1.27	1.41	1.98	1.35	ΣREE	123.16	103.38	153.31	98.5	117.18	137.64	91.72
Na ₂ O	3.13	3.65	3.78	3.67	3.24	2.97	4.18	LR/HR	12.02	11.41	18.43	15.3	17.9	16.21	11.3
K ₂ O	2.60	2.76	3.71	3.73	3.77	4.17	3.90	(La/Yb) _N	16.61	14.92	44.20	23.98	28.75	35.97	13.86
P ₂ O ₅	0.144	0.113	0.117	0.100	0.082	0.187	0.114	(La/Sm) _N	3.84	4.07	4.74	4.44	4.89	4.30	3.83
H ₂ O ⁺	1.54	1.20	1.22	1.20	1.06	1.35	0.83	(Gd/Yb) _N	2.66	2.21	5.44	3.19	3.54	4.94	2.19
H ₂ O ⁻	0.17	0.30	0.27	0.13	0.18	0.20	0.13	δEu	0.98	0.78	0.78	0.83	0.85	0.78	0.80
烧失量	2.35	1.85	1.64	2.02	1.94	2.33	1.33	δCe	0.96	0.96	0.9	0.96	1.03	0.97	0.96
总计	99.20	99.49	99.68	99.17	99.14	99.00	99.43	Li	19.16	8.22	7.16	4.80	5.38	9.63	8.75
Qz	24.46	33.95	31.05	32.11	35.46	28.48	27.23	Rb	89.6	96.6	118.1	100.1	130.4	147.7	95.1
Or	15.42	16.37	22.04	22.10	22.34	24.76	23.11	Sr	497.1	301	314.8	166.0	237.6	319.5	275.7
Ab	26.57	31.05	32.07	31.14	27.50	25.22	35.54	K	21558	22911	30807	30933	31262	34612	32362
An	19.77	8.88	6.39	5.71	6.52	8.76	6.10	Ba	968.5	908	1044	1054	1483	1655	1667
σ	1.47	1.47	1.98	1.92	1.66	2.08	2.36	Zr	154.4	124	142.8	129.0	90.2	230.9	136.6
AR	1.82	2.17	2.66	2.67	2.53	2.30	2.86	Hf	7.50	3.34	4.12	3.74	2.99	5.85	3.82
DI	66.45	81.37	85.16	85.35	85.3	78.46	85.88	Nb	12.91	15.4	10.79	8.77	8.21	12.23	10.46
SI	16.57	7.77	6.98	6.64	6.21	9.53	7.48	Ta	1.20	1.27	0.77	0.85	0.99	0.81	0.98
Alo	1.01	1.05	1.08	1.10	1.14	1.14	1.04	Th	10.26	12.7	17.65	11.92	17.58	23.50	13.29
τ	21.22	42.65	46.03	51.43	64.24	27.44	41.87	U	3.29	2.34	2.94	1.15	1.58	3.11	3.12
La	24.10	19.9	34.67	20.22	24.33	27.99	17.40	Ti	3514	1662	1476	1316	1074	2871	612
Ce	47.68	39.9	62.89	40.57	51.60	57.53	35.37	Cr	36.9	19.6	3.8	10.0	5.1	5.4	5.9
Pr	5.59	4.66	7.57	4.74	5.54	6.86	4.31	V	77.7	60.7	29.9	29.3	23.5	46.9	34.2
Nd	21.00	16.9	27.36	16.90	19.43	23.72	15.50	Cs	1.84	2.27	1.80	1.24	1.66	2.58	1.13
Sm	3.95	3.08	4.60	2.86	3.13	4.09	2.86	Rb/Sr	0.18	0.32	0.38	0.60	0.55	0.46	0.34
Eu	1.18	0.72	1.07	0.71	0.80	0.96	0.69	Th/U	3.12	5.44	6.01	10.34	11.12	7.57	4.26
Gd	3.22	2.46	3.57	2.25	2.50	3.21	2.29	Zr/Hf	20.58	37.12	34.64	34.47	30.15	39.44	35.73
Tb	0.45	0.38	0.43	0.29	0.30	0.42	0.34	K/Rb	240.61	237.24	260.77	309.02	239.74	234.34	340.33

注: 主量元素含量单位为%, 微量、稀土元素含量单位为 10^{-6} ; 分异指数(DI)=Qz+Or+Ab+Ne+Lc+Kp(文中讨论的花岗岩的矿物成分不含有Ne、Lc、Kp三种矿物); 固结指数(SI)=MgO×100/(MgO+FeO+F₂O₃+Na₂O+K₂O) (%); 碱度率(AR)=[Al₂O₃+CaO+(Na₂O+K₂O)]/[Al₂O₃+CaO-(Na₂O+K₂O)] (%); 当SiO₂>50, K₂O/Na₂O大于1而小于2.5时, Na₂O+K₂O=2Na₂O; 组合指数(σ)(Na₂O+K₂O)²/(SiO₂-43) (%), 适用于中酸性岩石; 戈蒂尼指数(τ)=(Al₂O₃-Na₂O)/TiO₂

表3 维氏(1962)酸性岩元素及含量

Table 3 Acidic rock elements and contents by Vinogradov (1962)

 10^{-6}

Rb	Ba	Th	U	K	Ta	Nb	La	Ce	Sr	Nd	P	Zr	Hf	Sm	Ti	Y	Yb	Lu
200.00	830.00	18.00	3.50	33400.00	3.50	20.00	60.00	100.00	300.00	46.00	700.00	200.00	1.00	9.00	2300.00	34.00	4.00	1.00

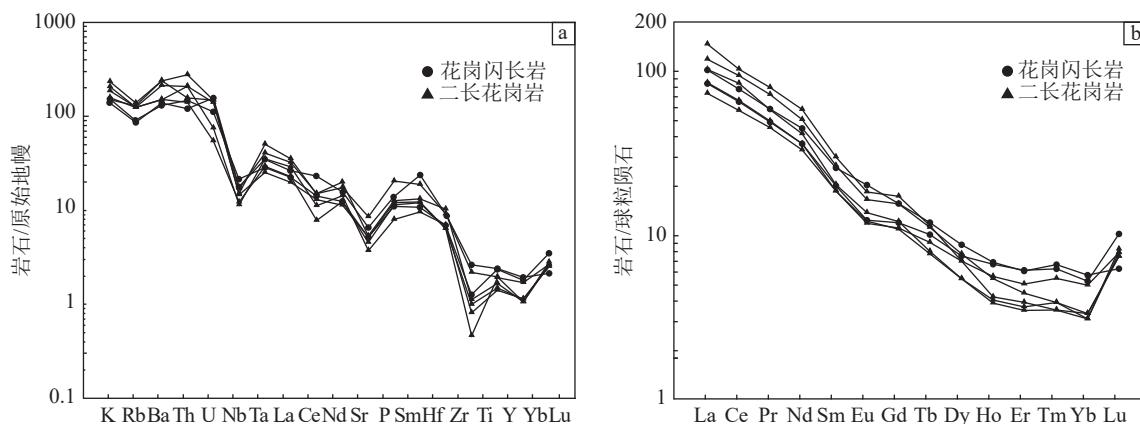


图7 内蒙古北山地区小黄山一带片麻状花岗岩微量元素蛛网图(a, 标准化值据 Sun et al., 1989) 和稀土元素配分模式图(b, 标准化值据 Boynton, 1984)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized spidergrams (a) and chondrite-normalized rare-earth elements patterns (b) of gneissic granite in the Xiaohuangshan of Beishan area, Inner Mongolia

$10^{-6} \sim 123.16 \times 10^{-6}$, 稀土元素总量中等偏低; LREE/HREE=11.41~12.02, $(\text{La/Yb})_N=14.92 \sim 16.61$, 为轻稀土元素富集型, 且轻、重稀土元素分异程度较高; $(\text{La/Sm})_N=3.84 \sim 4.07$, $(\text{Gd/Yb})_N=2.21 \sim 2.66$, 轻稀土元素分馏程度较重稀土元素分异程度略高; $\delta\text{Eu}=0.78 \sim 0.98$, $\delta\text{Ce}=0.96$, 具有弱的负铕异常, 镧异常不明显。稀土元素配分模式曲线呈右倾斜曲线(图7-b), 与I型花岗岩及岛弧花岗岩特征基本一致(吴福元等, 2007)。

片麻状细粒二长花岗岩: $\Sigma\text{REE}=91.72 \times 10^{-6} \sim 153.31 \times 10^{-6}$, 稀土元素总量偏低—中等; LREE/HREE=11.3~18.43, $(\text{La/Yb})_N=13.86 \sim 44.20$, 为轻稀土元素富集型, 且轻、重稀土元素分异程度较高; $(\text{La/Sm})_N=3.83 \sim 4.89$, $(\text{Gd/Yb})_N=2.19 \sim 5.44$, 说明轻稀土元素分馏程度好于重稀土元素; $\delta\text{Eu}=0.78 \sim 0.85$, 具有弱负Eu异常, $\delta\text{Ce}=0.9 \sim 1.03$, Ce异常不明显。稀土元素配分模式曲线与片麻状花岗闪长岩完全一致, 均呈右斜曲线(图7-b), 同样显示为I型花岗岩及岛弧花岗岩特征(吴福元等, 2007)。

总体看, 由早到晚, 从片麻状中细粒花岗闪长岩→片麻状细粒二长花岗岩, 随 SiO_2 的增加, 微量元素Rb、Th呈递增的趋势, Sr、Nb等元素具有递减的

特征; 二者稀土元素特征参数及分配模式曲线和微量元素比值蛛网图特征一致, 说明其为同源岩浆演化序列中不同期次的侵入岩, 且形成于相同的区域大地构造背景。

需说明, 研究区内早志留世片麻状花岗质岩石稀土元素配分模式均显示Lu相对富集, 究其原因可能较复杂。韩吟文等(2003)认为, Lu在锆石、榍石、磷灰石等副矿物中具有明显的富集特征, 其中在锆石中分配系数达345, 比La等元素高近100倍。通过查阅1:5万区域地质调查报告, 人工重砂分析鉴定结果显示, 研究区早志留世片麻状花岗质岩石主要副矿物为锆石、榍石、磷灰石、绿帘石、赤褐铁矿等, Lu相对富集可能与测试样品中富集锆石等副矿物有关。

5 讨论

5.1 片麻状花岗质岩石形成时代

研究区片麻状花岗质岩石同位素测年样品中锆石多呈自形—半自形, 透明度好, 表面光滑, 振荡环带清晰, 不发育变质重结晶作用形成的锆石增生边, 与变质锆石CL图像差异明显, 说明其未遭受后期变质变形作用的改造, 为典型的岩浆结晶锆石的特征

(图4、图5); 镍石Th/U值主要介于0.1~0.64之间, 亦显示岩浆镍石的特征。在镍石U-Pb年龄谱和图中, 2件同位素测年样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄均位于U-Pb谐和线上或其附近(图6), 说明测年分析结果可信度较高, $443.0\pm1.2\text{ Ma}$ 和 $441.9\pm1.6\text{ Ma}$ 的测年结果为片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩的岩浆结晶年龄, 表明侵位时代为早志留世早期。

5.2 岩石成因类型

研究区片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩 SiO_2 含量介于65.34%~72.58%之间, 变化范围较宽; Na_2O 含量平均为3.52%, 大于3.2%;

$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 平均值低, 为1.01, 明显小于1.29; δEu 值介于0.78~0.98之间, 大于0.6; $A_{\text{lo}}=1.01\sim1.14$, 平均1.08, 小于1.1; $\text{Rb/Sr}=0.18\sim0.60$, 平均0.40, 远远小于11.7; $\text{K/Rb}=237\sim340$, 平均260.01, 明显大于67, 总体显示I型花岗岩(同熔型花岗岩)的特征(高秉璋等, 1991)。在A-C-F图解(图8-a)中, 片麻状中细粒花岗闪长岩样品点落入I型花岗岩区, 片麻状细粒二长花岗岩样品点落在I型花岗岩区与S型花岗岩区分界线两侧(Setsuya et al., 1979)。

综合上述特征, 确定研究区片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩成因类型为I型花岗岩。

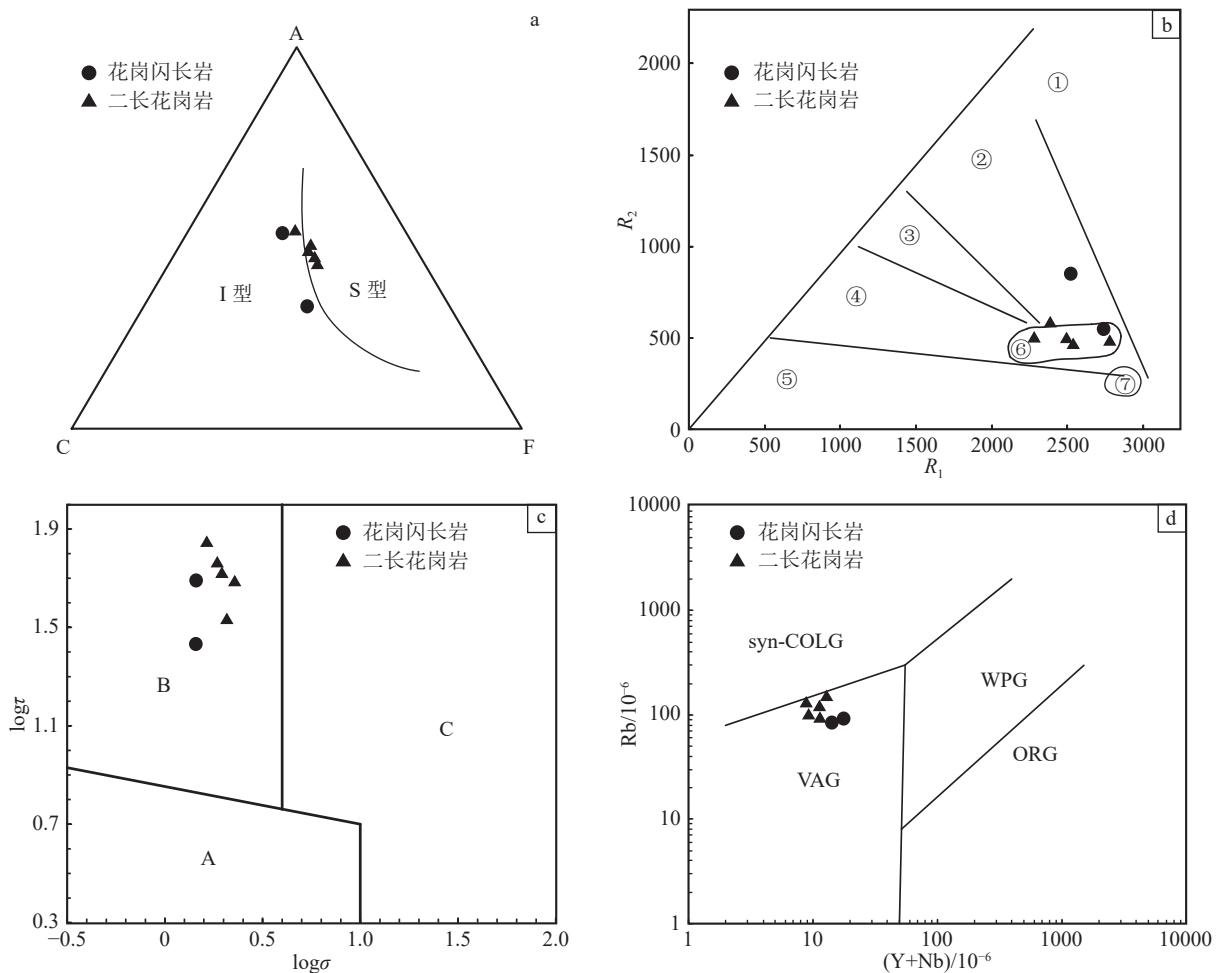


图8 早志留世侵入岩成因类型及构造环境判别图解

Fig. 8 Illustration of the genetic types and tectonic environment of Early Silurian intrusive rocks

a—A-C-F图解(据 Setsuya et al., 1979), I—I型花岗岩区; S—S型花岗岩区; b— R_1 - R_2 图解(据 Batchelor et al., 1985), ①—地幔分离型; ②—板块碰撞前; ③—碰撞后抬升; ④—造山晚期; ⑤—非造山型; ⑥—同碰撞期; ⑦—造山期后; c— $\log\sigma$ - $\log\tau$ 图解(据 Rittmann, 1973), A—非造山带火山岩; B—造山带火山岩; C—为A、B派生出的碱性、偏碱性火山岩; d— $(\text{Yb}+\text{Nb})-\text{Rb}$ 图解(据 Pearce et al., 1984), ORG—洋脊花岗岩, WPG—板内花岗岩

5.3 构造环境

研究区片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩均属于钙碱性系列岩石,成因类型为I型花岗岩;岩石化学特征兼具岛弧岩浆岩和造山带岩浆岩双重特征;微量元素蛛网图均表现为大离子亲石元素K、Rb及放射性生热元素U、Th明显富集,高场强元素Nb、P、Ti亏损(图7-a),与Pearce(Pearce et al., 1984)划分的火山弧花岗岩特征一致;稀土元素配分模式曲线呈右倾斜曲线(图7-b),与I型花岗岩及岛弧花岗岩特征基本一致。

在 R_1-R_2 图解(图8-b;Batchelor et al., 1985)中,片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩的样品点均落在同碰撞期花岗岩区,在 $\text{Log}\tau-\text{Log}\sigma$ 图解(图8-c;Rittmann, 1973)中,所有样品点均投入造山带火山岩区(B区),在(Yb+Nb)-Rb图解(图8-d;Pearce et al., 1984)中,所有样品点均投入火山弧花岗岩(VAG)区。

花岗岩产出的构造背景具有多样性,肖庆辉等(2002)将造山花岗岩划分为岛弧花岗岩、大陆弧花岗岩、大陆碰撞花岗岩及造山期后岗岩。区内片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩出露于红柳河-月牙山-洗肠井板块缝合带的北部,形成于早志留世。根据学者在研究区及南部临区开展的1:5万区域地质调查成果(候青叶等,2012;武鹏等,2012;郑荣国等,2012;胡新苗等,2015;胡醒民等,2016;廖云峰等,2016)及学者对内蒙古北山地区古生代构造背景、构造格局、大地构造相及构造演化的研究成果(周国庆等,2000;龚全胜等,2003;杨建国等,2012;杨合群等,2012;王国强等,2021),研究区南侧红柳河-月牙山-洗肠井板块缝合带内在早寒武世(约530 Ma)形成蛇绿岩套,自下而上由超基性杂岩、辉长岩、层状玄武岩和枕状玄武岩及放射虫硅质岩组成;奥陶纪—志留纪,塔里木板块由南向北运动,北山洋逐渐闭合,洋壳不断向北俯冲,在平行红柳河-月牙山-洗肠井板块缝合带的北部发生了强烈的中性、中基性火山喷发(奥陶纪—志留纪公婆泉组)及与其紧密伴生的大规模闪长岩-花岗闪长岩-二长花岗岩侵入活动,是塔里木板块与哈萨克斯坦板块之间洋壳俯冲的产物,代表着当时的火山弧,称为东七一山-斜山早古生代岛弧带。研究区早志留世片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩产出的区域大地构造位置位于东七一山-斜山早

古生代岛弧带内。

根据研究区早志留世片麻状花岗岩产出的区域大地构造位置、岩石地球化学特征、图解判别及区域大地构造演化历史综合分析,确定研究区早志留世片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩属于造山带花岗岩,形成于同造山俯冲增生至碰撞的岛弧环境,其形成的区域大地构造背景与北山洋闭合、洋壳由南向北俯冲密切相关。

6 结 论

(1)研究区片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩为同源岩浆演化序列中不同期次的侵入岩,二者均被泥盆纪—石炭纪侵入岩侵入,LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄加权平均值分别为 443.0 ± 1.2 Ma和 441.9 ± 1.6 Ma,侵位时代为早志留世早期。

(2)岩石地球化学特征表明,片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩均属于钙碱性系列岩石,成因类型为I型花岗岩。

(3)片麻状中细粒花岗闪长岩和片麻状细粒二长花岗岩属于造山带花岗岩,形成于同造山俯冲增生至碰撞的岛弧环境,形成的区域大地构造背景与北山洋闭合,洋壳由南向北俯冲密切相关。

致谢:本文编写过程中“内蒙古1:5万旱山(K47E015013)、小尘包(K47E015014)、望京山(K47E016013)、涌珠泉幅(K47E016014)区域地质调查”项目组成员提供了大量参考资料;审稿专家提出了珍贵的修改意见,在此一并致谢。

参 考 文 献

- Anderson T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59–79.
- Boynton, W. V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorites studies[C]//Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry. New York, Elservier: 63–114.
- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48(1/4): 43–55.
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, et al. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1/2): 47–69.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.00—A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70.

- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1/2): 537–571.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *GSA Bulletin*, 101: 635–643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3/4): 215–224.
- Nakada S, Takahashi M. 1979. Regional variation in chemistry of the Miocene intermediate to felsic magmas in the Outer Zone and the Setouchi Province of Southwest Japan[J]. *Journal of the Geological Society of Japan*, 85(9): 571–582(in Japanese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983.
- Rittmann A. 1973. Stable Mineral Assemblages of Igneous Rocks[M]. Oxford London: Blackwell Scientific Publication.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42(1): 313–345.
- Vinogradov A P. 1962. Average contents of chemical elements in the principal types of igneous rocks of the Earth's crust[J]. *Geokhimiya*, 7(7): 641–664.
- 戴霜, 方小敏, 张翔, 等. 2003. 北山中部地区闪长岩-花岗岩类成因及构造背景[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 39(1): 86–92.
- 董洪凯, 孟庆涛, 刘广, 等. 2018. 内蒙古北山地区标山一带早志留世花岗岩地球化学特征及构造意义[J]. *西北地质*, 51(1): 159–174.
- 高秉璋, 洪大卫, 方宗斌, 等. 1991. 花岗岩类区 1:5 万区域地质填图方法指南[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 龚全胜, 刘明强, 梁宏明, 等. 2003. 北山造山带大地构造相及构造演化[J]. *西北地质*, 36(1): 11–17.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等. 2003. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 1980. 中国大地构造及演化[M]. 北京: 科学出版社.
- 候青叶, 王忠, 刘全宝, 等. 2012. 北山月牙山蛇绿岩地球化学特征及 SHIMP 定年[J]. *现代地质*, 26(5): 1008–1018.
- 胡新苗, 赵国春, 胡新悦, 等. 2015. 内蒙古北山地区月牙山蛇绿岩构造混杂岩带的地质特征、形成时代及大地构造意义[J]. *地质通报*, 34(2/3): 425–436.
- 胡醒民, 廖云峰, 程海峰, 等. 2016. 内蒙古月牙山一带基性火山岩的地质特征、形成时代及归属[J]. *地质通报*, 35(8): 1234–1242.
- 梁国庆, 徐旭明, 孟庆涛, 等. 2016. 内蒙古 1:5 万旱山 (K47E015013)、小尘包 (K47E015014)、望京山 (K47E016013)、涌珠泉幅 (K47E016014) 区域地质矿产调查[R]. 河北省区域地质矿产调查研究所.
- 李四光. 1973. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社.
- 李春昱. 1983. 我国北部边陲及邻区的古板块构造与欧亚大陆的形成[M]. 中国北方板块构造文集, (1): 3–16.
- 黎彤. 1984. 大洋地壳和大陆地壳的元素丰度[J]. *大地构造与成矿学*, 8(1): 19–27.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 廖云峰, 胡新苗, 程海峰, 等. 2016. 内蒙古月牙山蛇绿岩的岩石学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 35(8): 1243–1254.
- 孟庆涛, 徐翠, 张正平, 等. 2021. 内蒙古北山地区阿民乌素公婆泉组变质火山岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *矿物岩石*, 41(1): 67–79.
- 邱家骥, 林景仟. 1991. 岩石化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 23(6): 1217–1238.
- 武鹏, 王国强, 李向民, 等. 2012. 甘肃北山地区牛圈子蛇绿岩的形成时代及地质意义[J]. *地质通报*, 31(12): 2032–2037.
- 王国强, 李向民, 徐学义, 等. 2021. 北山造山带古生代蛇绿混杂岩研究现状及进展[J]. *地质通报*, 40(1): 71–81.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社.
- 于福生, 王春英, 漆家福, 等. 2000. 甘新交界红柳河地区早志留世蛇绿混杂岩的厘定及大地构造意义[J]. *矿物岩石*, 20(4): 60–66.
- 杨合群, 李英, 李文明, 等. 2009. 北山花岗岩 S 型/I 型空间变化规律及含矿性[J]. *地球学报*, 30(5): 627–633.
- 杨合群, 李英, 赵国斌, 等. 2010. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. *西北地质*, 43(1): 26–36.
- 杨建国, 谢春林, 王小红, 等. 2012. 甘肃北山地区基本构造格局和成矿系列特征[J]. *地质通报*, 31(2): 422–438.
- 杨合群, 赵国斌, 李英, 等. 2012. 新疆-甘肃-内蒙古衔接区古生代构造背景与成矿的关系[J]. *地质通报*, 31(2): 413–421.
- 周国庆, 赵建新, 李献华, 等. 2000. 内蒙古月牙山蛇绿岩特征及形成的构造背景: 地球化学和 Sr-Nd 同位素制约[J]. *地球化学*, 29(2): 108–119.
- 郑荣国, 吴泰然, 张文, 等. 2012. 北山地区月牙山-洗肠井蛇绿岩的地球化学特征及形成环境[J]. *地质学报*, 86(6): 961–971.