引用格式：丁奕文，邵兆刚，陈言飞，等，2026. 北山造山带黑鹰山晚古生代—早中生代火山岩的地球化学特征：古亚洲洋从俯冲到碰撞的指示[J]. 地质力学学报，32（2）：333−348. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025017

Citation: DING Y W，SHAO Z G，CHEN Y F，et al.，2026. Geochemical characteristics of Late Paleozoic–Early Mesozoic volcanic rocks in Heiyingshan, Beishan Orogenic Belt: evidence of the transition from subduction to collision of the Paleo-Asian Ocean[J]. Journal of Geomechanics，32（2）：333−348. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025017

北山造山带黑鹰山晚古生代—早中生代火山岩的地球化学特征：古亚洲洋从俯冲到碰撞的指示

丁奕文[1,2]，邵兆刚[1,2]，陈言飞[1,2]，陈宣华[1,2]，李　冰[1,2]，余　苇[3]，徐大兴[1,2]，韩乐乐[1,2]

DING Yiwen[1,2]，SHAO Zhaogang[1,2]，CHEN Yanfei[1,2]，CHEN Xuanhua[1,2]，LI Bing[1,2]，YU Wei[3]，XU Daxing[1,2]，HAN Lele[1,2]

1. 中国地质科学院，北京 100037；
2. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室，北京 100037；
3. 合肥工业大学资源与环境工程学院，安徽 合肥 230009

1. *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100037, *China*;
2. *State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration*, *Beijing* 100037, *China*;
3. *School of Resources and Environmental Engineering*, *Hefei University of Technology*, *Hefei* 230009, *Anhui*, *China*

Geochemical characteristics of Late Paleozoic–Early Mesozoic volcanic rocks in Heiyingshan, Beishan Orogenic Belt: evidence of the transition from subduction to collision of the Paleo-Asian Ocean

Abstract: ［**Objective**］It is generally accepted that the Paleo-Asian Ocean in the northern part of the Beishan Orogenic Belt was in the stage of ocean–continent evolution during the Carboniferous–Permian. However, the timing of the closure of the Paleo-Asian Ocean remains controversial. The Heiyingshan area, located at the northern margin of the Beishan Orogenic Belt, is a key area for studying the evolution of the Paleo-Asian Ocean. This study analyzes the geochemical characteristics of tuffs in this area to reveal their tectonic setting and further constrain the evolution of the Paleo-Asian Ocean in the northern Beishan Orogenic Belt. ［**Methods**］Late Carboniferous and Late Triassic volcanic tuffs exposed in the Heiyingshan area were analyzed using petrological and geochemical methods. Major, trace, and rare earth elements concentrations were determined to obtain the geochemical characteristics of the volcanic tuffs. Combined with published regional volcanic rock ages and geochemical data, the petrogenesis and tectonic setting of the volcanic tuff are discussed. ［**Results**］The Late Carboniferous volcanic tuff belongs to the peraluminous calc-alkaline series; it is enriched in large ion lithophile elements (LILE; i.e., Rb, Ba, Th and U) and depleted in high field strength elements (HFSE; i.e., Nb, Ta, Zr, Hf and Ti). The total rare earth element content (ΣREE) ranges from 74.64×10^{-6} to 142.45×10^{-6}, with significant fractionation between light and heavy REEs (LREE/HREE=5.14–7.49, $(La/Yb)_N$=4.58–6.36). The chondrite-normalized REE

基金项目：国家科技重大专项（2024ZD1000103）；中国地质调查局地质调查项目（DD20230229，DD20190011）

This research was financially supported by the National Science and Technology Major Project (Grant No. 2024ZD1000103) and the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grant Nos. DD20230229 and DD20190011).

第一作者：丁奕文（1997—），女，在读博士，主要从事构造地质学、地球化学等研究。Email：dyw1013429406@foxmail.com

通信作者：邵兆刚（1970—），男，研究员，主要从事区域地质构造、沉积相与古环境研究。Email: shaozhaogang@sina.com

收稿日期：2025−02−28；**修回日期**：2025−09−07；**录用日期**：2025−09−08；**网络出版日期**：2025−09−08；**责任编辑**：范二平

Received：2025−02−28；Revised：2025−09−07；Accepted：2025−09−08；Available Online：2025−09−08；Handling Editor：FAN Erping

distribution pattern is right-leaning, with a weak negative Eu anomaly (δEu=0.35–0.66). These characteristics are indicative of I-type granite. The Late Triassic volcanic tuff belongs to the peraluminous high-K calc-alkaline series. It is enriched in silicon and alkali but depleted in aluminum and magnesium. This tuff exhibits a strong negative Eu anomaly (δEu=0.02–0.22). Its chondrite-normalized REE distribution pattern is a slightly right-leaning 'seagull type'. This tuff is enriched in LILE, (e.g., Rb, Th and U), depleted in incompatible elements (e.g., Ba, Nb, Zr and Ti), and depleted in HFSE, (e.g., Hf and Zr). These characteristics are typical of S-type granite. The Th content of the Late Carboniferous and Late Triassic rock samples in the Heiyingshan area ranges from 7.66 to 32.2 μg/g, with an average of 19.24 μg/g, which is much higher than the average mantle abundance and closer to the crust. The Nb/Ta ratios of the rock samples range from 8.01 to 12.78, with an average of 10.36, which is much lower than the mantle average of 60 and closer to the crust average of 11. In addition, the Ba/La ratios of the Late Carboniferous volcanic rocks range from 19.19 to 24.09, with an average of 21.64, slightly higher than the continental crust average of 15.63. [**Conclusions**] The Late Carboniferous and Late Triassic volcanic tuffs in the Heiyingshan area formed in the subduction and collision setting of the Paleo-Asian Ocean, respectively, indicating that the tectonic environment in the Hongshishan-Heiyingshan area transitioned from subduction to collision between the Late Carboniferous and the Late Triassic. The volcanic magma in this area was mainly derived from partial melting of the crust, with the Late Carboniferous volcanic rocks possibly mixed with a small amount of mantle-derived materials. [**Significance**] The geochemical characteristics of the Late Carboniferous and Late Triassic volcanic tuffs in the Heiyingshan area provide evidence for the subduction–collision processes of the Paleo-Asian Ocean in the Beishan Orogenic Belt. The results constrain the timing of the tectonic environment transformation in the Hongshishan–Heiyingshan area in the northern Beishan Orogenic Belt, which is of great significance for understanding the closure of the Paleo-Asian Ocean.

Keywords: tuff; Beishan Orogenic Belt; Late Carboniferous–Late Triassic; subduction–collision evolution

摘　要：黑鹰山地区位于北山造山带北缘，是研究北山造山带古亚洲洋演化的关键地区。文章对黑鹰山地区出露的晚石炭世、晚三叠世火山凝灰岩进行了岩石地球化学研究。研究结果表明，晚石炭世火山凝灰岩属于过铝质钙碱性系列，富集大离子亲石元素（LILE）Rb、Ba、Th、U，亏损高场强元素Nb、Ta、Zr、Hf、Ti；稀土元素总量（ΣREE）为74.64×10^{-6}～142.45×10^{-6}，轻/重稀土分馏明显（LREE/HREE=5.14～7.49、（La/Yb）$_N$=4.58～6.36），稀土元素配分模式呈右倾特征，具有弱的负Eu异常（δEu=0.35～0.66），表现出类I型花岗岩特征。晚三叠世火山凝灰岩属于弱过铝质高钾钙碱性系列，富硅、碱，贫铝、镁，具有强烈的Eu负异常（δEu=0.02～0.22）；稀土元素配分模式呈略微右倾的"海鸥型"，富集Rb、Th、U等大离子亲石元素，亏损Ba、Nb、Zr、Ti等不相容元素，具有类S型花岗岩的特征。黑鹰山地区晚石炭世和晚三叠世火山凝灰岩分别形成于北山地区古亚洲洋俯冲和碰撞的构造环境，岩浆来源主要为地壳熔融，指示晚石炭世至晚三叠世红石山—黑鹰山一带可能发生了构造环境的转变。

关键词：凝灰岩；北山造山带；晚石炭世—晚三叠世；俯冲−碰撞演化

中图分类号：P546　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)02−0333−16

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025017

0　引言

北山造山带地处塔里木板块、华北板块以及西伯利亚板块的交汇处，是连接南天山缝合带和索伦缝合带的枢纽，也是研究古亚洲洋演化过程的重要位置（Xiao et al., 2010; Soldner et al., 2020）。在古生代—早中生代多期俯冲−增生作用和中—新生代板内变形作用影响下，北山造山带经历了多期岩浆−变质事件和复杂的构造变形事件（Xiao et al., 2010; Zhang and Cunningham, 2012）。针对北山造山带古亚洲洋的古生代—中生代俯冲过程以及最终闭合两大问题，众多学者对北山造山带古生代和中生代岩浆作用进行了深入研究（Li et al., 2012; Zhang et al., 2012a, 2012b; 牛亚卓等, 2014; 李敏等, 2018; Wang et al., 2018; 朱炜等, 2019）。已有研究表明，晚古生代（石炭纪—二叠纪，310～260 Ma）该地区古亚洲洋的演化处于洋陆俯冲阶段（Ao et al., 2010; Mao et al., 2012, 2022; 李敏等, 2018; Xu et al., 2019; Wang et al., 2022; Song et al., 2024）。关于该地区古亚洲洋的闭

合时限，部分学者认为在二叠纪（275～267 Ma）古亚洲洋已经闭合（辛后田等，2020；Zheng et al.，2020；张国震等，2022）。如辛后田等（2020）和张国震等（2022）在北山识别出了一套辉长岩和花岗岩侵位，且发现下—中二叠统双堡塘组下部发育角度不整合，认为古亚洲洋最终闭合于中二叠世之后。还有学者认为古亚洲洋于三叠纪（245～222 Ma）闭合（Mao et al.，2023；Song et al.，2024），如 Mao et al.（2023）通过 U-Pb 年代学得到了限制北山二叠系弧前蛇绿岩增生的最小年龄（～234 Ma）；Xu et al.（2019）利用古地磁资料指示北山二叠纪洋盆的存在；Song et al.（2024）通过对古亚洲洋西段（天山）、中段（北山和阿拉善地块）及东段（索伦缝合带和长春—延吉地区）的区域地质特征进行系统研究，提出古亚洲洋西段、中段、东段 3 段在中—晚三叠世几乎同时闭合的认识。此外，目前将北山造山带古生代和中生代岩浆作用进行统一研究的内容较少。这一方面是因为以往的研究认为中生代无显著的岩浆活动（李舢，2013；卫彦升等，2020；辛后田等，2020），另一方面是因为古生代和中生代岩浆岩在同一地区同时出露的较少。

在黑鹰山地区野外地质调查中发现，古生代逆冲推覆构造之下存在连续分布的中生代火山凝灰岩。根据这一发现，围绕北山造山带北缘黑鹰山地区晚石炭世和晚三叠世火山凝灰岩开展了岩石学和岩石地球化学研究；结合已有年龄和地球化学数据，讨论了火山岩岩石成因和形成的大地构造背景，进一步探索古亚洲洋从俯冲到碰撞的演化过程。

1　地质背景

北山造山带分布着 4 条不同时期的蛇绿混杂岩带，由北至南包括晚古生代的红石山−蓬勃山蛇绿混杂岩带、古生代石板井−小黄山蛇绿混杂岩带、早古生代的红柳河−牛圈子−洗肠井蛇绿混杂岩带以及晚古生代的柳园−音凹峡蛇绿混杂岩带（图 1；Jahn et al.，2004；Zhang et al.，2015；牛文超等，2020）。Zuo et al.（1991）以明水−小黄山蛇绿混杂岩带为边界，将造山带分为北部亲哈萨克斯板块的北山北部和南部亲塔里木板块的北山南部（图 1）。

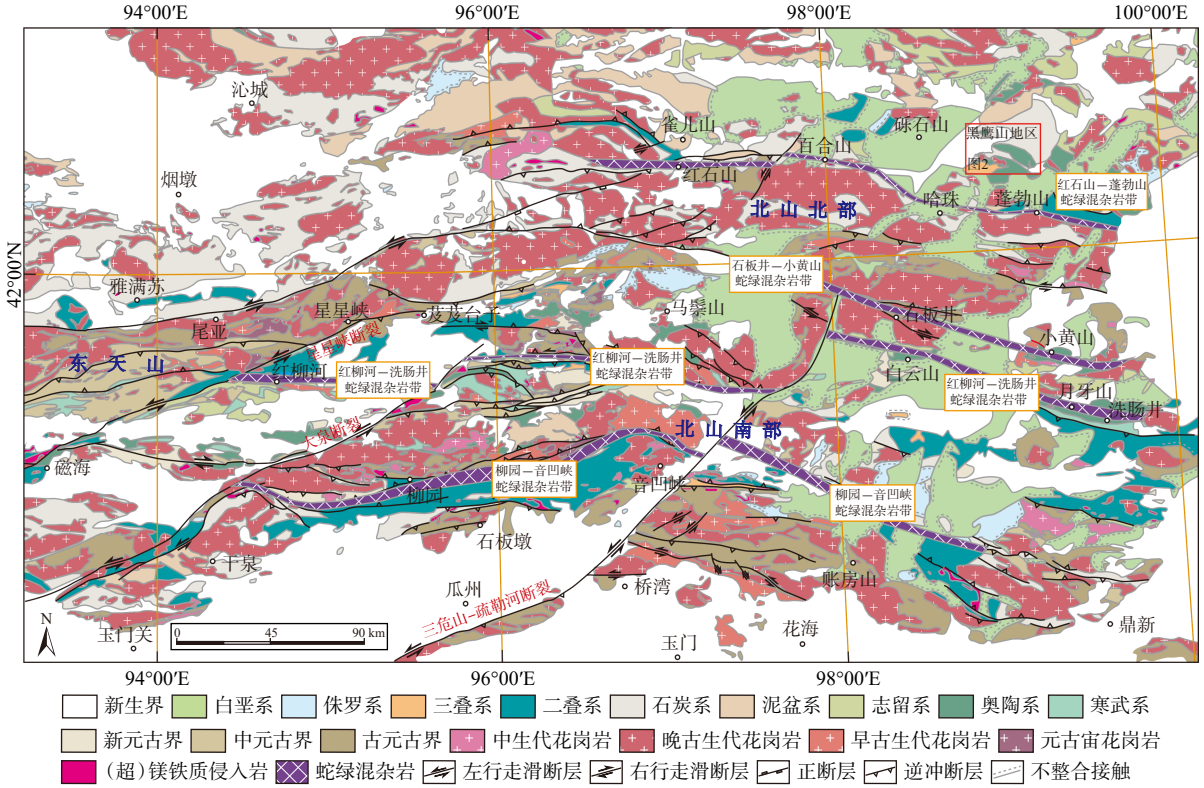


图 1　北山地区地质图（据 Zhang and Cunningham，2012 修改）

Fig. 1　Geological map of the Beishan area (modified after Zhang and Cunningham, 2012)

研究区位于北山造山带北部的黑鹰山地区(图 1),毗邻红石山−百合山−蓬勃山晚古生代蛇绿混杂岩带。魏志军等(2004)研究表明这条蛇绿混杂岩带形成于早石炭世晚期的初始小洋盆环境。近年来的地球化学、岩石学研究也表明,该蛇绿混杂岩带是晚古生代弧后扩张(“红海型”初始洋盆)的产物(王国强等,2014;牛文超等,2020;卫彦升等,2020)。谢春林等(2009)、陈德潜和陈刚(1990)的研究表明,北山造山带的北缘可能是古亚洲洋的缝合带(位于蒙古国境内,具体可能是 Zoolen 洋)。这一缝合带的形成可能与古亚洲洋向南俯冲有关,在此过程中发育了雀儿山−英安山弧和红石山−百合山−蓬勃山弧后小洋盆(谢春林等,2009)。黑鹰山地区内出露地层主要有中奥陶统咸水湖群、上石炭统绿条山组、白山组以及上三叠统(图 2)。中奥陶统咸水湖群包括 2 个岩性段,一段为火山岩组,岩性包括玄武安山岩、安山岩、英安岩、夹硅质岩和板岩;二段为碎屑岩组,岩性为长石质硬砂岩、泥质板岩、粉砂质板岩、夹安山岩及熔岩透镜体,该地层形成于古亚洲洋俯冲过程中的大陆斜坡沉积环境(左国朝等,1987)。上石炭统白山组主要出露于黑鹰山中部,岩性组成为安山玄武岩、玄武岩、斜长流纹岩、英安质角砾熔结凝灰岩(牛亚卓等,2014)。上石炭统绿条山组在黑鹰山大量出露,主要分布在黑鹰山中上部,岩性为细粒杂砂岩夹砾岩、灰岩(牛亚卓等,2014)。上三叠统分布于黑鹰山西南部,主要由中酸性火山岩与碎屑岩的组合构成,岩性包括玄武岩、凝灰岩、火山角砾岩、凝灰质砂岩、以及夹层中的黑色和黄绿色页岩、硅质岩、砂岩和灰岩,形成于北山北缘代表的古亚洲洋进入陆内碰撞增生阶段(辛后田等,2020;邵兆刚等,2024)。

北山造山带北缘奥陶纪岩浆活动较为强烈,火

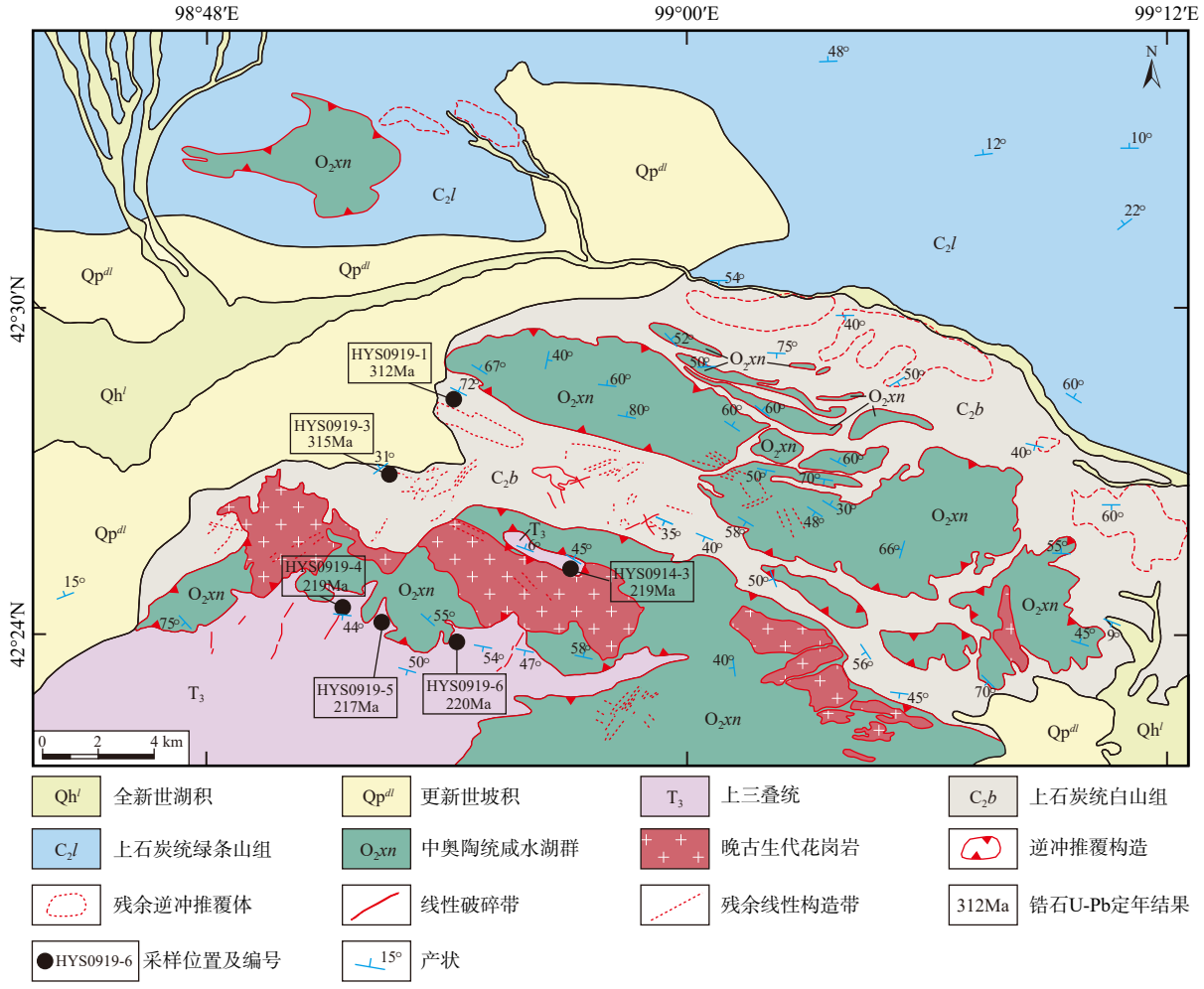


图 2 北山造山带北部黑鹰山地区地质图(底图据邵兆刚等,2024 修改;年龄数据来源于邵兆刚等,2024)

Fig. 2 Geological map of Heiyingshan area in the northern Beishan Orogenic Belt (modified after Shao et al., 2024; age data are cited from Shao et al., 2024)

山岩发育，主要分布在红石山−百合山蛇绿混杂岩带的北侧，包括百合山北部、砾石山和呼鲁赤古特等地，呈北西—南东向展布。岩石类型以中性、中—基性火山熔岩为主，夹少量中酸性火山熔岩，包括深绿色安山玄武岩、具有杏仁状结构的玄武安山岩及辉石安山岩等（辛后田等，2020）。黑鹰山地区内还发育晚古生代岩浆岩带，分布在红石山−百合山蛇绿构造混杂岩带的南北两侧（图 2）。北侧的小狐狸山岩浆弧发育石炭纪侵入岩，包括花岗闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、辉长岩和闪长岩，侵入奥陶系咸水湖群。中生代以来，北山造山带北缘主要经历了中三叠世和晚三叠世 2 期岩浆活动（刘明强等，2006；黄增保等，2011；Zhang and Cunningham, 2012；Li et al., 2020；辛后田等，2020）。中三叠世岩浆岩主要出露于西段的红石山、小草滩和马鞍山北地区，晚三叠世岩浆岩主要分布在小红山、小狐狸山和红尖兵山等地。晚三叠世岩浆活动向东可延伸至额济纳旗东部的呼和陶尔盖和金都敖包地区（Xie et al., 2018；Li et al., 2020）。

黑鹰山地区发育典型的逆冲推覆构造，奥陶系以飞来峰的形式分布于上石炭统白山组、上三叠统火山岩之上（图 2；邵兆刚等，2024）。野外地质调查以及遥感解译表明，呈近西—东向灰白色条带展布的晚三叠世凝灰岩被上盘奥陶系推覆体“截断”（图 3a、3b）。

2 样品与测试

2.1 凝灰岩岩石学特征

此次共采集了 6 个火山凝灰岩样品，岩石未见明显的交代和蚀变现象。采样位置见图 2。其中样品 HYS0919-4、HYS0919-5 和 HYS0919-6 的岩性均为白色、灰白色流纹质凝灰岩（图 3c—3e），所采地层原定为上二叠统方山口组，最新研究证明其时代为晚三叠世（217～220 Ma；邵兆刚等，2024）。岩石为块状构造，主要由石英和少量的斜长石、岩屑和黑云母组成。石英为半自形—他形，含量可达 70%～80%；长石含量约为 10%，岩屑含量约为 5%。另外，部分石英晶体中发育原生熔融包裹体及流体−熔融包裹体（图 3d），表明其结晶时母岩浆已处于硅饱和至过饱和状态。样品 HYS0914-3 为黄褐色酸性熔结凝灰岩，岩石斑晶以长石为主、石英含量稀少，其形成时代为 219 Ma（邵兆刚等，2024）。样品 HYS0919-1 和 HYS0919-3 采自上石炭统白山组（图 3f、3g），岩性为浅灰绿色、灰褐色流纹质凝灰岩，岩石表面可见棱角状石英及长石斑晶，其形成时代分别为 312 Ma、315 Ma（邵兆刚等，2024）。

2.2 测试方法

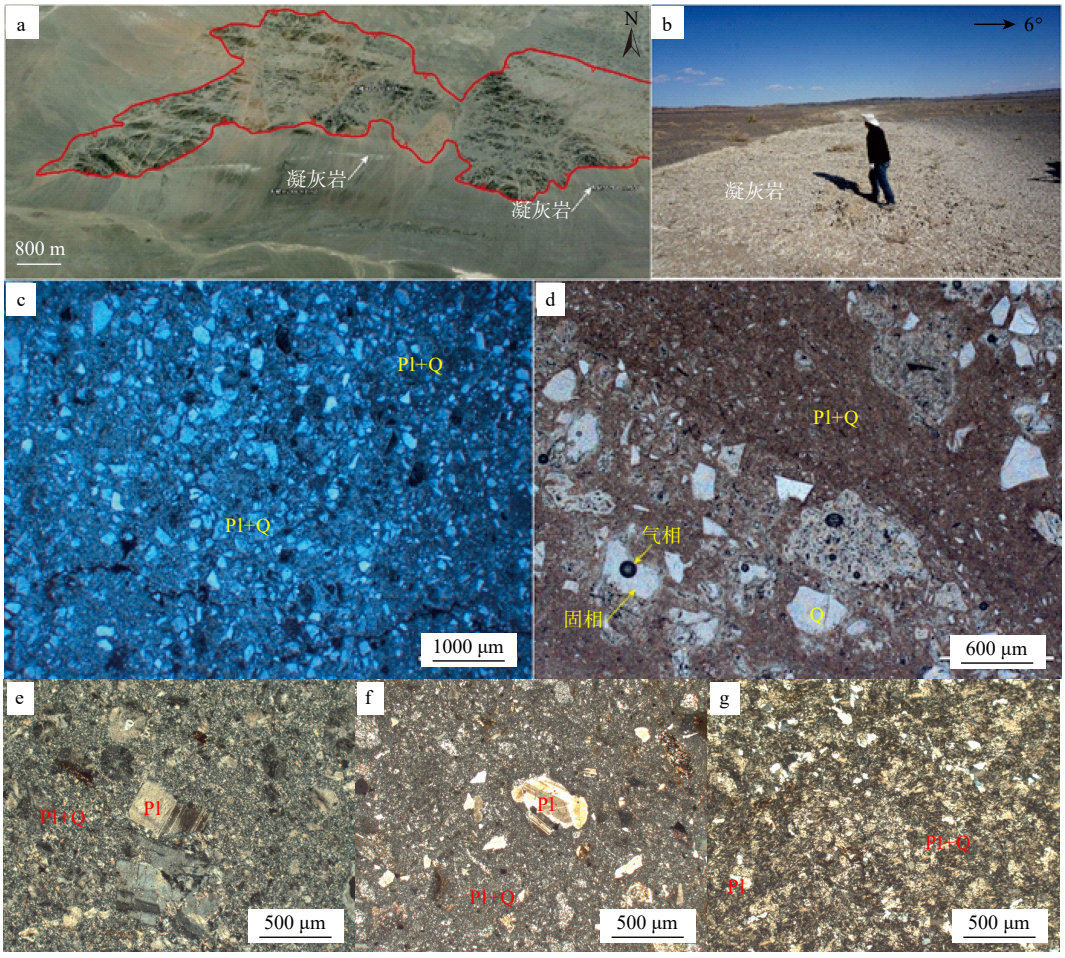
样品的制备在河北省廊坊岩拓地质服务有限公司完成，样品加工在无污染设备中进行。主、微量及稀土元素的测量分析在广州澳实矿物实验室进行。采用 PANalytical-PW2424 型 X 射线荧光光谱仪（XRF）进行主量元素分析，检测限度<0.01%，测试精度优于 5%；采用 Agilent-7900 型电感耦合等离子体质谱仪对稀土元素和微量元素测定，测试精度优于 10%。

3 分析结果

6 个岩石样品的年龄分为 2 组：样品 HYS0919-1 和 HYS0919-3 形成于晚石炭世（312 Ma、315 Ma）；样品 HYS0919-4、HYS0919-5、HYS0919-6 和 HYS0914-3 形成于晚三叠世（217～220 Ma）。岩石样品的主、微量元素测试分析结果见表 1。

3.1 主量元素

主量元素测试结果显示，晚石炭世样品 HYS0919-1 和 HYS0919-3 的 SiO_2 含量为 77.02%～78.29%，TiO_2 含量为 0.07%～0.20%，Al_2O_3 含量为 11.49%～12.00%，$Fe_2O_3^T$ 为 1.37%～1.52%，MgO 的含量介于 0.07%～0.38%。在 TAS 图解中 2 个样品均投在了亚碱性流纹岩区域（图 4a），在 A/CNK-A/NK 图解中其落在了过铝质范围（图 4b），SiO_2-K_2O 图解结果指示其为钙碱性系列（图 4c），在 AR-SiO_2 图解中其落在了碱性范围（图 4d），属低钾拉斑玄武岩系列至钙碱性系列。晚三叠世样品 HYS0919-4、HYS0919-5、HYS0919-6 和 HYS0914-3 的 SiO_2 含量为 78.34%～80.86%，TiO_2 含量为 0.03%～0.05%，Al_2O_3 含量为 9.26%～12.39%，$Fe_2O_3^T$ 为 0.56%～0.89%，MgO 含量为 0.13%～0.43%。在火山岩分类命名的 TAS 图解上，4 个样品均落入流纹岩区域内（图 4a），A/CNK-A/NK 图解结果指示其具有过铝质特征（图 4b），结合 SiO_2-K_2O 图解显示的高钾钙碱性系列与 AR-SiO_2 图解（图 4c、4d），表明该岩石系列属过铝质高钾钙碱性系列。



Pl—斜长石；Q—石英

a—黑鹰山凝灰岩与上覆推覆体构造关系；b—凝灰岩露头照片；c—晚三叠世流纹质晶屑凝灰岩显微照片（样品号：HYS0919-4）；d—晚三叠世流纹质晶屑凝灰岩斑晶中的流体–熔体包裹体（样品号：HYS0919-5）；e—晚三叠世流纹质晶屑凝灰岩显微照片（样品号：HYS0919-6）；f—晚石炭世流纹质晶屑凝灰岩显微照片（样品号：HYS0919-1）；g—晚石炭世流纹质晶屑凝灰岩显微照片（样品号：HYS0919-3）

图 3 北山北部黑鹰山地区构造解译图、野外及岩石显微照片

Fig. 3 Google Earth satellite image, field photo, and rock micrographs of the Heiyingshan area in northern Beishan

(a) Structural relationship between the tuff and the overlying nappe in the Heiyingshan area; (b) Field photograph of a tuff outcrop; (c) Microphotograph of a Late Triassic rhyolitic crystal tuff (sample no.:HYS0919-4); (d) Fluid-melt inclusion in phenocrysts of a Late Triassic rhyolitic crystal tuff (sample no.: HYS0919-5); (e) Microphotograph of a Late Triassic rhyolitic crystal tuff (sample no.: HYS0919-6); (f) Microphotograph of a Late Carboniferous rhyolitic crystal tuff (sample no.: HYS0919-1); (g) Microphotograph of a Late Carboniferous rhyolitic crystal tuff (sample no.: HYS0919-3)

Pl—plagioclase; Q—quartz

3.2 稀土元素与微量元素

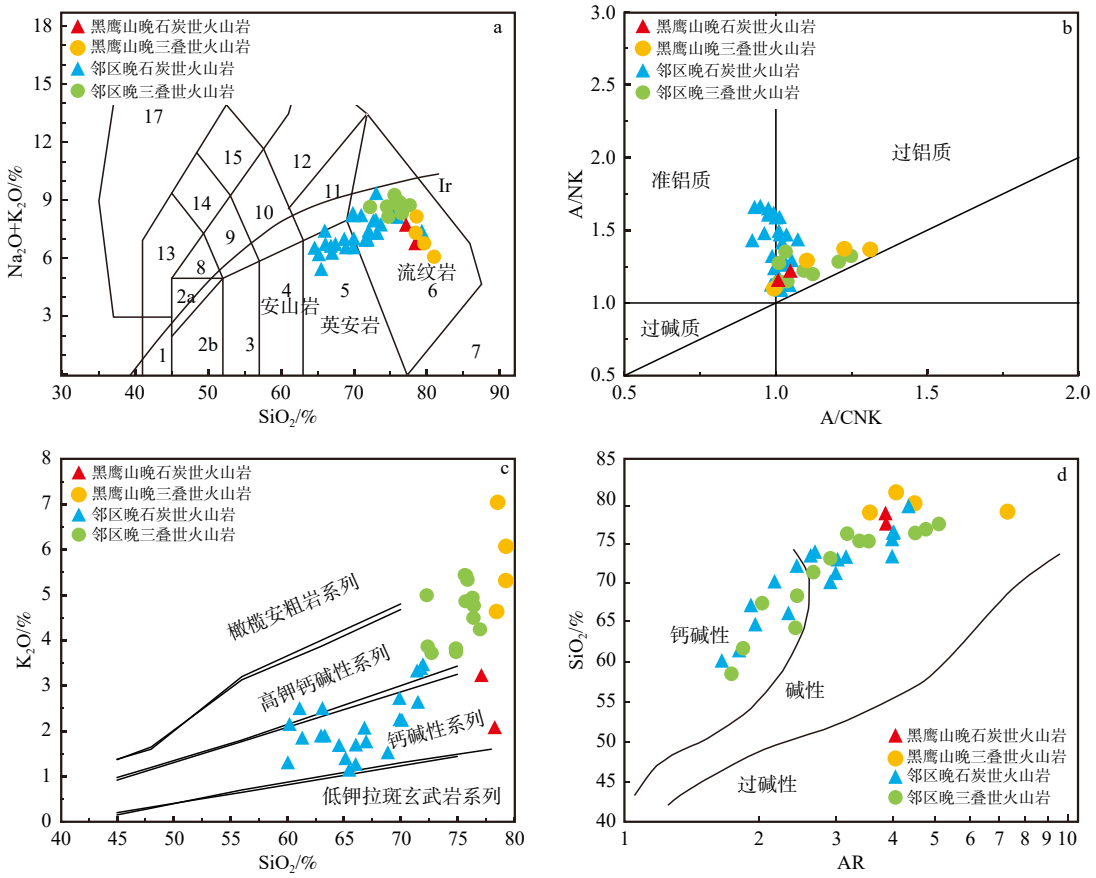
由表 1 和原始地幔标准化微量元素蛛网图（图 5a）可知，晚石炭世火山岩富集大离子亲石元素（LILE；如 Rb、Ba、Th 和 U等），亏损高场强元素（如 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti 等）；稀土元素总量（ΣREE）为 74.64×10^{-6}～142.45×10^{-6}，LREE/HREE=5.14～7.49，$(La/Yb)_N$=4.58～6.36。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线为右倾型，轻/重稀土分馏明显，具有弱的负 Eu 异常（δEu=0.35～0.66；图 5b）。晚三叠世火山岩富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素（LILE）和 La、Ce、Pr 等轻稀土元素，亏损 Ba、Nb、Zr、Ti 等不相容元素，亏损高场强元素 Hf、Zr。在原始地幔标准化蛛网图（图 5a）中，晚三叠世火山岩微量元素整体表现为向右倾的特征，Ba、Sr、Eu 和 Ti 存在显著的负异常。这表明岩浆演化过程中可能经历了较高程度的结晶分异作用，如斜长石、金红石、榍石的分离结晶。

表 1 黑鹰山火山岩的主量元素（%）、微量元素（$\times10^{-6}$）和稀土元素（$\times10^{-6}$）分析结果

Table 1 Major (wt%) and trace and rare earth element ($\times10^{-6}$) compositions of volcanic rocks from the Heiyingshan area

样品号	HYS0919-1	HYS0919-3	HYS0919-4	HYS0919-5	HYS0919-6	HYS0914-3
SiO_2	78.29	77.02	78.45	80.86	79.50	78.34
TiO_2	0.20	0.07	0.03	0.05	0.05	0.04
Al_2O_3	11.49	12.00	9.82	9.26	9.57	12.39
$Fe_2O_3^T$	1.52	1.37	0.89	0.76	0.66	0.56
MnO	0.06	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02
MgO	0.38	0.07	0.15	0.43	0.17	0.13
CaO	0.81	0.65	0.56	0.43	0.71	0.18
Na_2O	5.18	4.26	0.86	0.59	0.50	2.46
K_2O	2.08	3.22	7.02	5.30	6.05	4.62
P_2O_5	0.04	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
烧失量	1.36	1.35	1.79	2.31	2.02	1.03
总量	100.18	100.05	99.58	100	99.24	99.77
Rb	25.00	78.70	228.00	276.00	388.00	105.50
Ba	284.00	641.00	385.00	151.00	367.00	480.00
Th	7.66	11.65	21.80	24.30	32.20	17.80
U	2.25	3.25	6.94	5.76	6.52	7.28
Ta	0.43	0.60	2.91	2.95	3.38	0.82
Nb	4.70	6.50	23.30	37.70	39.10	6.60
Sr	131.50	58.40	60.00	136.00	90.40	121.50
Zr	113.00	148.00	99.00	88.00	111.00	82.00
Hf	3.30	4.90	5.40	5.00	5.80	3.90
La	14.80	26.60	23.80	8.10	36.80	16.90
Ce	32.20	53.80	47.50	22.40	88.10	36.50
Pr	3.37	6.68	7.53	3.06	13.45	4.38
Nd	12.50	25.70	35.40	14.10	66.50	16.80
Sm	2.47	5.81	10.05	3.98	22.90	4.04
Eu	0.51	0.65	0.12	0.06	0.14	0.30
Gd	2.19	5.52	9.02	3.88	22.4	4.25
Tb	0.35	0.95	1.34	0.81	3.61	0.78
Dy	2.13	5.98	7.03	5.74	18.85	5.19
Ho	0.49	1.38	1.43	1.34	3.52	1.23
Er	1.44	3.93	3.70	4.13	10.25	3.72
Tm	0.24	0.62	0.56	0.70	1.57	0.62
Yb	1.67	4.17	3.69	5.03	10.50	4.19
Lu	0.28	0.66	0.56	0.78	1.72	0.66
Y	13.10	34.80	33.50	29.50	96.80	31.10
ΣREE	74.64	142.45	151.73	74.11	300.31	99.56
LREE/HREE	7.49	5.14	4.55	2.31	3.15	3.82
$(La/Yb)_N$	6.36	4.58	4.63	1.16	2.51	2.89
δEu	0.66	0.35	0.04	0.05	0.02	0.22

注：$\delta Eu=Eu/(Sm_N\times Gd_N)^{1/2}$（Taylor and McLennan, 1985）；其中下标N为球粒陨石标准化值（Sun and McDonough, 1989）



邻区晚石炭世火山岩数据引自文献郝增元等(2020)、李敏等(2018)、徐旭明等(2018)、朱炜等(2019);邻区晚三叠世火山岩数据引自黄增保等(2011)、李敏等(2020)、杨镇熙等(2021);图 a 中数字代表不同火山岩类型:1—玄武岩;2a—玄武安山岩;2b—低碱玄武岩;3—安山岩;4—英安岩;5—流纹岩;6—碱性流纹岩;7—粗面岩;8—粗面安山岩;9—碱性粗面安山岩;10—粗面英安岩;11—碱性粗面岩;12—响岩;13—碱性玄武岩;14—霞石粗面岩;15—霞石岩;Ir—Irvine 分界线,用于区分碱性与亚碱性系列(Bas et al., 1986)

a—TAS 图解(Bas et al., 1986);b—A/CNK-A/NK 图解(Maniar and Piccoli, 1989);c—K_2O-SiO_2 图解(Peccerillo and Taylor, 1976);d—SiO_2-AR 图解(Wright, 1969)

图 4 黑鹰山及邻区火山岩主量元素地球化学特征

Fig. 4 Major element geochemical characteristics of volcanic rocks in the Heiyingshan and adjacent areas

(a) TAS diagram of volcanic rocks (Bas et al., 1986); (b) A/CNK–A/NK diagram (Maniar and Piccoli, 1989); (c) K2O–SiO2 diagram (Peccerillo and Taylor, 1976); (d) SiO2–AR diagram (Wright, 1969)

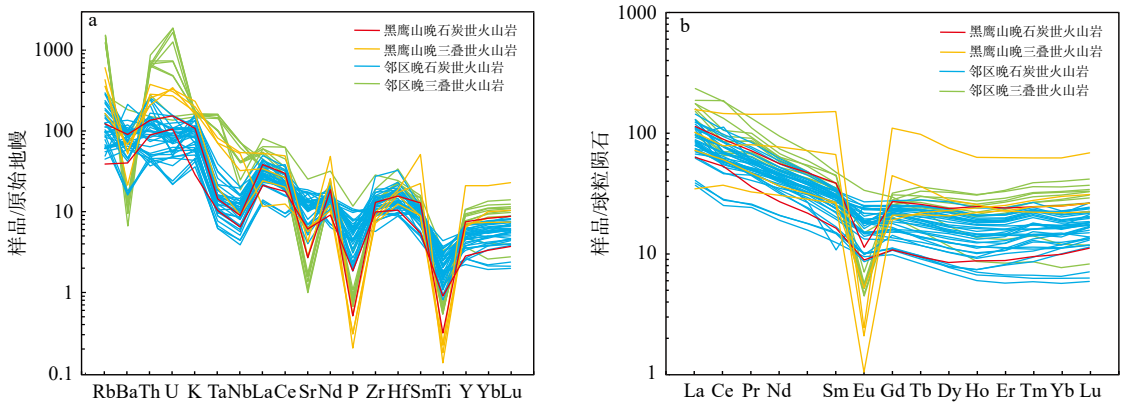
The data of Late Carboniferous volcanic rocks in adjacent areas are cited from Hao et al., 2020; Li et al., 2018; Xu et al., 2018; Zhu et al., 2019; the data of Late Triassic volcanic rocks in adjacent areas are cited from Huang et al., 2011; Li et al., 2020; Yang et al., 2021. In panel (a), numbers correspond to different volcanic rock fields: 1—basalt; 2a—basaltic andesite; 2b—basaltic andesite (low-SiO_2); 3—andesite; 4—dacite; 5—rhyolite; 6—alkaline rhyolite; 7—trachyte; 8—trachyandesite; 9—alkaline trachyandesite; 10—trachydacite; 11—alkaline trachyte; 12—phonolite; 13—tephrite/basanite; 14—phonotephrite; 15—foidite. Ir denotes the Irvine line separating alkaline and subalkaline series. after Bas et al. (1986)

稀土元素总量(ΣREE)介于 74.11×10^{-6}～300.31×10^{-6},LREE/HREE=2.31～4.55,$(La/Yb)_N$=1.16～4.63,δEu 为 0.02～0.22,表现为轻稀土元素的相对富集和强烈的 Eu 负异常。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈“海鸥型”分布,略微右倾(图 5b)。通常岩石的 Eu 极负异常表明岩浆在运移和成岩过程中可能经历了显著的斜长石结晶分异或者暗示了斜长石在源区的残留。

4 讨论

4.1 岩石成因

黑鹰山地区晚石炭世火山岩地球化学特征显



邻区晚石炭世火山岩数据引自文献郝增元等(2020)、李敏等(2018)、徐旭明等(2018)、朱炜等(2019)；邻区晚三叠世火山岩数据黄增保等(2011)、李敏等(2020)、杨镇熙等(2021)

a—原始地幔标准化微量元素蛛网图；b—球粒陨石标准化稀土配分曲线(原始地幔值和球粒陨石据 Sun and McDonough, 1989)

图 5　黑鹰山及邻区火山岩微量元素地球化学特征

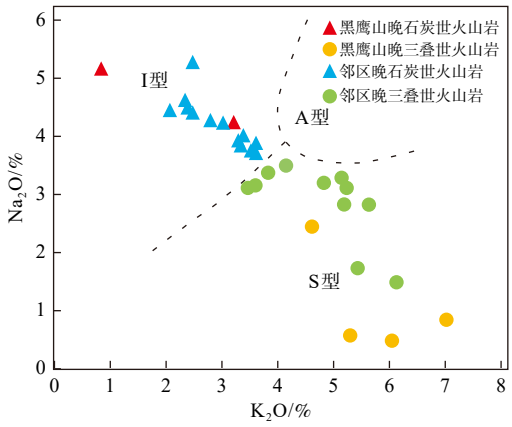
Fig. 5　Trace element geochemical characteristics of volcanic rocks in the Heiyingshan and adjacent areas

(a) Primitive mantle-normalized trace element spider diagram; (b) Chondrite-normalized REE patterns (chondrite and primitive mantle values are from Sun and McDonough, 1989)

The data of Late Carboniferous volcanic rocks in adjacent areas are cited from Hao et al., 2020; Li et al., 2018; Xu et al., 2018; Zhu et al., 2019; the data of Late Triassic volcanic rocks in adjacent areas are cited from Huang et al., 2011; Li et al., 2020; Yang et al., 2021.

示，Al_2O_3 的含量随 MgO 的减少而增加，二者呈负相关性特征，而 CaO、Na_2O 和 Fe_2O_3 含量与 MgO 具有良好的正相关性(表 1)，指示岩石在形成过程中岩浆发生了结晶分异作用。晚石炭世火山岩样品富 Si，相对富 Na($K_2O/Na_2O<1$)，在 Na_2O-K_2O 图解中，样品均落入 I 型花岗岩区域(图 6)。有学者认为，I 型花岗岩类与岛弧、活动大陆边缘有关(王德滋和周金城，1999)。此外，晚石炭世火山岩 Eu 呈现弱负异常的特征，富集强不相容元素 Th、U 和大离子亲石元素 Ba、K、Zr 和 Hf，亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 P，稀土配分曲线呈略微右倾的“海鸥型”，以上地球化学特征也指示了晚石炭世火山岩具有类 I 型花岗岩的特征。以上结论与郝增元等(2020)在北山造山带北部红石山−百合山−蓬勃山与芨芨台子−小黄山 2 条蛇绿混杂岩带之间的风雷山地区发现的 I 型花岗岩特征一致。

晚三叠世火山凝灰岩的主量元素具有高硅、富碱、相对富钾和贫钙、镁、铁的特征。样品 K_2O/Na_2O 高，平均为 8.01，在 Na_2O-K_2O 图解中，晚三叠世样品全部落入了 S 型花岗岩区域(图 6)。岩石的 Zr+Nb+Ce+Y 为 156.2～335，平均为 210.8，低于 A 型花岗岩的下限值 350(Whalen et al., 1987)。此外，晚三叠世火山岩样品铝饱和指数(A/CNK)为 1.32～1.71，大



邻区晚石炭世火山岩数据引自文献郝增元等(2020)、李敏等(2018)、徐旭明等(2018)、朱炜等(2019)；邻区晚三叠世火山岩数据引自黄增保等(2011)、李敏等(2020)、杨镇熙等(2021)

图 6　黑鹰山及邻区火山岩成因类型图解(底图据 Collins et al.，1982)

Fig. 6　Genetic discrimination diagram of volcanic rocks in the Heiyingshan and adjacent areas (base map after Collins et al., 1982)

The data of Late Carboniferous volcanic rocks in adjacent areas are cited from Hao et al., 2020; Li et al., 2018; Xu et al., 2018; Zhu et al., 2019; the data of Late Triassic volcanic rocks in adjacent areas are cited from Huang et al., 2011; Li et al., 2020; Yang et al., 2021.

于 1.1，具有 S 型花岗岩特征。岩相学的证据也表明该类岩石的物质组成为硅铝质(石英和斜长石的比

例含量为 80%～90%)，与 S 型花岗岩的物质组成类似。样品的稀土元素配分模式呈轻微右倾的“海鸥型”分布，具有显著的 Eu 负异常(δEu=0.02～0.22)和轻稀土 LREE 略微富集的特征。这种地球化学特征表明晚三叠世火山岩在岩浆演化过程中可能经历了钾长石和斜长石分离结晶作用，导致残留熔体中 Eu、Na 含量显著降低，SiO_2 含量升高，最终形成高硅岩浆(Collins et al., 1982; Bonin, 2007; Zhang et al., 2008; Zhou et al., 2020)。同时，李敏等(2020)在北山北部红石山周缘的三叠纪花岗斑岩中识别出斜长石残留体，为岩浆分离结晶过程提供了证据。

地幔中 Th 的丰度仅为 0.05 μg/g(Sun, 1980)，而地壳(尤其是花岗岩)中的 Th 含量高达 16～21 μg/g(Pitcher et al., 1985)，黑鹰山地区晚石炭世和晚三叠世岩石样品的 Th 含量为 7.66～32.2 μg/g，平均含量为 19.24 μg/g，远高于地幔丰度均值而更接近于地壳。岩石样品的 Nb/Ta 为 8.01～12.78，平均为 10.36，远低于地幔平均值 60，而更接近地壳平均值 11(Green and Pearson, 1987)。同时，样品具有较高的 Rb/Sr(0.19～4.29)，最大为 4.29，平均为 2.08，远高于原始地幔平均值 0.037(李昌年，1992)。Sm/Nd 为 0.197～0.282，接近地壳平均丰度 0.146(McCulloch and Wasserburg, 1978)。综上所述，研究认为黑鹰山地区晚石炭世和晚三叠世火山岩岩浆源区均来源于地壳。此外，晚石炭世火山岩 Ba/La 为 19.19～24.09，平均为 21.64，略高于陆壳平均水平 15.63，该特征指示其岩浆成分以壳源物质为主，可能混有少量幔源物质(陈德潜和陈刚，1990)。在黑鹰山南侧的砾石滩地区报道了晚石炭世(～310 Ma)花岗岩来自幔源岩浆活动的记录(李敏等，2018)，佐证了该时期岩浆活动幔源物质的混入。朱炜等(2019)在红石山−百合山−蓬勃山蛇绿岩带北部的黑红山地区也发现了晚石炭世(～315 Ma)花岗岩壳幔混染的证据。在紧邻红石山−百合山−蓬勃山蛇绿混杂岩带的圆包山—希热哈达地区，杜庆祥等(2023)报道了主要来源于地壳并有壳幔混染特点的晚石炭世安山岩和花岗斑岩。

4.2 构造意义

关于北山北部地区古亚洲洋的演化，目前普遍认为其在石炭纪—二叠纪处于洋陆演化阶段(何世平等，2005; Xiao et al., 2010; Song et al., 2015; 李敏等，2019; 郑加行等，2019; 计文化等，2020)。然而，对于古亚洲洋的闭合时限众多学者存在争议，一部分学者认为北山地区古亚洲洋消亡于早二叠世(杨镇熙等，2021)，北山造山带的各个岩浆弧、以及各岩浆弧与旱山微陆块在二叠纪拼贴完成(刘明强等，2006; 李敏等，2020)；一部分学者认为其于晚二叠世—早三叠世闭合(Li et al., 2020)。然而，最新的研究指出北山地区增生造山过程最终拼贴时代为中—晚三叠世，并随后进入陆内演化阶段(宋东方等，2024)。

近年来的研究发现，中亚造山带南缘在晚古生代和中生代存在有强烈的岩浆活动(图 7)，并且伴随着显著的成矿作用(辛后田等，2020)。来自岩石学和地球物理的证据表明，沿着北山造山带北缘分布有雀儿山−英安山岛弧，该岛弧向东可延伸至狐狸山、额济纳旗雅干、金都敖包一线，向西可延伸至新疆大南湖地区，而真正代表古亚洲洋南缘东天山−北山陆块的缝合线可能位于该岛弧带以北的蒙古

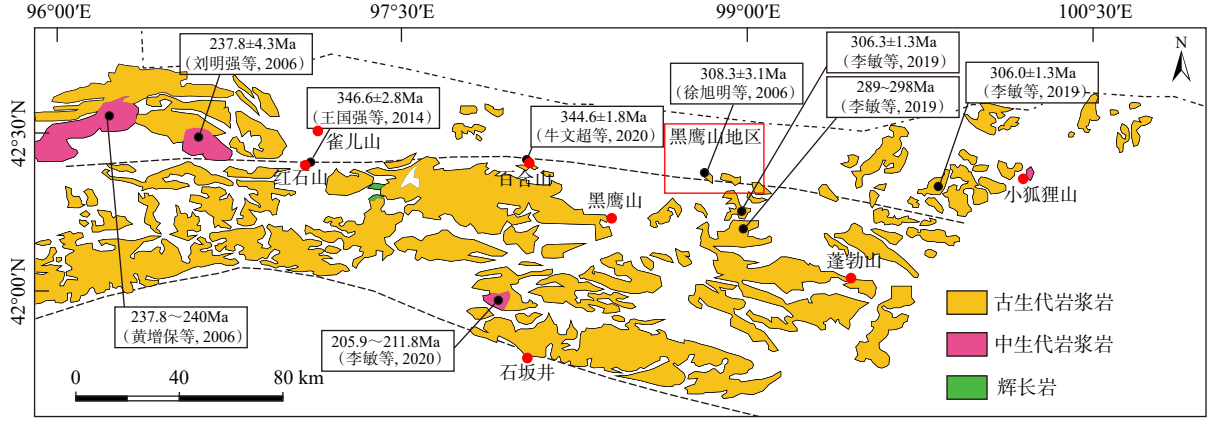


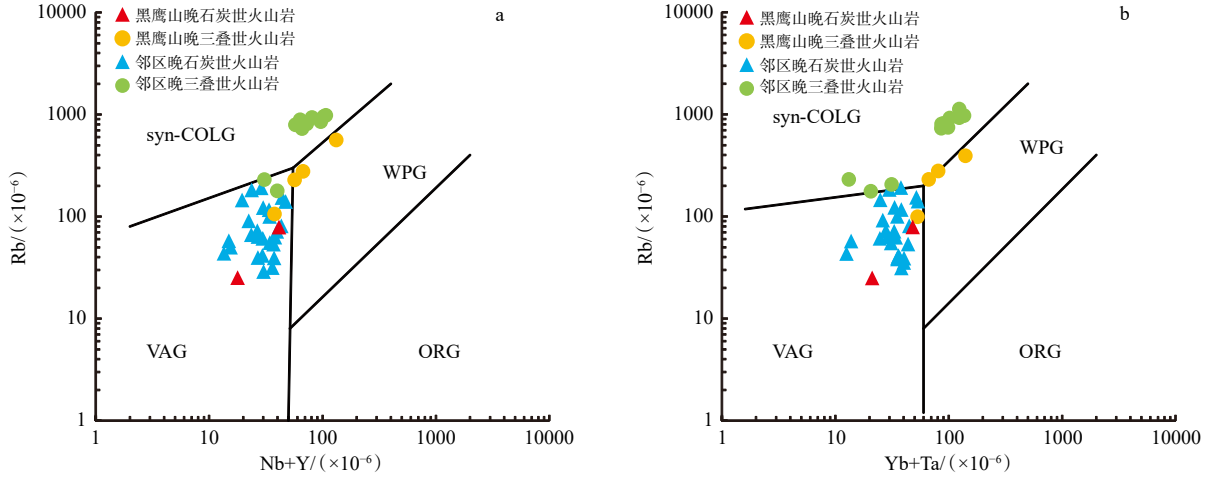
图 7 北山造山带北部岩浆岩分布图(卫彦升等，2020)

Fig. 7 Simplified geological map showing the distribution of magmatic rocks in the northern Beishan Orogenic Belt (modified after Wei et al., 2020)

国境内(可能为 Zoolen 洋)(谢春林等, 2009; 苗来成等, 2014; 李敏等, 2020)。该地区晚古生代岛弧岩浆岩的形成时代为 346～298 Ma, 形成于古亚洲洋向南俯冲的构造环境背景下(李敏等, 2019; 牛文超等, 2020)。中生代岩浆岩形成时代为 237～205 Ma, 形成在古亚洲洋闭合的碰撞背景下(黄增保等, 2011; 李敏等, 2020)。

黑鹰山地区晚石炭世岩石组合为流纹岩、流纹质凝灰岩、花岗闪长岩、玄武岩和安山岩, 显示与洋壳俯冲作用有关的弧火成岩组合特征(肖庆辉等, 2009)。黑鹰山地区晚石炭世样品微量元素配分曲线指示, 样品富集轻稀土元素 LREE、Th、U 和 Ba, 亏损 Nb、Ta、Zr、Hf 和 Ti, 具有典型岛弧火山岩的地球化学特征。在 Nb+Y-Rb 构造判别图中, 样品均落在火山弧花岗岩的范围内(图 8a); 在 Yb+Ta-Rb 图中, 样品均落在了 VAG 区域内(图 8b), 指示黑鹰山地区晚石炭世火山岩形成于大洋俯冲阶段的火山弧环境。在俯冲构造环境中 H_2O 含量较高, 有利于形成 Al—OH 键, 导致熔体呈现过铝质特征, 形成晚石炭世过铝质钙碱性系列火山岩(桑隆康和马昌前, 2012)。综上所述, 研究认为黑鹰山地区晚古生代火山岩形成于俯冲环境的岩浆弧背景下(图 9a)。此外, 李敏等(2018)对邻区砾石滩地区晚古生代花岗岩的研究显示, 岩石属于准铝质—弱过铝质、中钾钙碱性系列, 形成于岩石圈俯冲过程中, 进一步说明北山造山带北缘黑鹰山地区在晚石炭世处于俯冲构造环境下。

中生代期间, 中亚造山带南缘中段(北山地区)发育了一系列岩浆岩, 如甜水井、红石山、小红山、小狐狸山、呼和陶尔盖及亚干地区中、晚三叠世花岗岩(刘明强等, 2006; Xie et al., 2018; 李敏等, 2020; 辛后田等, 2020)。在 Nb+Y-Rb 和 Yb+Ta-Rb 构造环境判别图解中, 晚三叠世火山岩均落入碰撞或板内环境(图 8a、8b)。黑鹰山晚三叠世岩石属高钾钙碱性系列, 高钾钙碱性花岗岩通常形成于碰撞构造背景, 该过程伴随显著的地壳增厚, 加厚下地壳在高压条件下发生部分熔融, 导致富钾矿物(如黑云母、钾长石)分解, 形成高钾岩浆, 同时抑制基性岩浆的底辟作用及直接喷发(钟华明等, 2007)。同时, 对该构造带上小狐狸山、呼和陶尔盖以及亚干一带等地晚三叠世花岗岩的研究也反映了相同的构造环境(Xie et al., 2018; 辛后田等, 2020; Li et al., 2020)。



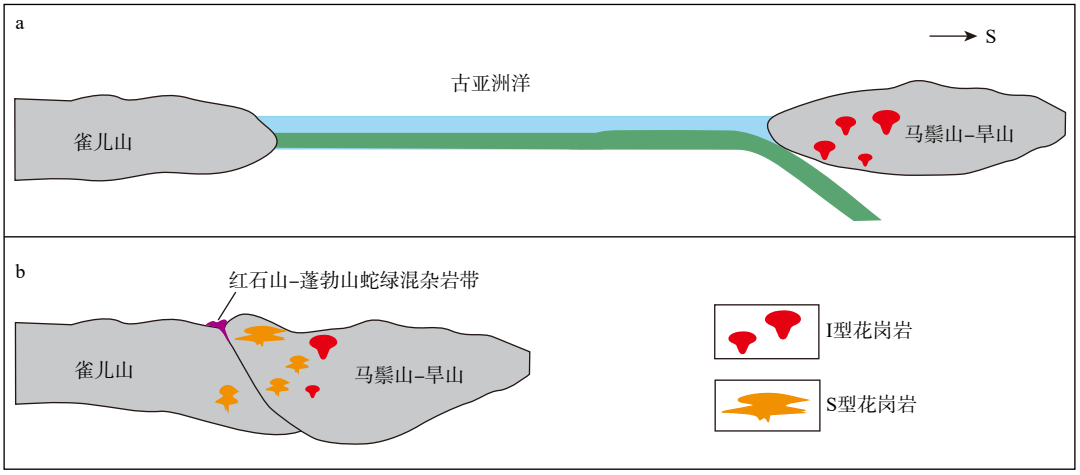
邻区晚石炭世火山岩数据引自文献郝增元等(2020)、李敏等(2018)、徐旭明等(2018)、朱炜等(2019); 邻区晚三叠世火山岩数据引自黄增保等(2011)、李敏等(2020)、杨镇熙等(2021); WPG—板内环境; VAG—火山弧环境; syn-COLG—同碰撞环境; ORG—大洋中脊环境
a—Rb-Nb+Y; b—Rb-Yb+Ta(底图据 Pearce et al., 1984)

图 8 黑鹰山及邻区火山岩构造环境判别图

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams for volcanic rocks in the Heiyingshan and adjacent areas

(a) Rb vs. Nb + Y; (b) Rb vs. Yb + Ta; (base map after Pearce et al., 1984)

The data of Late Carboniferous volcanic rocks in adjacent areas are cited from Hao et al., 2020; Li et al., 2018; Xu et al., 2018; Zhu et al., 2019; the data of Late Triassic volcanic rocks in adjacent areas are cited from Huang et al., 2011; Li et al., 2020; Yang et al., 2021. WPG—within-plate environment; VAG—volcanic arc environment; syn-ORG—syn-collisional environment; ORG—mid-ocean ridge environment



a—晚石炭世古亚洲洋向南俯冲作用；b—晚三叠世碰撞作用

图 9 北山造山带北部构造演化模式图

Fig. 9 Schematic sketch of the tectonic evolution of the northern Beishan Orogenic Belt

(a) Late Carboniferous southward subduction of the Paleo-Asian Ocean; (b) Late Triassic collision

邵兆刚等(2024)对黑鹰山地区构造特征研究揭示，该地区发育由北向南的逆冲推覆构造，年代学数据指示其形成于晚三叠世(晚印支期)，是北山造山带挤压构造作用的产物。Su et al.(2023)和李杰(2023)研究指出中亚造山带南缘晚三叠世发育一期挤压构造，认为其受到古亚洲洋闭合的影响，推测古亚洲洋在中亚造山带中段南缘的闭合时间可能延续至三叠纪。综合区域地质资料与岩石地球化学特征分析，黑鹰山地区晚三叠世火山岩形成于碰撞挤压环境(图 9b)。岩浆主要源于碰撞作用引起的地壳增厚及随之发生的部分熔融，进而导致中亚造山带南缘广泛发育晚三叠世岩浆岩。

与晚石炭世相比，黑鹰山地区晚三叠世发生了构造环境转变。区域地质研究表明，北山造山带内也发现了相似的地质事件：宋东方等(2024)在柳园-后红泉一带识别出相似的构造-岩浆事件；苗来成等(2014)在北山西段发现石炭纪—二叠纪岛弧、弧后盆地建造和三叠纪磨拉石建造，说明该地区石炭纪—二叠纪为大洋俯冲环境且三叠纪为碰撞造山时期。由此证实构造环境的转变并非红石山—黑鹰山地区的局部现象。

5 结论

(1)晚石炭世火山凝灰岩属于过铝质钙碱性系列，具有类 I 型花岗岩的特征。晚三叠世火山凝灰岩高硅、富碱、富铝，贫镁、钙、铁，属于过铝质高钾钙碱性系列，表现类 S 型花岗岩的特征。

(2)黑鹰山地区晚石炭世和晚三叠世火山岩岩浆主要来源于地壳部分熔融，晚石炭世火山岩可能混有少量幔源物质。

(3)黑鹰山地区晚石炭世和晚三叠世火山岩分别形成于北山地区古亚洲洋的俯冲和碰撞背景下，从晚石炭世至晚三叠世，红石山—黑鹰山一带发生了构造环境的转变。

作者贡献声明： 丁奕文、邵兆刚负责论文构思、研究方法设计、数据分析、图件绘制及论文撰写与修改；陈言飞、陈宣华、李冰参与研究方法设计和技术手段的实践应用；余苇、徐大兴、韩乐乐参与数据分析、研究方法讨论和论文的修改完善。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: DING Yiwen and SHAO Zhaogang were responsible for the conceptualization of the study, methodology design, data analysis, figure preparation, and manuscript writing and revision; CHEN Yanfei, CHEN Xuanhua, and LI Bing participated in the design of the research methods and the practical application of technical approaches; YU Wei, XU Daxing, and HAN Lele contributed to data analysis, discussion of research methods, and revision of the manuscript. All authors have read and agreed to the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明： 本文所有作者声明本研究无任何

利益冲突。

Conflict of Interests：All authors declare no conflict of interests.

References

AO S J, XIAO W J, HAN C M, et al., 2010. Geochronology and geochemistry of Early Permian mafic–ultramafic complexes in the Beishan area, Xinjiang, NW China: implications for late Paleozoic tectonic evolution of the southern Altaids[J]. Gondwana Research, 18(2-3): 466-478.

BAS M J L, MAITRE R W L, STRECKEISEN A, et al., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total Alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 27(3): 745-750.

BONIN B, 2007. A-type Granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects[J]. Lithos, 97(1-2): 1-29.

CHEN D Q, CHEN G, 1990. Shiyong xitu yuansu diqiuhua xue [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. (in Chinese)

COLLINS W J, BEAMS S D, WHITE A J R, et al., 1982. Nature and origin of a-type granites with particular reference to southeastern Australia[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 80(2): 189-200.

DU Q X, WU S N, ZHANG Y, et al., 2023. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rocks from the baishan formation in the Yuanbaoshan-Xirehada area in Beishan orogenic collage, Inner Mongolia, NW China, and implications for the subduction history of the Paleo-Asian ocean[J]. Geological Bulletin of China, 42(11): 1875-1893. (in Chinese with English abstract)

GREEN T H, PEARSON N J, 1987. An experimental study of Nb and Ta partitioning between Ti-rich minerals and silicate liquids at high pressure and temperature[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51(1): 55-62.

HAO Z Y, GAO J, WANG C, et al., 2020. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating and tectonic setting of the monzogranites in the Fengleishan area of Beishan orogenic belt, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 47(4): 1204-1219. (in Chinese with English abstract)

HE S P, ZHOU H W, REN B C, et al., 2005. Crustal evolution of palaeozoic in Beishan Area, Gansu and Inner Mongolia, China[J]. Northwestern Geology, 38(3): 6-15. (in Chinese with English abstract)

HUANG Z B, JIN X, LI B H, et al., 2011. Petrological and geochemical characteristics of indosinian granites in Hongshishan Area, Gansu province and discussion on its genesis[J]. Northwestern Geology, 44(1): 10-19. (in Chinese with English abstract)

JAHN B M, 2004. The central Asian orogenic belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. Geological Society, London, Special Publications, 226(1): 73-100.

JI W H, LI R S, CHEN F N, et al., 2020. Tectonic reconstruction of northwest China in the Nanhua-Paleozoic and discussions on key issues[J]. Journal of Geomechanics, 26(5): 634-655. (in Chinese with English abstract)

LI C N, 1992. Huochengyan weiliang yuansu yanshixue [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)

LI J, 2023. Tectonic history of the Beishan orogen: constraints from high-pressure metamorphic rocks and magmatic evolution[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)

LI M, REN B F, TENG X J, et al., 2018. Geochemical characteristics, zircon U-Pb age and Hf isotope and geological significance of granitoid in Beishan orogenic belt[J]. Earth Science, 43(12): 4586-4605. (in Chinese with English abstract)

LI M, XIN H T, REN B F, et al., 2019. Petrogenesis and tectonic significance of the late Palaeozoic granitoids in Hazhu Area, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 44(1): 328-343. (in Chinese with English abstract)

LI M, REN B F, DUAN X L, et al., 2020. Petrogenesis of Triassic granites in Xiaohongshan Area, Beishan orogenic belt: constraints from the Zircon U-Pb ages and Hf isotopes[J]. Geological Bulletin of China, 39(9): 1422-1435. (in Chinese with English abstract)

LI R W, ZHANG X, SHI Q, et al., 2020. Early Permian to late Triassic tectonics of the southern central Asian orogenic belt: geochronological and geochemical constraints from gabbros and granites in the northern Alxa area, NW China[J]. Geological Magazine, 157(12): 2089-2105.

LI S, WANG T, WILDE S A, et al. , 2012. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of Triassic granitoids from Beishan, NW China[J]. Lithos, 134-135: 123-145.

LI S, 2013. Triassic granitoids in Beishan-Inner Mongolia, China and its tectonic implications[D]. Beijing: Chineses Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

LIU M Q, WANG J J, DAI W J, 2006. The U-Pb age of Single-grained zircon from Maanshanbei granite in Hongshishan area of the Beishan orogenic belt, Gansu province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(6): 473-479. (in Chinese with English abstract)

MANIAR P D, PICCOLI P M, 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bulletin, 101(5): 635-643.

MAO Q G, XIAO W J, WINDLEY B F, et al., 2012. The Liuyuan complex in the Beishan, NW China: a carboniferous–permian ophiolitic fore-arc sliver in the southern Altaids[J]. Geological Magazine, 149(3): 483-506.

MAO Q G, XIAO W J, WANG H, et al., 2022. Prolonged late Mesoproterozoic to late Triassic tectonic evolution of the major Paleo-Asian Ocean in the Beishan orogen (NW China) in the southern Altaids[J]. Frontiers in Earth Science, 9: 825852.

MAO Q G, XIAO W J, AO S J, et al., 2023. Final amalgamation processes of the southern altaids: insights from the triassic houhongquan ophiolitic mélange in the beishan orogen (NW China)[J]. Lithosphere, 2023(1): 1988410.

MCCULLOCH M T, WASSERBURG G J, 1978. Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation[J]. science, 200(4345): 1003-1011.

MIAO L C, ZHU M S, ZHANG F Q, 2014. Tectonic setting of Mesozoic magmatism and associated metallogenesis in Beishan area[J]. Geology in

China, 41(4): 1190-1204. (in Chinese with English abstract)

NIU W C, XIN H T, DUAN L F, et al., 2020. Geochemical characteristics, zircon U-Pb age of SSZ ophiolite in the Baiheshan area of the Beishan orogenic belt, Inner Mongolia, and its indication for the evolution of the Paleo-Asian ocean[J]. Geological Bulletin of China, 39(9): 1317-1329. (in Chinese with English abstract)

NIU Y Z, LU J C, WEI J S, et al., 2014. Chronology of the Lütiaoshan formation in the Beishan area and its tectonic significances[J]. Geological Review, 60(3): 567-576. (in Chinese 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.

PECCERILLO A, TAYLOR S R, 1976. Geochemistry of eocene Calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 58(1): 63-81.

PITCHER W S, ATHERTON M P, COBBING E J, 1985. Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes[M]. Glasgow: Blackie, 19-25.

SANG L K, MA C Q, WANG G Q, et al. , 2012. Petrology[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)

SHAO Z G, CHEN X H, WANG Z Z, et al., 2024. Characteristics of Heiyingshan late Triassic thrust nappe structure in the Beishan orogenic belt and its constraint on the evolution of the orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 43(11): 1893-1906. (in Chinese with English abstract)

SOLDNER J, YUAN C, SCHULMANN K, et al., 2020. Grenvillean evolution of the Beishan orogen, NW China: implications for development of an active Rodinian margin[J]. GSA Bulletin, 132(7-8): 1657-1680.

SONG D F, XIAO W J, WINDLEY B F, et al. , 2015. A Paleozoic Japan-type Subduction-accretion system in the Beishan orogenic collage, southern central Asian orogenic belt[J]. Lithos, 224-225: 195-213.

SONG D F, XIAO W J, AO S J, et al., 2024. Contemporaneous closure of the Paleo-Asian Ocean in the Middle-Late Triassic: A synthesis of new evidence and tectonic implications for the final assembly of Pangea[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 253: 104771.

SONG D F, XIAO W J, ZENG H, et al., 2024. Accretionary orogenic processes of the Beishan orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 43(12): 2131-2150. (in Chinese with English abstract)

SU H, CHEN X H, YU X Q, et al., 2023. Triassic nappe in the central part of the southern Central Asian Orogenic Belt (Ejinaq, NW China): evidence from structural analysis and geothermochronology[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 97(1): 13-34.

SUN S S, 1980. Lead Isotopic Study of young volcanic rocks from mid-ocean ridges, ocean islands and island Arcs[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 297(1431): 409-445.

SUN S S, MCDONOUGH W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313-345.

TAYLOR S R, MCLENNAN S M, 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications.

WANG D Z, ZHOU J C, 1999. Look back and look forward to granite research[J]. Acta Petrologica Sinica, 15(2): 161-169. (in Chinese with English abstract)

WANG G Q, LI X M, XU X Y, et al., 2014. Zircon U-Pb chronological study of the Hongshishan ophiolite in the Beishan area and their tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(6): 1685-1694. (in Chinese with English abstract)

WANG K, XIAO W J, WINDLEY B F, et al., 2022. The Dashui subduction complex in the eastern Tianshan-Beishan orogen (NW China): long-lasting subduction-accretion terminated by unique mid-triassic strike-slip juxtaposition of arcs in the southern altaids[J]. Tectonics, 41(6): e2021TC007190.

WANG X Y, YUAN C, ZHANG Y Y, et al., 2018. S-type granite from the gongpoquan arc in the Beishan orogenic collage, southern Altaids: implications for the tectonic transition[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 153: 206-222.

WEI Y S, YAN T, YANG W B, et al., 2020. The establishment of late Paleozoic stratigraphic framework in the northern belt of Beishan orogenic belt of inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 39(9): 1367-1388. (in Chinese with English abstract)

WEI Z J, HUANG Z B, JIN X, et al., 2004. Geological characteristics of ophiolite migmatitic complex of Hongshishan region, Gansu[J]. Northwestern Geology, 37(2): 13-18. (in Chinese with English abstract)

WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W, 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407-419.

WRIGHT J B, 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. Geological Magazine, 106(4): 370-384.

XIAO Q H, DENG J F, QIU R Z, et al., 2009. A preliminary study of the relationship between granitoids and the growth of continental crust: a case study of the formation of key orogen granitoids in China[J]. Geology in China, 36(3): 594-622. (in Chinese with English abstract)

XIAO W J, MAO Q G, WINDLEY B F, et al., 2010. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage[J]. American Journal of Science, 310: 1553-1594.

XIE C L, YANG J G, WANG L S, et al., 2009. Disscussion on the location of paleozoic island arc zone on the south margin of Paleo-Asian ocean in the Beishan area of Gansu province[J]. Acta Geologica Sinica, 83(11): 1584-1600. (in Chinese with English abstract)

XIE F Q, WU Q H, WANG L D, et al., 2018. Petrogenesis and tectonic setting of a granitic pluton in the northern Ya-Gan fault zone, north Alxa, China: constraints from whole-rock geochemistry, zircon U-Pb ages, and Sr-Nd-Hf isotope compositions[EB/OL]. Preprints, doi: 10.20944/preprints201806.0344.v1.

XIN H T, NIU W C, TIAN J, et al., 2020. Spatio-temporal structure of Beishan orogenic belt and evolution of Paleo-Asian ocean, inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 39(9): 1297-1366. (in Chinese with English abstract)

XU W, SUN Z M, SHI G R, et al., 2019. First report of coupled early Permian paleomagnetic and geochronologic data from the Dunhuang block (NW China), and implications for the tectonic evolution of the Paleo-Asian ocean[J]. Gondwana Research, 67: 46-64.

XU X M, LU Y, XIN H T, et al., 2018. The constraint of closing time of Paleo-Asian ocean in the north edge of Beishan, inner Mongolia: evidence from the late Carboniferous quartz dioritein Heihongshan[J]. Mineralogy and Petrology, 38(4): 66-75. (in Chinese with English abstract)

YANG Z X, ZHAO J C, JING D L, et al., 2021. Chronological and geochemical characteristics of the porphyritic granodiorite in the Qianhongquan area, Beishan region, Gansu province, China and their tectonic significances[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 40(1): 228-241. (in Chinese with English abstract)

ZHANG G Z, XIN H T, DUAN L F, et al., 2022. Geochemical characteristics and tectonic implications of the end early permian high magnesium gabbro from northern beishan orogenic belt, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 47(9): 3258-3269. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J, ZHANG H F, YING J F, et al., 2008. Contribution of subducted pacific slab to late Cretaceous mafic magmatism in Qingdao region, China: a petrological record[J]. Island Arc, 17(2): 231-241.

ZHANG J, CUNNINGHAM D, 2012. Kilometer-scale refolded folds caused by strike-slip reversal and intraplate shortening in the Beishan region, China[J]. Tectonics, 31(3): TC3009.

ZHANG W, PEASE V, WU T R, et al. , 2012a. Discovery of an adakite-like pluton near Dongqiyishan (Beishan, NW China)-its age and tectonic significance[J]. Lithos, 142-143: 148-160.

ZHANG W, WU T R, ZHENG R G, et al., 2012b. Post-collisional southeastern Beishan granites: geochemistry, geochronology, Sr-Nd-Hf isotopes and their implications for tectonic evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 58: 51-63.

ZHANG W, PEASE V, MENG Q P, et al., 2015. Timing, petrogenesis, and setting of granites from the southern Beishan late Palaeozoic granitic belt, northwest China and implications for their tectonic evolution[J]. International Geology Review, 57(16): 1975-1991.

ZHENG J X, ZHAO T Y, HAN Q, et al., 2019. Tectonic deformation characteristics and ore-control significance of the Sanjiashan ductile shear zone in Beishan orogenic belt, Xinjiang[J]. Journal of Geomechanics, 25(S1): 32-38. (in Chinese with English abstract)

ZHENG R G, LI J Y, ZHANG J, et al. , 2020. Permian oceanic slab subduction in the southmost of Central Asian Orogenic Belt: evidence from adakite and high-Mg diorite in the southern Beishan[J]. Lithos, 358-359: 105406.

ZHONG H M, TONG J S, LU R K, et al., 2007. Geochemical features and tectonic setting of Yanshaniann high-K calc-alka-line granite in the Songxi-Shenglishan area, northern Rutog, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 26(6): 730-738. (in Chinese with English abstract)

ZHOU J S, YANG Z S, WANG Q, et al., 2020. Extraction of high-silica granites from an upper crustal magma reservoir: insights from the Narusongduo magmatic system, Gangdese arc[J]. American Mineralogist, 105(10): 1572-1584.

ZHU W, ZHANG Z P, SUN Y S, et al., 2019. Time constraint on the closing of the Paleo-Asian ocean in northern Beishan of inner Mongolia: evidence from Heihongshan admellite[J]. Geological Bulletin of China, 38(11): 1846-1857. (in Chinese with English abstract)

ZUO G C, ZHANG S L, WANG X, et al., 1987. Characteristics of the turbidite and volcanic-sedimentary assemblages of cambrian-middle ordovician in the Xichang-Jing area of Beishan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 5(2): 63-71. (in Chinese with English abstract)

ZUO G C, ZHANG S L, HE G Q, et al., 1991. Plate tectonic characteristics during the early Paleozoic in Beishan near the Sino-Mongolian border region, China[J]. Tectonophysics, 188(3-4): 385-392.

附中文参考文献

陈德潜，陈刚，1990. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京：冶金工业出版社.

杜庆祥，伍赛男，张永，等，2023. 内蒙古北山造山带圆包山—希热哈达地区白山组火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及对古亚洲洋俯冲作用的启示[J]. 地质通报，42(11)：1875-1893.

郝增元，高鉴，王晨，等，2020. 北山造山带风雷山地区二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造背景[J]. 中国地质，47(4)：1204-1219.

何世平，周会武，任秉琛，等，2005. 甘肃内蒙古北山地区古生代地壳演化[J]. 西北地质，38(3)：6-15.

黄增保，金霞，李葆华，等，2011. 甘肃红石山地区印支期花岗岩地球化学特征及成因讨论[J]. 西北地质，44(1)：10-19.

计文化，李荣社，陈奋宁，等，2020. 中国西北地区南华纪—古生代构造重建及关键问题讨论[J]. 地质力学学报，26(5)：634-655.

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.

李杰，2023. 北山造山带构造历史：来自高压变质岩和岩浆演化的证据[D]. 北京：中国地质大学(北京).

李敏，任邦方，滕学健，等，2018. 内蒙古北山造山带花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及地质意义[J]. 地球科学，43(12)：4586-4605.

李敏，辛后田，任邦方，等，2019. 内蒙古哈珠地区晚古生代花岗岩类成因及其构造意义[J]. 地球科学，44(1)：328-343.

李敏，任邦方，段宵龙，等，2020. 内蒙古北山造山带小红山地区三叠纪花岗岩成因：来自锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的约束[J]. 地质通报，39(9)：1422-1435.

李舢，2013. 北山—内蒙古地区三叠纪花岗岩及其构造意义[D]. 北京：中国地质科学院.

刘明强，王建军，代文军，2006. 甘肃北山红石山地区马鞍山北花岗岩体的单颗粒锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志，25(6)：473-479.

苗来成, 朱明帅, 张福勤, 2014. 北山地区中生代岩浆活动与成矿构造背景分析[J]. 中国地质, 41(4): 1190-1204.

牛文超, 辛后田, 段连峰, 等, 2020. 内蒙古北山造山带百合山SSZ型蛇绿岩地球化学特征、锆石U-Pb年龄及其对古亚洲洋演化的指示[J]. 地质通报, 39(9): 1317-1329.

牛亚卓, 卢进才, 魏建设, 等, 2014. 甘蒙北山地区下石炭统绿条山组时代修正及其构造意义[J]. 地质论评, 60(3): 567-576.

桑隆康, 马昌前, 2012. 岩石学(2版)[M]. 北京: 地质出版社.

邵兆刚, 陈宣华, 王增振, 等, 2024. 北山造山带黑鹰山晚三叠世逆冲推覆构造特征及其对造山带演化的制约[J]. 地质通报, 43(11): 1893-1906.

宋东方, 肖文交, 曾浩, 等, 2024. 北山造山带增生造山过程[J]. 地质通报, 43(12): 2131-2150.

王德滋, 周金城, 1999. 我国花岗岩研究的回顾与展望[J]. 岩石学报, 15(2): 161-169.

王国强, 李向民, 徐学义, 等, 2014. 甘肃北山红石山蛇绿岩锆石U-Pb年代学研究及构造意义[J]. 岩石学报, 30(6): 1685-1694.

卫彦升, 闫涛, 杨五宝, 等, 2020. 内蒙古北山造山带北带晚古生代地层时空格架的建立[J]. 地质通报, 39(9): 1367-1388.

魏志军, 黄增保, 金霞, 等, 2004. 甘肃红石山地区蛇绿混杂岩地质特征[J]. 西北地质, 37(2): 13-18.

肖庆辉, 邓晋福, 邱瑞照, 等, 2009. 花岗岩类与大陆地壳生长初探: 以中国典型造山带花岗岩类岩石的形成为例[J]. 中国地质, 36(3): 594-622.

谢春林, 杨建国, 王立社, 等, 2009. 甘肃北山地区古亚洲南缘古生代岛弧带位置的讨论[J]. 地质学报, 83(11): 1584-1600.

辛后田, 牛文超, 田健, 等, 2020. 内蒙古北山造山带时空结构与古亚洲洋演化[J]. 地质通报, 39(9): 1297-1366.

徐旭明, 鲁扬, 辛后田, 等, 2018. 内蒙古北山北缘古亚洲洋闭合时间制约: 来自黑红山晚石炭世石英闪长岩的证据[J]. 矿物岩石, 38(4): 66-75.

杨镇熙, 赵吉昌, 荆德龙, 等, 2021. 甘肃北山前红泉地区斑状花岗闪长岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 40(1): 228-241.

张国震, 辛后田, 段连峰, 等, 2022. 内蒙古北山造山带北部早二叠世末期高镁辉长岩地球化学特征及构造意义[J]. 地球科学, 47(9): 3258-3269.

郑加行, 赵同阳, 韩琼, 等, 2019. 新疆北山地区三架山韧性剪切带构造变形特征及控矿意义[J]. 地质力学学报, 25(S1): 32-38.

钟华明, 童劲松, 鲁如魁, 等, 2007. 西藏日土北部松西—胜利山—带燕山期高钾钙碱性花岗岩的地球化学特征及构造环境[J]. 地质通报, 26(6): 730-738.

朱炜, 张正平, 孙璎姝, 等, 2019. 内蒙古北山北缘蓬勃山一带古亚洲洋闭合时间制约: 来自黑红山二长花岗岩的证据[J]. 地质通报, 38(11): 1846-1857.

左国朝, 张淑玲, 王谐, 等, 1987. 北山洗肠井地区寒武系—中奥陶统浊积岩及其火山—沉积组合特征[J]. 沉积学报, 5(2): 63-71.