doi: 10.12029/gc20210401001

张超, 李志丹, 张锋, 段明, 俞礽安, 陈军强, 谢瑜. 2024. 内蒙古阿拉善左旗亚干铜镍钴矿辉长岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年、Hf 同位素特征及其地壳伸展作用[J]. 中国地质, 51(4): 1368−1386.

Zhang Chao, Li Zhidan, Zhang Feng, Duan Ming, Yu Reng'an, Chen Junqiang, Xie Yu. 2024. Zircon U–Pb age, Hf isotopic characteristics and crustal extension of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit, Alxa Left Banner, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 51(4): 1368−1386(in Chinese with English abstract).

内蒙古阿拉善左旗亚干铜镍钴矿辉长岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年、Hf 同位素特征及其地壳伸展作用

张超[1,2]，李志丹[1,2,3]，张锋[1,2]，段明[1,2]，俞礽安[1,2]，陈军强[1,2]，谢瑜[1,2]

（1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170; 3. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院, 北京 100083）

提要:【**研究目的**】阿拉善左旗亚干铜镍钴矿床是内蒙古西部典型硫化物矿床, 发育于超基性—中基性岩浆岩带, 辉长岩为成矿母岩, 正确认识该岩体的岩浆活动与成矿规律及构造背景成为亟待解决的地质问题。【**研究方法**】本文采集相关样品, 对亚干地区出露的辉长岩开展了岩相学、岩石地球化学及锆石 U–Pb 年代学和 Hf 同位素分析研究。【**研究结果**】亚干辉长岩具有高 Al_2O_3（15.99%~17.47%）、亚碱性（K_2O+Na_2O=4.94%~5.86%）、低 TiO_2（0.81%~1.12%）、低 P_2O_5（0.14%~0.21%）、富 MgO（3.18%~5.64%）、低 K_2O（1.14%~2.05%）特征, 属钙碱性系列。稀土总量(ΣREE)为 71.43×10^{-6}~94.22×10^{-6}, 呈轻稀土相对富集、重稀土亏损的右倾配分模式, 明显亏损高场强元素 Nb、P、Ta, 富集不相容元素 U、Sr, 表明亚干辉长岩来源于岩石圈地幔, 岩浆后期经历了结晶分异作用。亚干辉长岩锆石 U–Pb 加权平均年龄为(268.8±3.1)Ma, 限定其成岩时代属中二叠世。锆石 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值介于−7.1~2.9, 二阶段模式年龄介于 1272~2177 Ma。【**结论**】区域地质资料及地球化学特征表明, 亚干辉长岩原始岩浆在运移过程中可能受到部分地壳物质的交代混染作用, 形成构造背景可能为晚古生代后碰撞伸展环境。亚干地区位于珠斯楞—杭乌拉构造带, 自石炭纪开始向南俯冲, 从被动大陆边缘转为主动大陆边缘。此外, 亚干辉长岩的侵位时代限定了该区域碰撞闭合时间, 为该区铜镍钴矿研究提供了新的制约。

关　键　词: 铜镍钴矿; 锆石 U–Pb 年龄; 岩石地球化学; 矿产勘查工程; 亚干; 阿拉善左旗; 内蒙古

创　新　点:（1）首次厘定了亚干辉长岩侵位时代为 268.8 Ma, 限定其成岩时代属中二叠世, 为下一步分析成矿规律及构造背景奠定了基础;（2）亚干辉长岩来源于岩石圈富集地幔部分熔融的基性—超基性岩浆, 并在岩浆房内或上升过程中发生结晶分异作用, 后期与少量地壳物质混染, 形成于后碰撞伸展构造环境。

中图分类号: P581; P597　**文献标志码:** A　**文章编号:** 1000−3657(2024)04−1368−19

Zircon U–Pb age, Hf isotopic characteristics and crustal extension of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit, Alxa Left Banner, Inner Mongolia

ZHANG Chao[1,2], LI Zhidan[1,2,3], ZHANG Feng[1,2], DUAN Ming[1,2], YU Reng'an[1,2], CHEN Junqiang[1,2],

收稿日期: 2021−04−01; **改回日期:** 2023−10−23

基金项目: 国家重点研发计划项目（2018YFC0604200）和中国地质调查局项目（DD20190119、DD20211191、DD20221871、DD20221686）联合资助。

作者简介: 张超, 男, 1987 年生, 硕士, 高级工程师, 从事矿床学研究及矿产地质调查工作; E–mail: 402709002@qq.com。

通讯作者: 李志丹, 男, 1986 年生, 博士生, 高级工程师, 从事矿床学研究及矿产地质调查工作; E–mail: cugcug@qq.com。

XIE Yu[1,2]

(1. *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin* 300170*, China*; 2. *North China Geological Science and Technology Innovation Center, Tianjin* 300170*, China*; 3. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083*, China*)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The copper–nickel–cobalt deposit in the Alxa Left Banner is a typical sulfide deposit in western Inner Mongolia, developed in the ultrabasic−medium basic magmatic rock zone. The gabbro is an ore–forming rock, and recognizing the magmatic activity, metallogenic regularity and tectonic background have become an urgent geological problem. **[Methods]** Related samples were collected to study petrography, petrogeochemistry, zircon U–Pb chronology and Hf isotope. **[Results]** Geochemical characteristics shows that the Yagan gabbro has the characteristics of high Al_2O_3 (15.99%–17.47%), sub−alkaline (K_2O+Na_2O=4.94%–5.86%), low TiO_2 (0.81%–1.12%), low P_2O_5 (0.14%–0.21%), high MgO (3.18%–5.64%), low K_2O (1.14%–2.05%), indicating of the calcium alkaline series. The total amount of rare earth (ΣREE) is 71.43×10^{-6}–94.22×10^{-6}, presents right–inclined distribution model, the light rare earth is relatively enriched and the heavy rare earth is depleted. The high field strength elements (Nb, P, Ta) are obviously depleted, incompatible elements (U, Sr) are enriched, suggested that the Yagan gabbro originated from the lithospheric mantle and experienced crystallization differentiation in the late magmatic stage. The zircon U–Pb weighted average age of the Yagan gabbro is (268.8±3.1) Ma, indicating the age of diagenesis belongs to Middle Permian. The $\varepsilon_{Hf}(t)$ values is −7.1–2.9 and two staged Hf model age is 1272–2177 Ma. **[Conclusions]** Regional geological data and geochemical characteristics indicate that the Yagan gabbro original magma may be confused by some crustal materials during the migration process. The formation tectonic background may be the post–collision and extension environment in the Late Paleozoic. In addition, the emplacement age of Yagan gabbro limited the collision closing time, which provides new constraints for the study of Cu–Ni–Co deposits in this region.

Key words: Cu–Ni–Co deposit; zircon U–Pb age; petrogeochemistry; mineral exploration engineering; Yagan; Alxa Left Banner; Inner Mongolia

Highlights: (1) The emplacement age of the Yagan gabbro was first determined at 268.8 Ma, which defined the age of diagenesis belongs to Middle Permian and established the foundation for further analysis of the metallogenic regularity and tectonic background; (2) It shows that the Yagan gabbro was derived from the mafic–ultrabasic magma of partial melting enriched mantle in lithosphere, crystallization differentiation occurred in the magma chamber or during the rising process, and later contamination with a small amount of crustal material, forming in the post–collision extensional tectonic environment through the analysis of rock geochemistry and isotope geochemistry.

About the first author: ZHANG Chao, male, born in 1987, master, senior engineer, engaged in mineralogical research and mineral geological survey; E–mail: 402709002@qq.com.

About the corresponding author: LI Zhidan, male, born in 1986, doctoral candidate, senior engineer, engaged in mineralogical research and mineral geological survey; E–mail: cugcug@qq.com.

Fund support: Supported by National Key Research and Development Program (No.2018YFC0604200) and the projects of China Geological Survey (No.DD20190119, No.DD20211191, No.DD20221871, No.DD20221686).

1　引　言

内蒙古中西部地区与铜镍钴岩浆型矿床的形成具有密切成因联系的超基性—中基性岩浆岩带分布广泛，构造位置属于兴蒙造山带南侧，华北板块北缘。前人通过对该区镁铁质—超镁铁质岩石学、岩相学及地球化学特征研究（江思宏等, 2003; 赵磊等, 2011; Feng et al., 2013; 程银行等, 2016; 段明等, 2016; 马士委等, 2016; Liu et al., 2017; Shi et al., 2018; Zhang et al., 2019; Zuo et al., 2019; 牛文超等, 2020; 田健等, 2020; 李志丹等, 2020; Duan et al., 2020; Wang et al., 2020; He et al., 2021; 赵利刚等,

2024),探讨了壳幔相互作用、构造环境演化、古亚洲洋闭合的方式及时间,对区内小南山铜镍矿、亚干铜镍钴矿、达布逊镍钴矿、克布镍钴矿、铁板井镍钴矿等一系列铜镍钴岩浆矿床进行了初步的研究,但与这些重要矿床有密切成因联系的岩体成岩时代、性质、形成环境等方面研究相对薄弱,严重制约了对区域成岩成矿规律及构造背景的认识。

阿拉善地块位于中亚造山带(古亚洲洋构造域)南缘的中部,是研究古亚洲洋闭合地质过程的重要区域。古亚洲洋由大量洋盆及分布于洋盆之间的大小不同的地块和岛弧组成,位于西伯利亚板块、塔里木板块、华北板块和东欧板块之间。前人研究表明,内蒙古中西部地区古亚洲洋闭合时间早于中晚二叠世,随后进入碰撞后伸展构造环境(赵磊等, 2008, 2011; 章永梅等, 2008; 张拴宏等, 2010; 王倩, 2010; 张善明等, 2019; 肖文交等, 2019; 程先钰等, 2021)。

古亚洲洋构造域是全球重要成矿域,研究其演化特征对厘定区域成矿背景意义重大。亚干铜镍钴矿位于内蒙古阿拉善地块北部地区,属于超基性—基性岩有关的岩浆铜镍钴矿床的典型代表之一,铜镍钴矿产资源总量约为 17.5 万 t,其中铜金属量约 12.8 万 t,3 种元素含量分别为:Cu(0.196%~0.285%) 、 Ni(0.167%~0.304%) 、 Co(0.019%~0.0374%)。前人在亚干地区开展过大量研究工作,郑亚东和张青(1993)通过对亚干变质核杂岩构造特征及形成时代研究,识别出亚干地区在印支造山带内经历一次伸展构造运动;王涛等(2002)通过对亚干变质核杂岩中糜棱状 A 型花岗岩特征研究,指出亚干地区在早中生代(228 Ma)区域构造由挤压运动转化为韧性伸展剪切运动;杨立东(2012)通过对亚干多金属矿区及矿体地质特征的分类研究,说明该区铜镍钴等成矿地质条件非常好;郑荣国等(2013)运用离子探针测得亚干二长花岗岩锆石 U–Pb 年龄为(283.2±2.2)Ma,根据相关沉积建造、Rb–Sr、Sm–Nd 同位素特征等推断岩体形成于后碰撞环境,推断古亚洲洋在亚干地区闭合于早二叠世之前;陈长虹(2015)通过钻探工作及对比同类型多金属矿床,推断亚干矿床为岩浆分异矿床。可见前人在亚干地区已做过较多研究工作,但由于研究方法及侧重不同,对矿区内辉长岩及其反映的区域构造意义的相关研究相对较少,本文通过岩石地球化学、锆石 U–Pb 定年等方法对亚干铜镍钴矿辉长岩体的形成时代、构造背景进行研究,为揭示岩浆活动与成矿作用的关系提供依据。

2 地质概况

亚干铜镍钴矿位于阿拉善地块北缘,华北板块、塔里木板块与哈萨克斯坦板块的结合部位,中亚增生型造山带南缘的中部区域,构造背景为额济纳北山弧盆系红石山裂谷。矿区夹于恩格尔乌苏混杂岩带与石板井—小黄山蛇绿岩带之间的珠斯楞—杭乌拉构造带内(图 1a)。

矿区出露地层主要为古元古代北山群(Pt_1B),倾向近北西;根据其岩性可分为上、下两个岩组,两者连续沉积,厚度约 4200 m(杨立东, 2012)。下岩组(Pt_1B^1)主要由厚层白色—灰白色条带状白云石大理岩、片麻岩及变粒岩等区域变质岩组成,白云石大理岩与变粒岩互层;该岩组以白云石大理岩为主要组成特征,向东西两侧厚度变薄。白云石大理岩形成后期受到热液交代作用成为蛇纹石化大理岩,变晶结构及条带状构造,大理岩在局部区域粒度变细,内接触带形成透辉石矽卡岩、黝帘透辉石矽卡岩等。地层内多有辉长岩、花岗岩及花岗伟晶岩等侵入。常形成透辉石阳起石角岩、透辉石矽卡岩,并发生轻微蛇纹石化。片麻岩、变粒岩受花岗岩侵入影响,多有同化混染现象。上岩组(Pt_1B^2)由二长片麻岩、长石片岩、白云石大理岩及变流纹岩等组成。晚古生代二叠纪地层均出露于矿区以南及以西地区,局部为第四系砂砾石及残坡积(图 1b)。

矿区岩浆活动较强烈,主要有石炭纪中细粒二长花岗岩($C\eta\gamma$)、二叠纪中细粒斜长花岗岩($P_2\gamma O$)、辉长岩(ν)及碱性花岗岩($k\gamma$)出露,呈岩脉或岩株状产出,总体呈北西西向展布,受构造控制,侵入古元古代北山岩群,碱性花岗岩($k\gamma$)呈脉状侵入辉长岩中(图 2)。辉长岩是区内铜镍钴矿的主要赋矿岩体,沿北东向大断裂及北西向次级断裂分布,是区内铜镍钴矿的主要赋矿岩体。辉长岩呈蚀变和破碎状中细粒辉长结构,块状构造,主要由单斜辉石(约 45%)、基性斜长石(约 50%)组成,含少量角闪石、斜方辉石、橄榄石及黑云母,粒径 0.5~

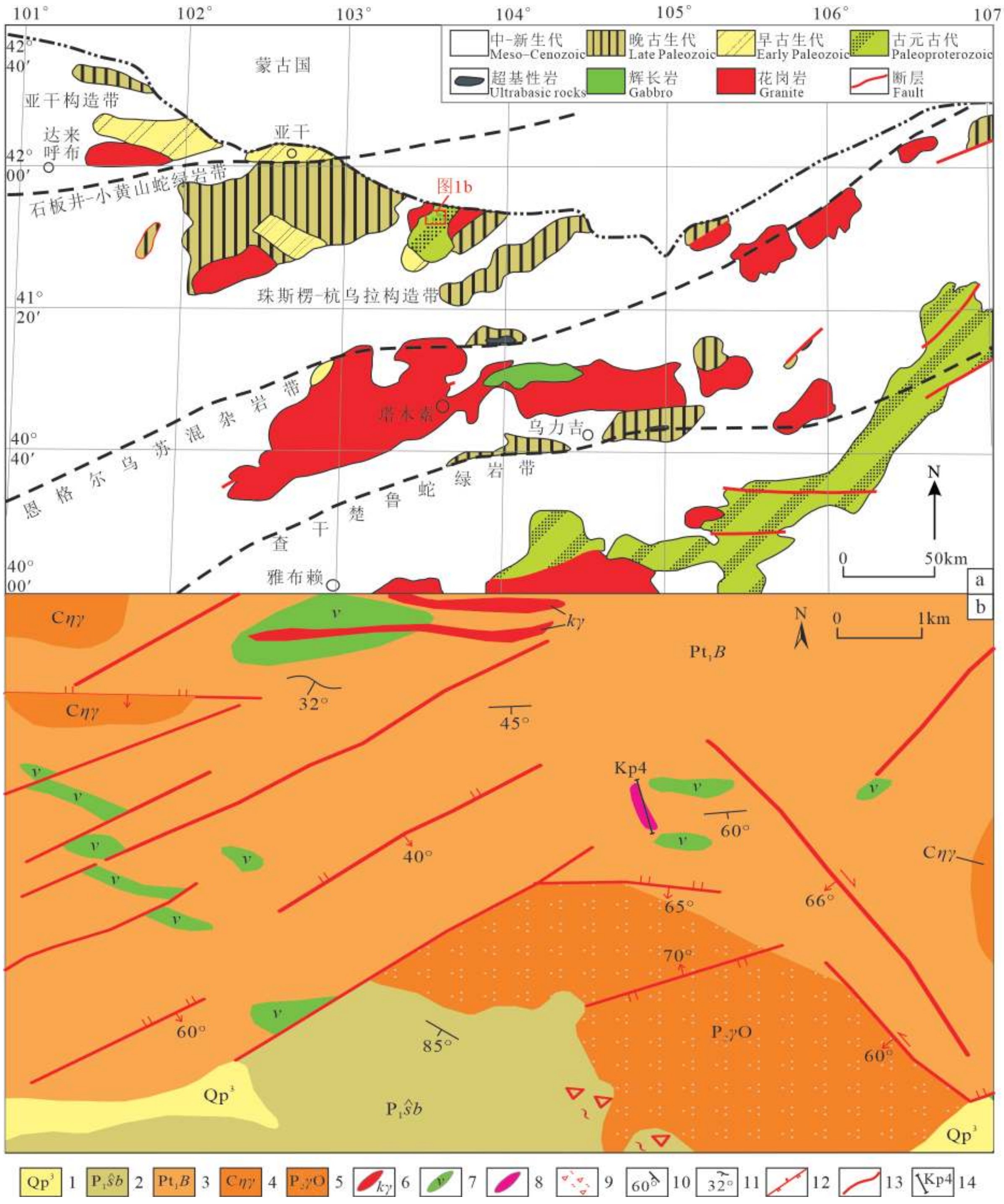

图 1　亚干铜镍钴矿大地构造位置图(a 据徐东卓等, 2014)和区域地质图(b)[❶]

1—更新统; 2—二叠系双堡塘组; 3—古元古界北山群; 4—石炭纪中细粒二长花岗岩; 5—二叠纪中细粒斜长花岗岩; 6—碱性花岗岩脉; 7—辉长岩; 8—铜镍钴矿体; 9—构造破碎带; 10—岩层产状; 11—片麻理产状; 12—逆断层; 13—断层; 14—勘探线

Fig.1　Tectonic location (a, after Xu Dongzhuo et al., 2014) and geological map (b)[❶] of the Yagan Cu–Ni–Co deposit

1–Pleistocene; 2–Permian Shuangbaotang Formation; 3–Paleoproterozoic Beishan Group; 4–Carboniferous medium–fine grained monzogranite; 5–Permian medium–fine grained plagioclase granite; 6–Alkali granite dike; 7–Gabbro; 8–Cu–Ni–Co deposit; 9–Tectonic fracture zone; 10–Attitude of lithologic unit; 11–Attitude of gneissic schistosity; 12–Reverse fault; 13–Fault; 14–Prospecting line

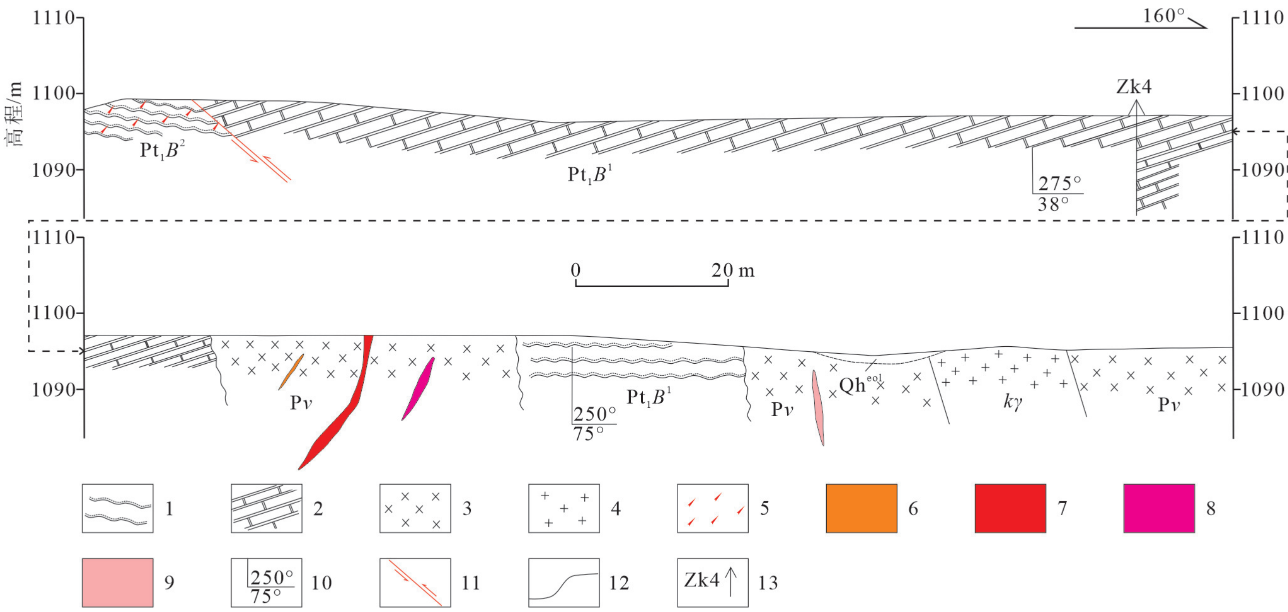

图 2 亚干铜镍钴矿区 ZP4 勘查线剖面图[1]

1—黑云斜长片麻岩; 2—大理岩; 3—辉长岩; 4—花岗岩; 5—碎裂岩; 6—镍钴矿体; 7—铜镍钴矿体; 8—钴矿体; 9—铜矿体; 10—产状; 11—平移断层; 12—地质界线; 13—钻孔

Fig.2 ZP4 survey line section of the Yagan Cu–Ni–Co deposit[1]

1–Biotite plagioclase gneiss; 2–Marble; 3–Gabbro; 4–Granite; 5–Cataclasite; 6–Nickel cobalt ore bodies; 7–Copper nickel cobalt ore bodies; 8–Cobalt ore body; 9–Copper ore body; 10–Attitude; 11–Displacement fault; 12–Geological boundary; 13–Borehole

2 mm, 暗色矿物含量略高于浅色矿物, 单斜辉石呈半自形柱状, 部分纤闪石化, 斜长石呈半自形柱状, 部分黝帘石化, 石英呈他形粒状沿矿物裂隙侵入。

区内褶皱构造较发育, 以北西向亚干复式背斜为主体, 轴长约 6 km, 轴向约 280°, 发育较多规模不等的线性褶曲。断裂构造主要以北东—北北东向、北西向为主。亚干铜镍钴矿北东—北北东向断裂倾向北西, 倾角约 65°, 局部破碎带较明显, 为区域内主要容矿构造。北西向断裂主要形成于早寒武世, 以压性、压扭性为主, 劈理较发育, 为控岩、控矿构造。

矿区铜、镍、钴矿体产于辉长岩体, 共圈定矿带 2 条(北部为钴矿体、南部为铜镍钴矿体), 矿体 9 条。矿区内有铜钴镍、镍钴和钴矿体, 矿体形态为透镜状, 具有分支复合、膨胀收缩等特点(图 3)。矿体走向近东西, 倾向南, 倾角 68°~80°, 为盲矿体, 埋深近百米。通过磁测及钻探验证推断矿体为透镜状、似透镜状, 长 760 m, 平均厚 9 m, 倾向延深 300 m, 矿体走向近东西, 倾角近直立或南倾。矿石常呈浸染状、粒状结构, 呈条带状、团块状构造; 矿石矿物主要有镍黄铁矿、黄铜矿、辉铜矿及磁黄铁矿。脉石矿物有单斜辉石、斜长石、绿泥石及黑云母等。亚干铜镍钴矿区围岩蚀变有碳酸盐化、矽卡岩化、角闪石化、黄铁矿化、蛇纹石化及绿泥石化等。Cu 含量为 0.196%~0.285%, Ni 含量为 0.167%~0.304%, Co 含量为 0.019%~0.0374%。

3 样品和分析方法

亚干铜镍钴矿辉长岩采自 ZK4 附近, 采样位置坐标: 42°03′26″N、102°34′30″E, 样品较新鲜。首先将岩石样品进行常规粉碎、磁选、重选后, 在双目镜下分选出透明度较好、纯度较高(约在 99% 以上)且晶型发育较好的锆石样品, 将完整的锆石颗粒置于环氧树脂中固定, 后期用不同型号磨料和砂纸对其打磨抛光, 将其磨至大概一半以出露锆石内部形态, 制成环氧树胶样品靶; 在中国地质调查局天津地质调查中心实验室对抛光好的锆石进行透、反射及阴极发光照相等工作, 在北京锆年领航科技有限公司进行锆石单矿物挑选及制靶工作。

在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 同位素、主微量元素及锆石 Hf 同位素测试, 锆石 Lu–Hf 同位素测定时

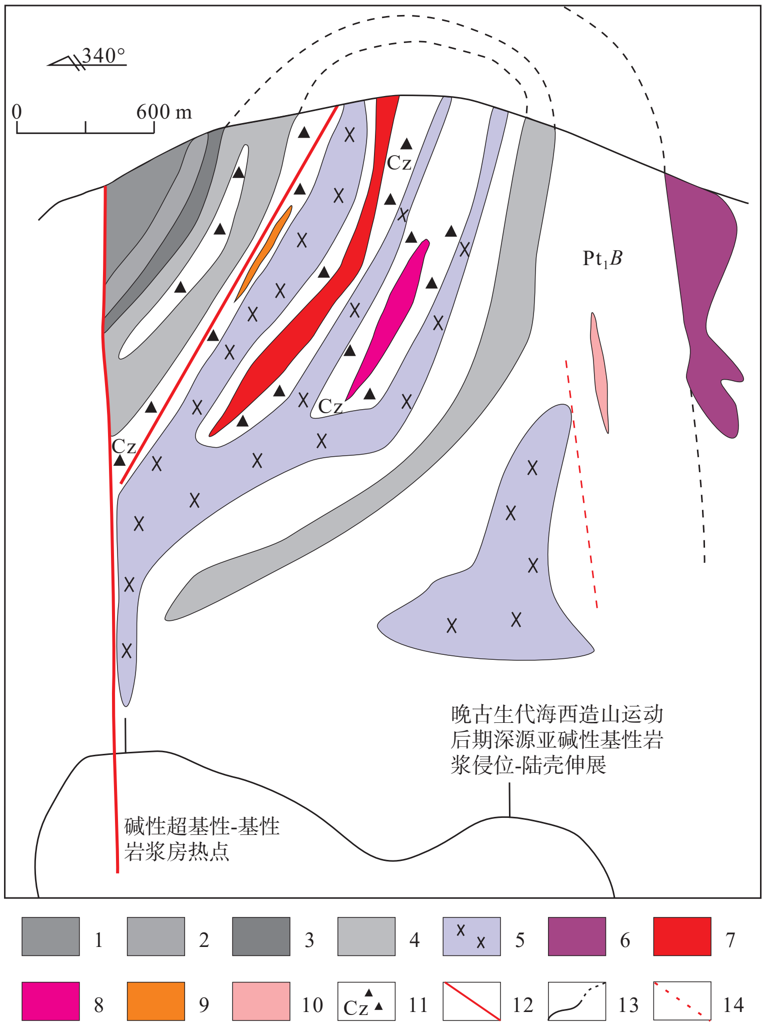

图 3　亚干铜镍钴构造空间特征及成矿模式图

1—绿泥石大理岩; 2—透闪石大理岩; 3—第四系冲击砂砾岩; 4—黑云斜长变粒岩; 5—辉长岩; 6—斜长花岗岩; 7—铜镍钴矿体; 8—钴矿体; 9—镍钴矿体; 10—铜矿体; 11—破碎岩化相带; 12—断层; 13—实测与推测地质界线; 14—断裂裂隙带

Fig.3 Structural spatial characteristics and metallogenic model map of the Yagan Cu−Ni−Co deposit

1–Chlorite marble; 2–Tremolite marble; 3–Quaternary impact glutenite; 4–Biotite plagioclase granulite; 5–Gabbro; 6–Plagiogranite; 7–Copper–nickel–cobalt ore body; 8–Cobalt ore body; 9–Nickel cobalt ore body; 10–Copper ore body; 11–Fragmental lithofacies zone; 12–Fault; 13–Measured and inferred geological boundaries; 14–Fracture fracture zone

选取的位置与 U–Pb 同位素测点位置基本相同, 实验测试仪器为美国 Thermo Fisher 公司生产的 Neptune, 激光剥蚀用 ESI 公司产的 NEW WAVE 193 nm FX ArF, 脉冲 8 Hz, 锆石标样为 GJ–1, 斑束剥蚀直径 35 μm, 图件及数据处理采用 Ludwig 的 Isoplot 程序和中国地质大学刘勇胜教授研发的 ICP–MS–Data Cal 程序操作, 普通铅进行校正方法、锆石样品的 U–Th–Pb 计算方法及实验测试详细流程见李怀坤等(2009), U–Pb 同位素测试及分析结果见表 1; Lu–Hf 同位素测试条件及流程见耿建珍等(2011), Lu–Hf 同位素测试及分析结果见表 2, 其中球粒陨石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值为 0.2833, $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值为 0.0336, 与现今亏损地幔值相当(Griffin et al., 2000; Bouvier et al., 2008)。主量元素分析使用 X 射线荧光光谱仪(XRF)进行分析, 微量及稀土元素测试使用等离子体质谱仪进行分析, 分析结果见表 3。

4　分析结果

4.1　锆石 U–Pb 定年结果

对亚干铜镍钴矿辉长岩锆石透射光、反射光及

表 1 亚干铜镍钴矿辉长岩 LA–MC–ICP–MS 锆石 U–Pb 分析结果

Table 1 La–MC–ICP–MS zircon U–Pb analytical data of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit

测点号	含量/10^{-6}			同位素比值								年龄/Ma					
	Pb	Th	U	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{232}Th/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
1	21	276	440	0.0526	0.0011	0.3059	0.0075	0.0421	0.0008	0.6276	0.0033	313	50	271	7	266	5
2	32	539	629	0.0520	0.0011	0.3007	0.0072	0.0419	0.0008	0.8570	0.0041	287	47	267	6	265	5
3	10	91	242	0.0525	0.0017	0.2965	0.0091	0.0410	0.0007	0.3775	0.0018	306	76	264	8	259	5
4	29	411	620	0.0523	0.0010	0.2976	0.0065	0.0412	0.0007	0.6634	0.0509	300	43	265	6	261	4
5	28	410	610	0.0512	0.0011	0.2893	0.0067	0.0410	0.0007	0.6716	0.0040	249	50	258	6	259	5
6	30	380	664	0.0519	0.0012	0.2922	0.0064	0.0408	0.0007	0.5716	0.0039	280	51	260	6	258	5
7	48	670	1041	0.0519	0.0012	0.2986	0.0085	0.0417	0.0007	0.6437	0.0028	282	52	265	8	263	5
8	37	538	786	0.0503	0.0011	0.2869	0.0063	0.0414	0.0007	0.6840	0.0143	209	52	256	6	261	5
9	6	66	126	0.0520	0.0016	0.3092	0.0098	0.0431	0.0008	0.5245	0.0072	285	70	274	9	272	5
10	17	261	347	0.0527	0.0016	0.3053	0.0086	0.0420	0.0007	0.7526	0.0119	316	70	271	8	265	5
11	9	105	199	0.0519	0.0019	0.3086	0.0110	0.0431	0.0008	0.5299	0.0042	282	83	273	10	272	5
12	44	699	847	0.0512	0.0009	0.3136	0.0063	0.0444	0.0008	0.8248	0.0091	251	42	277	6	280	5
13	16	177	353	0.0523	0.0019	0.3119	0.0106	0.0432	0.0008	0.5028	0.0469	300	81	276	9	273	5
14	38	671	755	0.0525	0.0019	0.3098	0.0105	0.0428	0.0008	0.8885	0.0218	306	82	274	9	270	5
15	11	137	236	0.0529	0.0013	0.3225	0.0097	0.0442	0.0008	0.5825	0.0033	324	58	284	9	279	5
16	93	2044	1563	0.0525	0.0008	0.3191	0.0074	0.0441	0.0009	1.3075	0.0068	309	36	281	6	278	6
17	12	132	262	0.0524	0.0014	0.3097	0.0087	0.0429	0.0008	0.5030	0.0030	303	62	274	8	271	5
18	26	328	558	0.0515	0.0015	0.3059	0.0076	0.0431	0.0008	0.5877	0.0047	262	69	271	7	272	5
19	40	666	795	0.0509	0.0024	0.3002	0.0074	0.0428	0.0008	0.8372	0.0049	237	109	267	7	270	5
20	10	117	222	0.0523	0.0013	0.3165	0.0084	0.0439	0.0009	0.5268	0.0155	297	58	279	7	277	5
21	46	584	979	0.0498	0.0008	0.2939	0.0062	0.0428	0.0008	0.5970	0.0033	185	39	262	6	270	5
22	40	736	737	0.0520	0.0009	0.3216	0.0070	0.0449	0.0008	0.9989	0.0408	284	40	283	6	283	5
23	45	793	841	0.0521	0.0009	0.3149	0.0072	0.0439	0.0009	0.9434	0.0082	288	40	278	6	277	5
24	25	333	505	0.0521	0.0011	0.3231	0.0077	0.0450	0.0008	0.6595	0.0212	290	47	284	7	284	5
25	7	70	145	0.0549	0.0016	0.3294	0.0097	0.0435	0.0008	0.4841	0.0024	409	64	289	8	275	5
26	9	86	202	0.0522	0.0015	0.3021	0.0084	0.0420	0.0007	0.4239	0.0052	293	65	268	7	265	5
27	11	108	245	0.0525	0.0014	0.2923	0.0079	0.0404	0.0007	0.4412	0.0021	308	59	260	7	255	4

表 2 锆石 Hf 同位素组成分析

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions

测点号	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	年龄/Ma	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{Lu/Hf}$
15YG.1.1	0.0296	0.0008	0.0010	0.0000	0.282706	0.000016	266	−2.3	774	1751	−0.97
15YG.1.2	0.0485	0.0007	0.0017	0.0000	0.282665	0.000017	265	−3.8	848	1880	−0.95
15YG.1.3	0.0826	0.0003	0.0029	0.0000	0.282575	0.000024	259	−7.0	1009	2167	−0.91
15YG.1.5	0.0616	0.0007	0.0021	0.0000	0.282694	0.000022	261	−2.8	814	1787	−0.94
15YG.1.6	0.0163	0.0010	0.0006	0.0000	0.282597	0.000071	259	−6.2	919	2099	−0.98
15YG.1.7	0.0656	0.0020	0.0024	0.0000	0.282764	0.000025	258	−0.3	718	1564	−0.93
15YG.1.8	0.0283	0.0004	0.0009	0.0000	0.282654	0.000027	263	−4.2	845	1915	−0.97
15YG.1.9	0.0371	0.0011	0.0013	0.0000	0.282670	0.000021	261	−3.6	831	1864	−0.96
15YG.1.10	0.0583	0.0005	0.0022	0.0000	0.282728	0.000031	272	−1.6	768	1680	−0.93
15YG.1.11	0.0881	0.0030	0.0028	0.0001	0.282748	0.000036	265	−0.8	751	1614	−0.91
15YG.1.12	0.0373	0.0005	0.0013	0.0000	0.282682	0.000033	272	−3.2	814	1825	−0.96
15YG.1.13	0.1233	0.0022	0.0040	0.0001	0.282852	0.000036	280	2.8	616	1281	−0.88
15YG.1.15	0.0742	0.0027	0.0024	0.0001	0.282821	0.000044	273	1.7	635	1382	−0.93
15YG.1.16	0.0592	0.0003	0.0019	0.0000	0.282670	0.000042	270	−3.6	845	1863	−0.94
15YG.1.17	0.0355	0.0005	0.0011	0.0000	0.282668	0.000037	279	−3.7	830	1870	−0.97
15YG.1.18	0.0932	0.0003	0.0030	0.0000	0.282855	0.000041	278	2.9	596	1272	−0.91
15YG.1.19	0.1020	0.0005	0.0038	0.0001	0.282814	0.000034	271	1.5	673	1404	−0.88
15YG.1.20	0.0869	0.0004	0.0030	0.0000	0.282797	0.000038	272	0.9	683	1460	−0.91
15YG.1.21	0.0409	0.0007	0.0012	0.0000	0.282572	0.000034	270	−7.1	970	2177	−0.96
15YG.1.22	0.0505	0.0005	0.0017	0.0000	0.282658	0.000030	277	−4.0	858	1902	−0.95
15YG.1.23	0.0609	0.0029	0.0019	0.0001	0.282778	0.000031	270	0.2	688	1518	−0.94
15YG.1.24	0.0645	0.0005	0.0020	0.0000	0.282777	0.000029	283	0.2	693	1523	−0.94
15YG.1.25	0.0455	0.0003	0.0016	0.0000	0.282734	0.000028	277	−1.3	746	1660	−0.95
15YG.1.26	0.1029	0.0005	0.0032	0.0000	0.282676	0.000032	284	−3.4	866	1846	−0.91
15YG.1.27	0.1823	0.0008	0.0052	0.0000	0.282765	0.000033	275	−0.2	777	1561	−0.84

表 3 亚干铜镍钴矿辉长岩主量元素（%）、稀土元素和微量元素（10^{-6}）分析结果

Table 3 Major (%), rare earth and trace (10^{-6}) element contents of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit

样号	15YG-2	15YG-3	15YG-4	15YG-6	15YG-7	15YG-8	15YG-9	15YG-10	15YG-11
SiO_2	52.89	53.68	55.93	52.18	57.56	51.88	56.15	53.92	53.44
TiO_2	1.12	1.08	0.83	0.81	0.95	0.96	0.91	0.90	0.82
Al_2O_3	16.17	15.99	16.65	17.21	16.93	17.47	17.09	17.40	16.84
Fe_2O_3	6.53	5.93	3.72	3.32	4.11	4.74	4.02	3.98	3.62
FeO	5.02	4.90	4.37	5.32	3.95	4.83	4.28	4.50	4.86
TFeO	10.90	10.24	7.72	8.31	7.65	9.10	7.90	8.08	8.12
MnO	0.17	0.16	0.15	0.18	0.13	0.18	0.15	0.16	0.17
MgO	4.19	3.98	4.28	5.64	3.18	4.85	3.65	4.23	5.00
CaO	6.74	7.14	6.85	8.18	6.18	8.34	6.72	6.76	7.24
Na_2O	3.29	3.46	4.03	3.39	3.98	3.80	3.99	4.57	3.91
K_2O	2.05	1.87	1.46	1.66	1.40	1.14	1.27	1.29	1.77
P_2O_5	0.18	0.18	0.16	0.14	0.21	0.17	0.20	0.20	0.14
烧失量	1.25	1.16	1.16	1.52	1.11	1.21	1.15	1.72	1.74
A/NK	2.12	2.07	2.03	2.33	2.10	2.33	2.15	1.95	2.02
A/CNK	0.81	0.77	0.80	0.77	0.88	0.77	0.85	0.82	0.78
$Mg^{\#}$	59.79	59.14	63.57	65.38	58.92	64.15	60.31	62.61	64.70
K_2O+Na_2O	5.34	5.33	5.49	5.05	5.38	4.94	5.26	5.86	5.68
K_2O/Na_2O	0.62	0.54	0.36	0.49	0.35	0.30	0.32	0.28	0.45
σ	2.88	2.66	2.33	2.78	1.99	2.75	2.10	3.14	3.09
TFeO/MgO	2.60	2.57	1.80	1.47	2.41	1.88	2.16	1.91	1.62
La	11.2	15.4	13.8	11.8	14.0	11.8	13.5	14.6	11.5
Ce	24.6	34.5	30.9	26.4	32.3	25.9	30.8	31.9	25.6
Pr	3.52	4.49	4.09	3.58	4.22	3.51	4.2	4.31	3.39
Nd	16.1	18.9	17.4	15.3	18.5	15.6	18.5	18.6	14.4
Sm	3.84	4.18	3.8	3.45	4.25	3.59	4.3	4.16	3.22
Eu	1.1	1.23	1.13	1.14	1.21	1.13	1.19	1.16	1.09
Gd	3.68	4.03	3.63	3.38	4.08	3.53	3.96	3.94	3.2
Tb	0.67	0.72	0.64	0.6	0.72	0.63	0.72	0.71	0.58
Dy	4.02	4.19	3.71	3.47	4.22	3.67	4.23	4.13	3.3
Ho	0.81	0.85	0.75	0.7	0.86	0.74	0.85	0.82	0.66
Er	2.34	2.48	2.2	2.04	2.48	2.18	2.48	2.38	1.96
Tm	0.35	0.38	0.35	0.31	0.38	0.33	0.37	0.36	0.3
Yb	2.26	2.48	2.23	2.02	2.46	2.14	2.45	2.35	1.92
Lu	0.36	0.39	0.35	0.31	0.39	0.33	0.38	0.37	0.31
ΣREE	74.85	94.22	84.98	74.5	90.07	75.08	87.93	89.79	71.43
LREE	60.36	78.7	71.12	61.67	74.48	61.53	72.49	74.73	59.2
HREE	14.49	15.52	13.86	12.83	15.59	13.55	15.44	15.06	12.23
LREE/HREE	4.17	5.07	5.13	4.81	4.78	4.54	4.69	4.96	4.84
δEu	0.88	0.90	0.92	1.01	0.88	0.96	0.87	0.86	1.03
δCe	0.94	0.99	0.98	0.97	1.00	0.96	0.98	0.96	0.98
$(La/Yb)_N$	3.34	4.19	4.17	3.94	3.84	3.72	3.71	4.19	4.04
Rb	60.1	41.9	32.4	46.8	39.9	27.3	27.4	39.6	39.8
Ba	423	422	448	427	543	380	499	331	517
Th	3.56	4.21	3.16	2.56	4.72	1.76	3.22	3.15	3.20
U	1.22	2.19	1.25	1.16	2.07	1.05	1.30	1.16	1.37
Nb	3.35	4.45	3.81	2.88	5.00	3.18	4.25	4.14	3.05
Ta	0.22	0.37	0.28	0.22	0.41	0.23	0.33	0.31	0.26
Sr	440	353	424	416	536	393	395	500	400
Zr	106	92.6	94.3	63.3	141	91.7	132	134	81.2
Hf	3.12	2.95	2.79	2.10	4.04	2.71	3.65	3.66	2.56
Y	19.9	20.9	18.8	17.2	20.9	18.1	20.6	20.3	16.2
Cr	6.14	9.75	42.2	94.2	5.93	48.7	21.3	28.2	46.2
Co	26.8	26.6	22.5	27.6	18.0	26.5	20.4	24.2	24.4
Ni	3.94	4.73	8.69	19.6	3.28	11.6	6.35	10.4	14.8
Sc	22.9	23.8	21.5	22.8	13.9	15.4	14.8	12.4	16.5
V	340	333	211	222	201	255	204	204	218
Pb	7.60	7.34	9.06	6.50	10.0	9.09	9.17	7.51	7.72
Cu	56.2	37.3	19.5	26.2	22.1	24.9	23.0	32.4	23.2
Zn	92.2	84.4	77.2	80.8	75.7	86.9	78.9	75.3	83.4
Cs	2.07	2.10	1.22	1.65	1.20	1.02	0.96	1.05	1.26

注: $Mg^{\#}=100\times Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$；$\sigma=[\omega(K_2O+Na_2O)]^2/[\omega(SiO_2)-43]$。

CL 图像仔细观察基础上挑选了 27 粒裂隙发育少、透明度高的锆石进行测试，锆石呈柱状、次棱角状、棱角状，颗粒较小，长 60~100 μm，长宽比为 1~2，内部结构清晰（图 4）；U 元素含量变化于 126×10^{-6}~1563×10^{-6}，Th 元素含量变化于 66×10^{-6}~2044×10^{-6}，Th/U 比值为 0.38~1.31，均大于 0.1，表明其具有典型岩浆锆石成因（Hanchar and Miller, 1993; 赵振华, 2010; 张超等, 2014; Zhang et al., 2024）。根据数据处理结果制作谐和年龄曲线图，发现所有分析点位于谐和线附近（图 5），其加权平均年龄为（268.8±3.1）Ma（MSWD=2.6），表明亚干铜镍钴矿辉长岩体形成于中二叠世。

4.2 主量及微量元素地球化学

亚干铜镍钴矿辉长岩 SiO_2 含量为 52.18%~57.56%，平均含量为 54.18%；TiO_2 含量相对较低，介于 0.81%~1.12%；Al_2O_3 含量较高，达到 15.99%~17.47%；Fe_2O_3、FeO 含量分别为 3.32%~6.53% 和 3.95%~5.32%；MnO 含量为 0.13%~0.18%；MgO 含量为 3.18%~5.64%，$Mg^{\#}$为 58.92~64.70，低于原生岩浆 $Mg^{\#}$值（68~75）（Wilson, 1989）；CaO 含量较高，介于 6.18%~8.34；（K_2O+Na_2O）介于 4.94%~5.86%，其中 K_2O/Na_2O值为 0.28%~0.62%，相对富钠；P_2O_5 含量较低（0.14%~0.21%）。与中国辉长岩平均值相比较（黎彤和饶纪龙, 1963），亚干铜镍钴矿辉长岩

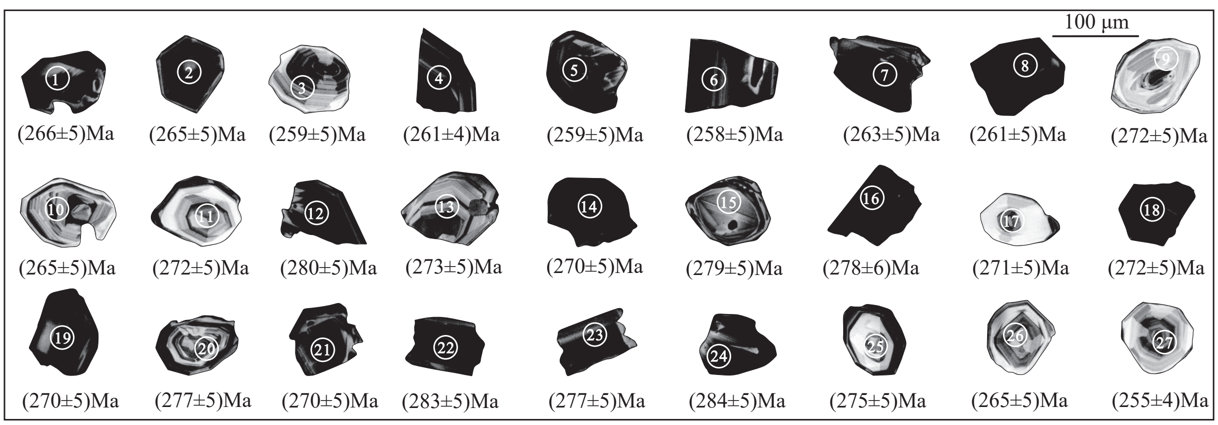

图 4 亚干铜镍钴矿辉长岩体锆石阴极发光图像
Fig.4 Cathodoluminescence images of zircons of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit

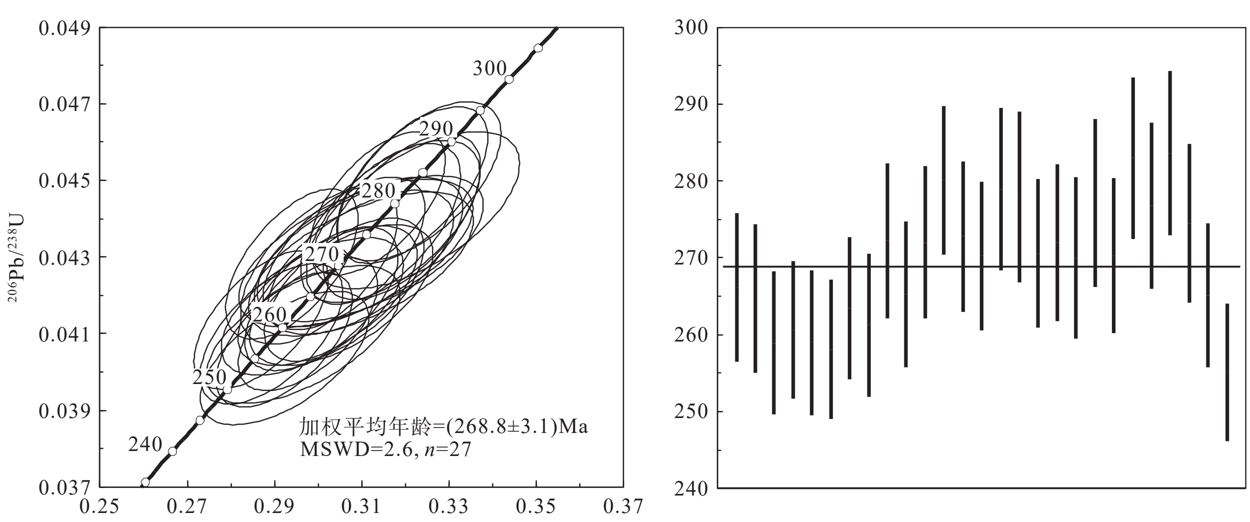

图 5 亚干铜镍钴矿辉长岩体 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年谐和图
Fig.5 LA–ICP–MS zircon U–Pb concordia diagram of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit

Al_2O_3 含量较高，FeO、MgO、TiO_2、P_2O_5、(K_2O+Na_2O)含量偏低，辉长岩总体呈高铝、低铁镁、贫钛和贫碱的特征。在 SiO_2–(Na_2O+K_2O) 图解上，亚干辉长岩岩石样品点全部落在亚碱性系列区域(图 6a)，在 AFM 图解上，岩石表现出钙碱性系列特征(图 6b)。

在亚干铜镍钴矿不同位置采集的辉长岩样品稀土及微量元素组成相近，其稀土元素(ΣREE=71.43×10^{-6}~94.22×10^{-6})，δEu 值介于 0.86~1.03，Eu 呈相对较弱的负异常，$(La/Yb)_N$ 比值为 3.34~4.19，表示稀土元素分馏程度较低，所有样品呈向右倾斜的轻稀土元素相对富集，重稀土元素相对平坦的配分曲线特征(图 7a)；原始地幔蛛网图显示亚干铜镍钴矿辉长岩明显富集不相容元素 U、Sr，亏损高场强元素 Ta、P、Nb(图 7b)。

4.3 锆石 Hf 同位素

对辉长岩的 25 个锆石颗粒进行 Lu–Hf 同位素测定(表 2)，测试及分析结果表明锆石具有非常均匀的 Hf 同位素组成，$^{176}Hf/^{177}Hf$ 值范围介于 0.282572~0.282855，$^{176}Lu/^{177}Hf$ 和 $^{176}Yb/^{177}Hf$ 比值范围分别为 0.0006~0.0052 和 0.0163~0.1823，所有分析点 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值均小于 0.006，说明这些锆石在形成以后几乎没有或具有很少的放射性成因 ^{176}Hf 积累，故 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值能够真正代表辉长岩源区 Hf 同位素组成。$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值变化范围介于−7.1~2.9(图 8)，平均值为−2.0；锆石单阶段 Hf 模式年龄

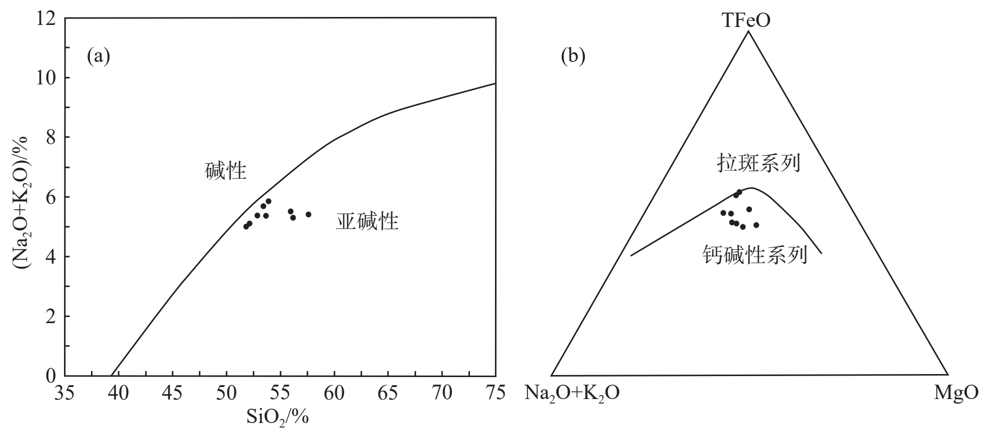

图 6 岩石碱性–亚碱性及拉斑–钙碱性系列分类图解
a—SiO_2–(Na_2O+K_2O) 图解；b—AFM 图解(据 Wilson, 1989)
Fig.6 Rock alkaline–subalkaline and tholeiite–calcium alkaline series classification diagram
a–SiO_2–(Na_2O+K_2O) diagram; b–AFM diagram (after Wilson, 1989)

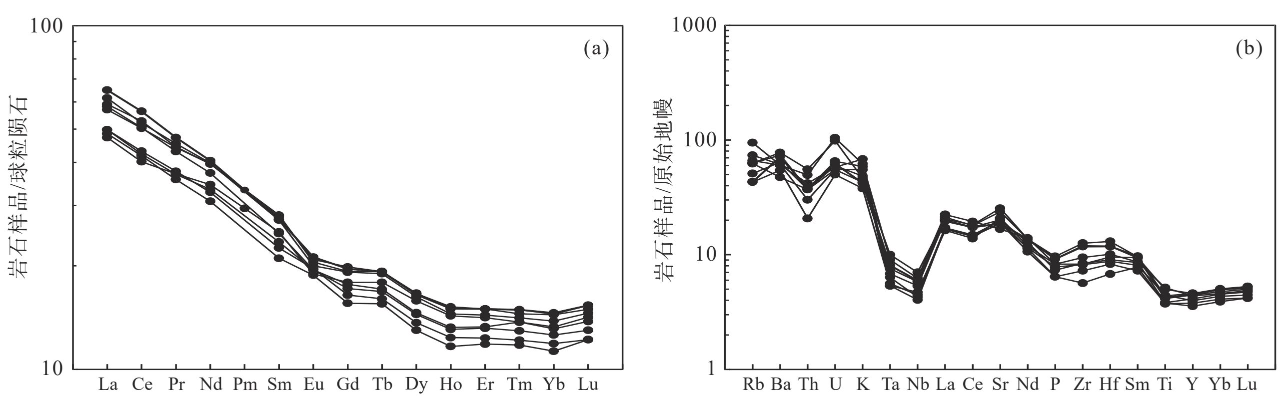

图 7 亚干铜镍钴矿辉长岩球粒陨石标准化稀土配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化数值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig.7 Chondrite normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element patterns (b) of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

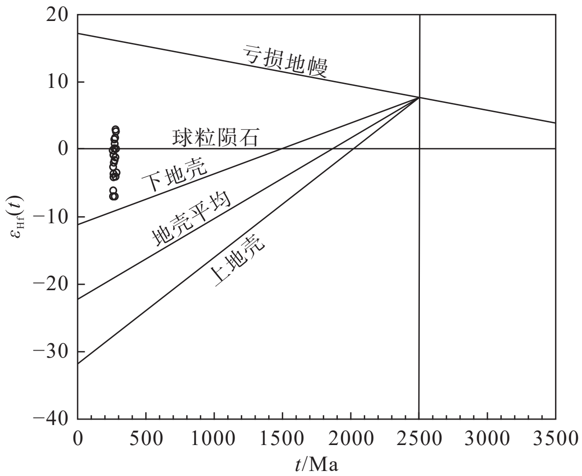

图 8 亚干铜镍钴矿辉长岩锆石 Hf 同位素演化图解
Fig.8 Hf isotopic diagram of the zircons of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit

T_{DM1} 为 596~1009 Ma, 平均值为 783 Ma, 二阶段 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 1272~2177 Ma, 平均值为 1715 Ma。

5 讨 论

5.1 亚干铜镍钴矿成矿时代

本文通过 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 测年法获得亚干铜镍钴矿辉长岩年龄为(268.8±3.1)Ma(n=27, MSWD=2.6), 说明辉长岩为中二叠世岩浆活动的产物。内蒙古中西部地区发育一条东西向断续分布的与超基性—中基性岩有关的岩浆岩带, 该岩带白云鄂博矿集区辉长岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄为 259 Ma(张宗清, 2003); 克布镍钴矿床辉长岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄为(265.1±2.1)Ma(李志丹等, 2015); 黄花滩铜镍矿辉长岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄为(268.7±1.1)Ma(李志丹等, 2020); 别力盖庙橄榄二辉岩 SIMS 锆石 U–Pb 年龄为(269.4±2.1)Ma(Peng et al., 2017)。亚干铜镍钴辉长岩与上述辉长岩、二辉岩体同处于中亚造山带构造环境, 岩浆侵位时代一致, 该时期岩浆活动及相关成矿作用强烈; 由于铜镍钴矿体产出于辉长岩中, 而且辉长岩具有明显的铜镍矿化, 指示亚干铜镍钴矿体形成于中二叠世, 结合白云鄂博、克布、黄花滩、别力盖庙、红旗店等矿床研究成果, 确定中二叠世为中亚造山带与超基性—中基性岩浆活动相关的重要岩浆矿床的成矿时代。

5.2 岩浆源区性质

亚干铜镍钴矿辉长岩 MgO 介于 3.18%~5.64%, Ni 介于 3.28×10^{-6}~19.6×10^{-6}, Cr 介于 5.93×10^{-6}~94.2×10^{-6}, 三者含量低于原始岩浆参考值(MgO 为 10%~12%, Ni 为 90×10^{-6}, Cr 为 250×10^{-6}), $Mg^{\#}$ 变化范围介于 58.92~64.70, 低于原生岩浆 $Mg^{\#}$参考值(68~75)(Wilson, 1989), 表明母岩浆后期经历了结晶分异或地壳混染作用。

Ti、Ta、Nb 等高场强元素及部分强不相容元素在高温高压变质或蚀变过程中稳定性较好, 其比值在分离结晶或部分熔融过程中基本不变, 可消除岩浆演化过程中的各种影响, 能够较好反映岩石成因、源区性质及组分(Hofmann, 1997; 张超等, 2020, 2023)。Thompson and Morrison(1988)提出来源于岩石圈地幔的基性岩 La/Nb 大于 1.5, La/Ta 大于 22, 与来源于软流圈的岩石性质相反; 亚干辉长岩 La/Nb 介于 2.42~4.10, La/Ta 介于 34.15~53.64, 指示其原岩来源于岩石圈地幔。原始岩浆熔融程度不同导致基性岩 TiO_2 含量存在差异, 地壳中 TiO_2 含量平均约 0.72%, 软流圈岩浆 TiO_2 含量达到平均值约 1.27%(Sun and McDonough, 1989), 而深部地幔岩浆 TiO_2 含量达到 2.0% 以上(朱弟成等, 2008)。亚干铜镍钴矿辉长岩 TiO_2 含量为 0.81%~1.91%, 平均值为 1.03%, 低于软流圈及深部地幔岩浆 TiO_2 平均值, 显示辉长岩岩浆源区与浅部地幔相关, 亦指示辉长岩来源于岩石圈地幔。

锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值通常用来指示岩浆源区成分特征, 若 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为正值, 指示岩浆源区为亏损地幔或从中新生的地壳, 若 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为负值, 则指示岩浆源区为富集岩石圈地幔或古老地壳物质占主导(Griffin et al., 2004)。亚干辉长岩中锆石$^{176}Hf/^{177}Hf$比值介于 0.0006~0.0052, 对应的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值介于−7.1~2.9 且大部分为负值, 平均值为−2, 表明岩体主要形成于富集岩石圈地幔, 部分形成于亏损地幔或遭受新生的地壳物质混染。在 t–$\varepsilon_{Hf}(t)$ 图解(图 8)中, 样品数据投点整体位于球粒陨石演化线两侧且全部落在亏损地幔演化线之下, 说明锆石母岩浆不均一且来源于富集岩石圈地幔, 受到后期地壳物质的混染。

5.3 岩浆演化特征

岩体地球化学分析及 Sr–Nd 同位素示踪表明阿拉善北部基性—超基性岩浆源于富集地幔源区亚碱性系列(张建军等, 2012; 张磊等, 2013);亚干辉长岩与阿拉善地块北部牙马图、陶豪托西圈及拐子湖等岩体形成时代及空间分布相近,侵入深度相当,共同经历后期的风化剥蚀而出露地表。亚干辉长岩高铝、低铁镁、贫钛、贫碱,富集轻稀土元素,弱 Eu 负异常,富集不相容元素 U、Sr,亏损高场强元素 Ta、P、Nb,与阿拉善北部基性—超基性岩岩浆性质一致,表明其岩浆源区相同或相近。

哈克图解(图 9)显示,辉长岩 Si_2O 与 Al_2O_3、Na_2O 及 P_2O_5 具有良好的正相关关系,与 CaO 及 MgO 呈负相关关系,指示辉长岩形成过程中存在角闪石、磷灰石及钛铁矿等矿物的结晶分异作用。样品中 K_2O 含量在岩浆演化过程中基本不变(图 9f),表示富钾的金云母矿物相存在于辉长岩岩浆源区。亚干辉长岩原始地幔蛛网图(图 7b)中高场强元素 P 的负异常特征可能与岩浆源区磷灰石残留相关,Ta、Nb 元素亏损与后期地壳物质混染有关(王敏芳等, 2012);与原始地幔的 Th/Ta 值 2.2(Condie, 1982)相比,辉长岩 Th/Ta 值较高(7.65~16.18),表明原始岩浆在运移过程中可能与部分地壳物质发生交代混染作用,这在 Ba/Nb–Ba/La 和 Nb/Y–Rb/Y 图中(图 10)也得到很好地佐证。

通过岩石地球化学特征分析表明,亚干铜镍钴矿辉长岩 $Mg^{\#}$(58.92~64.70)明显低于与地幔橄榄岩平衡的原生岩浆的 $Mg^{\#}$范围(68~75)(Wilson, 1989);Nb/Ta 值(11.73~15.23)变化介于大陆地壳(Nb/Ta=11)(Taylor and McLennan, 1985)与低钾拉斑洋中脊玄武岩(Nb/Ta=17.7)(Sun and McDonough, 1989)之间;Zr/Hf 值(31.72~36.61)与大陆地壳 Zr/Hf 平均值 33(Taylor and McLennan, 1985)及洋中脊玄武岩 Zr/Hf 平均值 36.1(Sun and McDonough, 1989)相当;Th/Ta 值(7.65~16.18)明显高于包括现代地壳和地幔物质的原始地幔值(Th/Ta=2.2)(Condie, 1982);Sm/Nd 值(0.22~0.24)小于洋中脊玄武岩(Anderson, 1994);Zr/Nb 值(20.81~32.37)介于洋中脊玄武岩(Zr/Nb=10~60)之间。综上所述,亚干辉长岩来源于富集地幔部分熔融亚碱性系列基性—超基性岩浆,其在成岩过程中经历了岩浆结晶演化作用,岩浆源区受到地壳物质混染。

5.4 大地构造意义——陆内伸展构造讨论

晚泥盆世—早石炭世,内蒙古中西部地区古亚洲洋板块处于向其南部华北板块俯冲阶段(Tang, 1990; 邵济安, 1991; 洪大卫等, 1994),由于板块强烈碰撞挤压作用使得较热软流圈物质向上运移而释放岩浆及高温流体进入处于弧后盆地下部的岩石圈地幔,使华北板块北缘与古亚洲洋板块碰撞带周边区域地幔橄榄岩发生部分熔融,玄武质岩浆热液向上运移侵入到上覆陆壳中下部。区域地质资料表明,晚石炭世至晚二叠世,阿拉善北部发生大规模岩浆侵入事件(李俊建, 2006; 冉皞等, 2012; 张文等, 2013),岩浆岩具有岩浆弧特征;与古亚洲洋向南俯冲消减作用有关(王廷印等, 1998; 史兴俊等, 2012)。

亚干辉长岩 Zr–Ti、Ni–Y、Th–Ta、Th–Hf–Ta 图解表明该地区岩浆岩具有火山弧性质(图 11),是古亚洲洋南次洋盆中段在晚石炭世—早二叠世早期向南消减,在早二叠世中晚期与北侧巴嘎博格多地块发生碰撞。在珠斯楞—杭乌拉构造带内发现二叠纪早、中期花岗岩具有同碰撞—后碰撞性质,中二叠世末期,珠斯楞—杭乌拉构造带与北部呼和套尔盖早古生代弧发生陆弧碰撞,亚干断裂代表的大洋结束(图 12)。亚干地区位于珠斯楞—杭乌拉构造带,该构造带属于塔里木板块东端,自石炭纪开始向南俯冲,从被动大陆边缘转为主动大陆边缘,形成复理石建造,伴随有玄武岩喷发,亚干辉长岩的侵位时代限定了该区域碰撞闭合时间。亚干辉长岩经过上地幔结晶分异或部分熔融,沿着伸展构造环境上侵,在伸展环境下形成的超基性岩—中基性岩往往伴随铜镍钴矿的形成。

6 结　论

(1)LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年结果表明内蒙古西部亚干铜镍钴矿辉长岩侵位时代为(268.8±3.1)Ma,是中二叠世岩浆活动的产物。

(2)亚干铜镍钴矿辉长岩为亚碱性基性岩,其高 Al_2O_3、低 TiO_2、低 P_2O_5、低钾、富 Mg,弱 Eu 异常,富集 LREE 的右倾配分模式特征及锆石 Hf 同位素组成证明亚干铜镍钴矿辉长岩来源于岩石圈

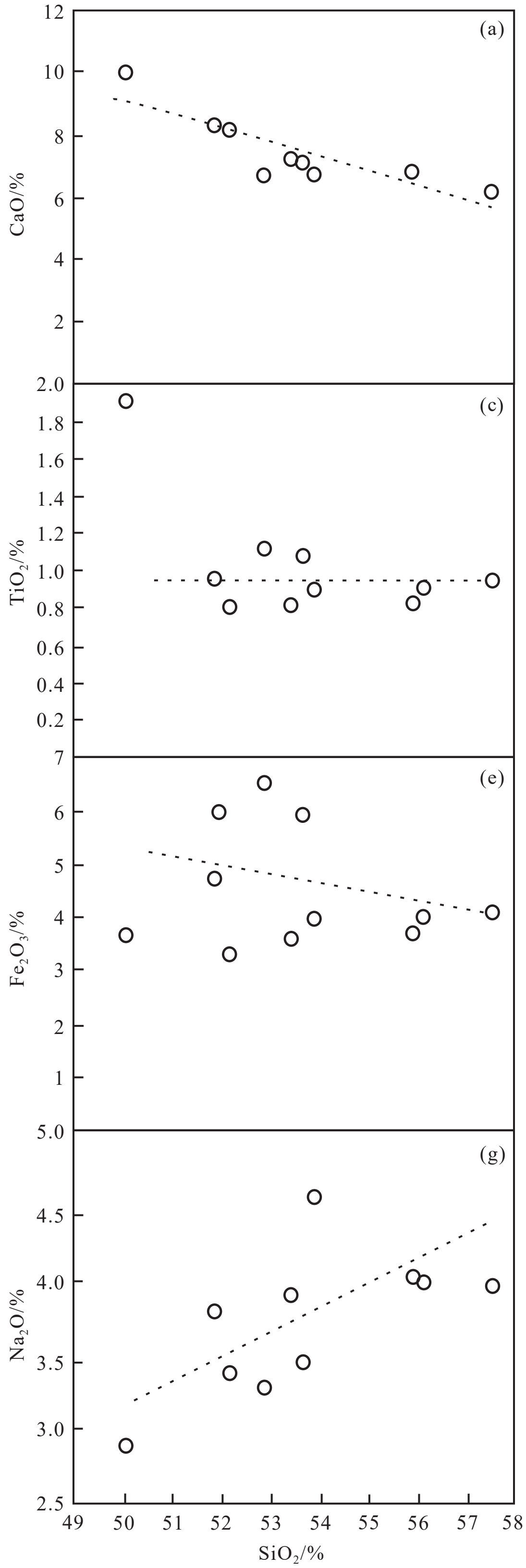

图 9 亚干铜镍钴矿辉长岩主量元素哈克图解
Fig.9 Hacker diagrams of major elements of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit

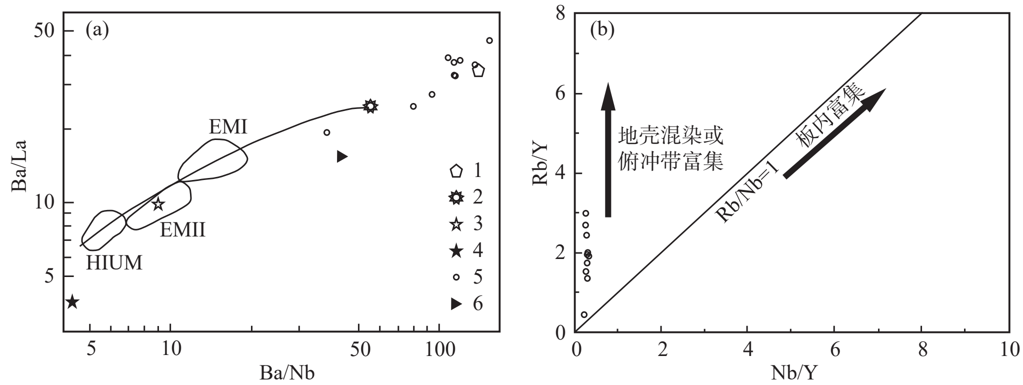

图 10 亚干铜镍钴矿辉长岩 Ba/Nb–Ba/La 图解(据 Weaver, 1991)(a)与 Nb/Y–Rb/Y 图解(b)
HIMU—高 U/Pb 值地幔; EMI、EMII—I 型和 II 型富集地幔; 1—中国东南下地壳(Yu et al., 2003); 2—世界大陆地壳; 3—原始地幔; 4—N–MORB; 5—亚干铜镍钴矿辉长岩; 6—内蒙古地轴出露地壳; 曲线为来自陆壳与 HIMU 物质混合线

Fig.10 Ba/Nb–Ba/La diagram (after Weaver, 1991) (a) and Nb/Y–Rb/Y diagram (b) of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit
HIMU–Mantle of high U/Pb value; EMI, EMII–I–type, II–type enriched mantle; 1–The lower crust of Southeast China (Yu et al., 2003); 2–Continental crust of the whole world; 3–Primitive mantle; 4–N–MORB; 5–Gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit; 6–Exposed crust from the Inner Mongolia axis; The curve is the mixed line from the continental crust and HIMU material

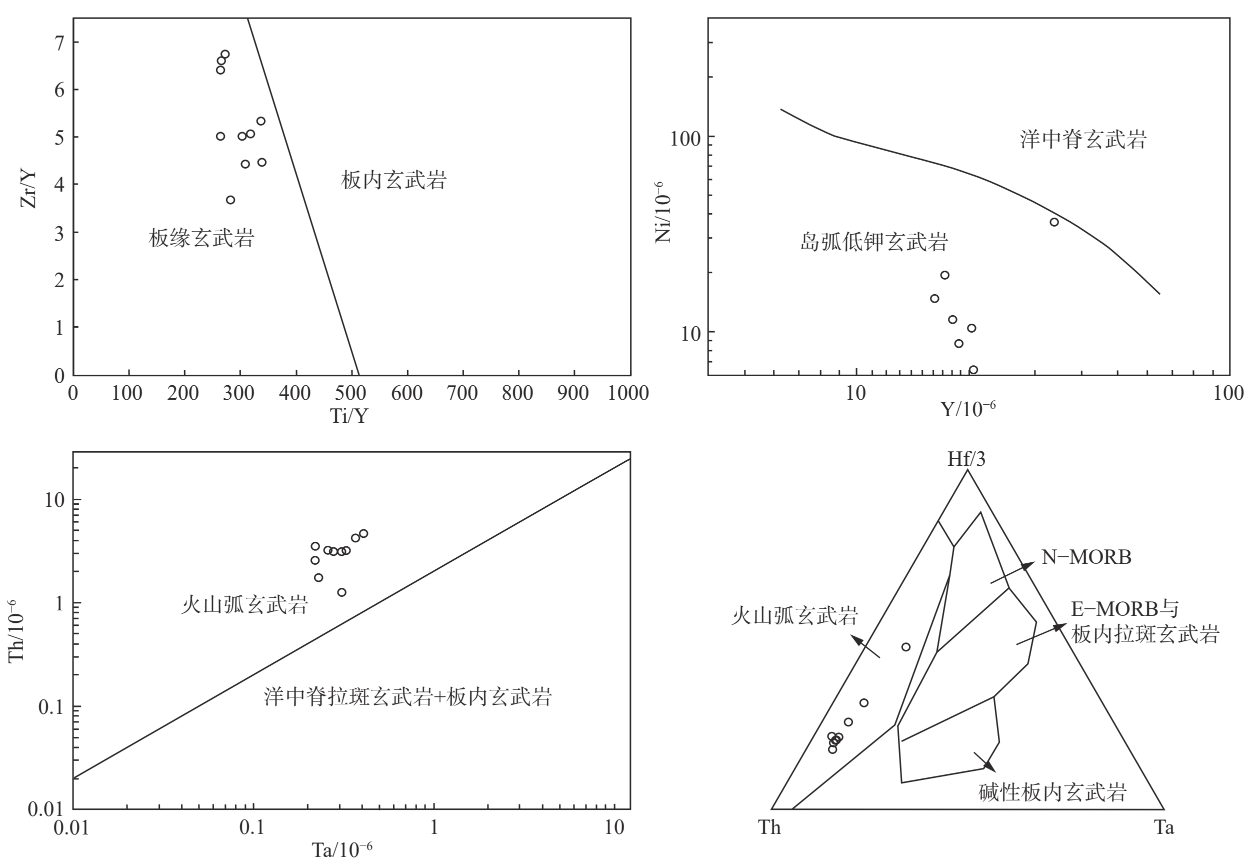

图 11 亚干铜镍钴矿辉长岩 Ti/Y−Zr/Y 图解(据 Pearce et al., 1977)、Y−Ni 图解(据 Capedri et al., 1980)、Ta–Th 图解(据 Wood et al., 1979)和 Th–Hf–Ta 图解(据 Wood, 1980)

Fig.11 Ti/Y−Zr/Y (after Pearce et al., 1977), Y−Ni (after Capedri et al., 1980), Ta–Th (after Wood et al., 1979) and Th–Hf–Ta (after Wood, 1980) diagrams of the gabbro in the Yagan Cu–Ni–Co deposit

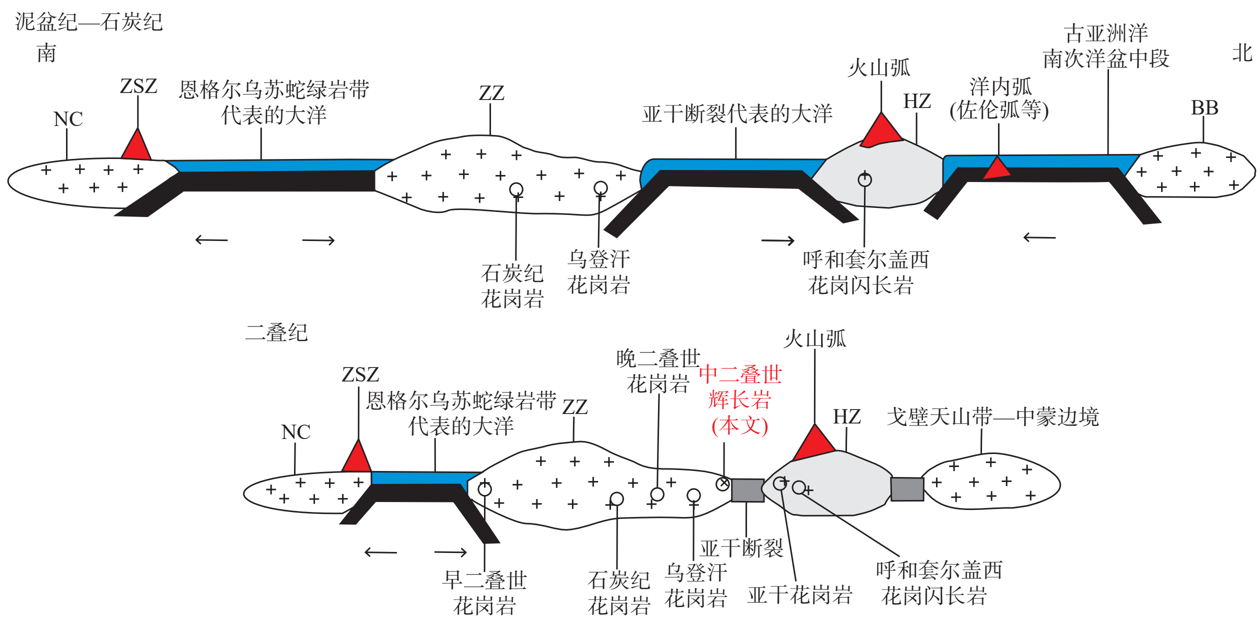

图 12 阿拉善地块北缘晚古生代构造演化图(据宋嘉佳, 2017)

ZZ—珠斯楞—杭乌拉构造带; NC—华北地块; HZ—呼和套尔盖早古生代弧; BB—巴嘎博格多地块; ZSZ—宗乃山—沙拉扎山晚古生代岛弧

Fig.12 Tectonic evolution map of the Late Paleozoic in the northern margin of the Alxa block (after Song Jiajia, 2017)

ZZ–Zhusileng–Hangwula structural belt; NC–North China block; HZ–Early Paleozoic arc of Huhetaoergai; BB–Bagabogeduo block; ZSZ–Late Paleozoic island arc of Zongnaishan–Shalazhashan

富集地幔部分熔融的基性—超基性岩浆，并在岩浆房内或上升过程中发生结晶分异作用，后期与少量地壳物质混染。

（3）岩石地球化学和同位素地质学特征表明亚干铜镍钴矿辉长岩形成于后碰撞伸展构造环境。

注释

❶内蒙古自治区地质调查院. 1999. 哈日奥日布格幅地质图(1：200000)[R].

References

Anderson D L. 1994. Komatites and picrites evidence that the plume source is depleted[J]. Earth and Planetary Science Letters, 128(3/4): 303−311.

Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. 2008. The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. Earth and Planetary Science Letters, 273(1/2): 48−57.

Capedri S, Venturelli G, bocchi G, Dostal J, Garuti G, Rossi A. 1980. The geochemistry and petrogenesis of an ophiolitic sequence from Pindos, Greece[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 74: 189−200.

Chen Changhong. 2015. Genesis and prospecting criteria of Cu–Ni–Co deposits in Inner Mongolia area[J]. Innovation and Application of Science and Technology, (36): 167 (in Chinese).

Cheng Xianyu, Zhang Tianfu, Cheng Yinhang, Wang Shaoyi, Tian Jian. 2008. Paleosedimentary environment evolution of Zhiluo Formation in Tarangaole area, northern margin of the Ordos Basin: Evidence from geochemical characteristics[J]. North China Geology, 44(2): 1−3 (in Chinese with English abstract).

Cheng Yinhang, Zhang Tianfu, Li Yanfeng, Li Min, Niu Wenchao, Teng Xuejian, Duan Lianfeng, Liu Yang, Du Yelong, Hu Xiaojia. 2016. Discovery of the Early Permian ultramatic rock in Dong Ujimqi, Inner Mongolia and its tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 90(1): 115−125 (in Chinese with English abstract).

Condie X C. 1982. Plate Tectonic and Crustal Evolution[M]. New York: Pergamon Press.

Duan L A, Wei Y F, Liu Q Y, Yang X Y. 2020. Discovery of the Dahongshan ultra–large crystalline graphite deposit, Urad Zhongqi of Inner Mongolia, China[J]. China Geology, 3: 182−183.

Duan Ming, Xi Aihua, Sun Guosheng, Xie Yu, Sima Xianzhang, Wei Jialin, Zhang Feng, Feng Xiaoxi, Zeng Wei. 2016. Geochemical characteristics of Chonggenshan ultrabasic rocks of Dong Ujimqin in Inner Mongolia[J]. Global Geology, 35(3): 653−665 (in Chinese with English abstract).

Feng J Y, Xiao W J, Windley B, Han C M, Wan B, Zhang J E, Ao S J, Zhang Z Y, Lin L N. 2013. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic–ultramafic rocks from Alxa, China:

Implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altaids[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 78: 114−142.

Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, Zhou Hongying, Li Huimin. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA–MC–ICP–MS[J]. Geological Bulletin of China, 30(10): 1508−1513.

Geng Yuansheng, Zhou Xiwen. 2012. Early Permian magmatic events in the Alxa metamorphic basement: Evidence from geochronology[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(9): 2667−2685 (in Chinese with English abstract).

Griffin W L, Pearson N J, Elusive E. 2000. The Hf isotopes composition of carbonic mantle: LA–MC–ICP–MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(1): 133−147.

Griffin W L, Belousova E A, Shee S R. 2004. Crustal evolution in the northern Yilarm Craton: U–Pb and Hf isotope evidence from detrital zircons[J]. Precambrian Research, 131(3/4): 231−282.

Hanchar J M, Miller C F. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories[J]. Chemical Geology, 110(1/3): 1−13.

He J Z, Fan Z G, Xiong S Q, Ge T F, Huang X Z, Wang S X. 2021. Geophysical prospecting of copper–nickel deposits in Beishan rift zone, Xinjiang[J]. China Geology, 1: 126−146.

Hofmann A W. 1997. Mantle Geochemistry: The message from oceanic volcanism[J]. Nature, 385: 219−229.

Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, Xu Haiming, Jin Manyuan. 1994. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 68(3): 219−230 (in Chinese with English abstract).

Jiang Sihong, Nie Fengjun, Liu Yan, Wang Xinliang. 2003. Geochemical features and origin of the gabbros in the Xiaonanshan Pt–Cu–Ni deposit, Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 24(2): 121−126 (in Chinese with English abstract).

Li Huaikun, Geng Jianzhen, Geng Shuang, Zhang Yongqing, Li Huimin. 2009. LA–MC–ICPMS determination of zircon U–Pb isotopic age by laser ablation multi–receiver plasma mass spectrometry[J]. Journal of Mineralogy, 29(S1): 600−601 (in Chinese).

Li Junjian. 2006. Inner Mongolia Alxa Block Regional Metallogenic System[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–193 (in Chinese with English abstract).

Li Zhidan, Duo Xingfang, Li Xiaoguang, Zhang Feng, Zhang Jian, Chen Junqiang, Wang Jiaying, Wen Sibo. 2020. Geochemical characteristics, zircon U–Pb age and Hf isotope of the gabbro in the Huanghuatan Cu–Ni deposit, Darhan Maminggan Joint Banner, Inner Monglia[J]. Geological Bulletin of China, 39(4): 491−502 (in Chinese with English abstract).

Li Zhidan, Wang Jiaying, Wen Sibo, Chen Junqiang, Duan Ming, Zhang Feng, Wei Jialin, Xie Yu. 2015. LA–ICP–MS zircon U–Pb age of ultrabasic–basic rocks and geological characteristics of the Urad middle banner deposit, Inner Mongolia[J]. Journal of Mineralogy, 35(S1): 130−131 (in Chinese).

Li Tong, Rao Jilong. 1963. Average composition of magmatic rocks in China[J]. Journal of Geology, 43(3): 271−280 (in Chinese).

Liu Q, Zhao G C, Han Y G, Eizenhöfer P, Zhu Y L, Hou W Z, Zhang X R. 2017. Timing of the final closure of the Paleo–Asian Ocean in the Alxa terrane: Constraints from geochronology and geochemistry of Late Carboniferous to Permian gabbros and diorites[J]. Lithos, 274–275: 19–30.

Ma Shiwei, Zhou Zhiguang, Liu Changfeng, Li Ruijie, Lai Lin, Zhang Xuebin, Meng Yuanku. 2016. Petrogenesis and tectonic significance of the Late Carboniferous quartz diorite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 43(6): 1932−1946 (in Chinese with English abstract).

Niu Wenchao, Xin Houtian, Duan Lianfeng, Zhang Guozhen, Ren Bangfang, Zhang Yong. 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).

Pearce T H, Gorman B E, Birkett T C. 1977. The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 36(1): 121−132.

Peng R M, Li C S, Zhai Y S, Ripley E M. 2017. Geochronology, petrology and geochemistry of the Beiligaimiao magmatic sulfide deposit in a Paleozoic active continental margin, North China[J]. Ore Geology Reviews, 90: 607−617.

Ran Hao, Zhang Weijie, Liu Zhibo. 2012. Geochemical characteristics and LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of the Late Permian monzogranite in Hanggale, Alax Right Banner, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 31(10): 1565−1575 (in Chinese with English abstract).

Shao Ji'an. 1991. Crustal Evolution of the Middle Section of the Northern Margin of the China–North Korea Plate[M]. Beijing: Peking University Press, 1–135 (in Chinese).

Shi G Z, Wang H, Liu E T, Huang C Y, Zhao J X, Song G Z, Liang C. 2018. Sr–Nd–Pb isotope systematics of the Permian volcanic rocks in the northern margin of the Alxa Block (the Shalazhashan Belt) and comparisons with the nearby regions: Implications for a Permian rift setting?[J]. Journal of Geodynamics, 115: 43−56.

Shi Xingjun, Tong Ying, Wang Tao, Zhang Jianjun, Zhang Zhaochong, Zhang Lei, Guo Lei, Zeng Tao, Geng Jianzhen. 2012. LA–ICP–MS zircon U–Pb age and geochemistry of the Early Permian Halinudeng granite in northern Alxa area, western Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 31(5): 662−670 (in Chinese with English abstract).

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(1): 313–345.

Song Jiajia. 2017. Characteristics of Late Paleozoic Granite around the Ya Gan Fault Zone in Northern Alxa Block[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–82 (in Chinese with English abstract).

Tang K D. 1990. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino–Korean Carbon[J]. Tectonics, 9(2): 249−260.

Taylor S R, McLennan S M. 1985. The Continental Crust: It's Composition and Evolution[M]. London: Blackwell, 57–72.

Thompson R N, Morrison M A. 1988. Asthenospheric and lower−lithospheric mantle contributions to continental extensional magmatism: An example from the British Tertiary province[J]. Chemical Geology, 68: 1−15.

Tian Jian, Teng Xuejian, Xin Houtian, Duan Xiaolong, Cheng Xianyu, Zhang Yong, Ren Bangfang. 2020. Structure, composition and ages of ophiolitic mélanges in the Baiyunshan area, Beishan Orogenic Belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(12): 3741−3756 (in Chinese with English abstract).

Wang Minfang, Xia Qinlin, Xiao Fan, Wang Xinqing, Yang Wusheng, Jiang Chuling. 2012. Rock geochemistry and platinum group elements characteristics of Tudun Cu–Ni sulfide deposit in East Tianshan Mountains of Xinjiang and their metallogenic implications[J]. Mineral Deposits, 31(6): 1195−1208 (in Chinese with English abstract).

Wang Qian. 2010. Discussion on the Diagenesis and Source of Mafic–Ultramafic Intrusions in the Area of Wengeng, Wulatezhongqi, Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–58 (in Chinese with English abstract).

Wang Tao, Zheng Yadong, Liu Shuwen, Li Tianbin, Ma Mingbo. 2002. Mylonitic potassic granitoids from the Yagan metamorphic core complex on Sino–Mongolian border: A mark of transition from contractile to extensional tectonic regime[J]. Acta Petorlogica Sinica, 18(2): 177−186 (in Chinese with English abstract).

Wang Tingyin, Zhang Mingjie, Wang Jinrong, Gao Junping. 1998. The characteristics and tectonic implications of the thrust belt in Eugerwusu, China[J]. Scientia Geologica Sinica, 33(4): 385−394 (in Chinese with English abstract).

Wang Z T, Zhang Y S, Shi L Z, Peng Y, Gui B L. 2020. New zircon U–Pb geochronological and geochemical data reveals the earliest Cretaceous tectonic shift event in the Lanqi Basin, Inner Mongolia, northern China[J]. China Geology, 3: 186−192.

Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end–member composition: Trace element and isotope constrains[J]. Earth and Planetary Science Letters, 104: 381−397.

Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1–464.

Wood D A, Joron J–L, Treuil M, Norry M, Tarney J. 1979. Elemental and Sr isotope variations in basic lavas from Iceland and the surrounding ocean floor[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 70: 319−339.

Wood D A. 1980. The application of a Th−Hf−Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Yrovince[J]. Earth and Planetary Science Letters, 50(1): 1−30.

Xiao Wenjiao, Song Dongfang, Windley B F, Li Jiliang, Han Chunming, Wan Bo, Zhang Jien, Ao Songjian, Zhang Zhiyong. 2019. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Science China Earth Sciences, 49(10): 1512−1545 (in Chinese with English abstract).

Xu Dongzhuo, Zhang Weijie, Zhou Haitao, Sun Qikai. 2014. Characteristics, zircon dating and tectonic significance of the gabbros along the north–central segments of the Alxa Block, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 33(5): 661−671 (in Chinese with English abstract).

Yang Lidong. 2012. Geological characteristics and prospecting potential of Yagan polymetallic deposit in Alashan Zuoqi, Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Science Technology and Economy, (22): 59−60 (in Chinese).

Yu J H, Xu X S, O'Reilly Y S. 2003. Granulite xenoliths from Cenozoic basalts in SE China provide geochemical fingerprints to distinguish lower crust terranes from the North and South China tectonic blocks[J]. Lithos, 67: 77−102.

Zhang C, Wang S B, Yu R A, Ma D Q, Wang M M, Zuo Z F, Tu J R. 2024. Geochemical and detrital zircon U–Pb geochronology of the Qigequan Formation in the Yuejin 2 area: Implications for tectonics and uranium sources[J]. Lithos, 482/483: 107674.

Zhang Chao, Qi Xuexiang, Tang Guanzong, Zhao Yuhao, Ji Fengbao. 2014. Geochemistry and zircon U–Pb dating for the alkaline porphyries and its constraint on the mineralization in Chang'an Cu–Mo–Au ore concentration region, Ailaoshan orogenic belt, western Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(8): 2204−2216.

Zhang Chao, Qi Xuexiang, Wang Shanbo, Yu Rengan, Cheng Yinhang, Zhang Guozhen, Zeng Hui, Li Jianguo, Li Zhidan, Ao Cong. 2020. Geochemical characteristics and genesis of skarns in the Tongchang Cu–Mo deposit, Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 56(5): 19−32 (in Chinese with English abstract).

Zhang Chao, Si Qinghong, Yu Reng'an, Wang Shanbo, Cheng Yinhang, Yu Hang, Feng Ping, Shi Guangshun, Ao Cong, Li Zhidan, Gao Xuefeng. 2023. Analysis of the relationship between sedimentary characteristics and uranium deposits from the Neogene Shizigou Formation in Huatugou area, Northwest Qaidam Basin[J]. Geology in China, 50(5): 1327–1342 (in Chinese with English abstract).

Zhang Jianjun, Wang Tao, Zhang Zhaochong, Tong Ying, Zhang Lei, Shi Xingjun, Guo Lei, Li Shan, Zeng Tao. 2012. Magma mixing origin of Yamatu granite in Nuoergong–Langshan Area, western part of the northern margin of North China Craton: Petrological and geochemical evidences[J]. Geological Review, 58(1): 53−66 (in Chinese with English abstract).

Zhang Lei, Shi Xingjun, Zhang Jianjun, Yang Qidi, Tong Ying, Wang Tao. 2013. LA–ICP–MS zircon U–Pb age and geochemical characteristics of the Taohaotuoxiquan gabbro in northern Alxa, Inner Monglia[J]. Geological Bulletin of China, 32(10): 1536−1547 (in Chinese with English abstract).

Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Song Biao, Liu Jian, Wu Hai. 2010. Magmatic activity times, characteristics and tectonic setting of northern margin of North China Block in late Paleozoic to Early Mesozoic[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 824−842 (in Chinese with English abstract).

Zhang Shanming, He Zhongyin, Zhao Pengbin, Hu Erhong, Wang Yanan, Zhou Yanbo. 2010. Zircon U–Pb chronology and geochemistry of the Wuliji intrusions in the northern Alxa Block: Constraints on the tectonic evolution of the southern Altaids[J]. Earth Science, 44(11): 1842−1874 (in Chinese with English abstract).

Zhang Wen, Wu Tairan, Feng Jicheng, Zheng Rongguo, He Yuankai. 2013. Time constraints for the closing of the Paleo–Asian Ocean in the Northern Alxa Region: Evidence from Wuliji granites[J]. Science China (Earth Sciences), 43(8): 1299−1311 (in Chinese with English abstract).

Zhang Yongmei, Zhang Huafeng, Zhou Zhiguang, Liu Wencan. 2008. Petrogenesis and its tectonic significance of damiao granite, Siziwangqi, Inner Mongolia[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 28(2): 28−38 (in Chinese with English abstract).

Zhang Z W, Wang Y L, Wang C Y, Qian B, Li W Y, Zhang J W, You M X. 2019. Mafic–ultramafic magma activity and copper–nickel sulfide metallogeny during Paleozoic in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province, China[J]. China Geology, 4: 467−477.

Zhang Zongqing. 2003. Age and Geochemistry of Baiyun Obo Ore Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).

Zhao Lei, Wu Tairan, Luo Hongling, He Yuankai. 2008. Petrology, geochemistry and tectonic implications of the Wengeng gabbros in Wulatezhongqi area, Inner Mongolia[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 44(2): 201−211 (in Chinese with English abstract).

Zhao Lei, Wu Tairan, Luo Hongling. 2011. SHRIMP U–Pb dating, geochemistry and tectonic implications of the Beiqigetao gabbrosin Urad Zhongqi area, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 3071−3082 (in Chinese with English abstract).

Zhao Ligang, Wang Wenlong, Gao Xuesheng, Wang Shuqing, Xu Yawen, Hu Xiaojia. 2024. Inspiration from the age of Baoerhantu Group and metamorphic zircon age of middle early middle Triassic in the northern Damao Banner, Inner Mongolia[J]. North China Geology, 47(2): 1−15, 37 (in Chinese with English abstract).

Zhao Zhenhua. 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 17(1): 267−286 (in Chinese with English abstract).

Zheng Rongguo, Wu Tairan, Zhang Wen, Feng Jicheng, Xu Cao, Meng Qingpeng, Zhang Zhaoyu. 2013. Geochronology and geochemistry of the Yagan granite in the northern margin of the Alxa block: Constraints on the tectonic evolution of the southern Altaids[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(8): 2665−2675 (in Chinese with English abstract).

Zheng Yadong, Zhang Qing. 2013. The Yagan metamorphic core complex and extensional detachment fault in Inner Mongolia[J]. Acta Geological Sinica, 67(4): 301−309 (in Chinese with English abstract).

Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Wang Liquan, Zhao Zhidan, Liao Zhongli. 2008. Hotspot–ridge interaction for the evolution of Neo–Tethys: Insights from the Late Jurassic–Early Cretaceous magmatism in southern Tibet[J]. Acta Petrological Sinica, 24(2): 225−237 (in Chinese with English abstract).

Zuo L Y, Pei R F, Wang H F. 2019. Re–Os age report of pyrrhotite in the Dhi Samir lamprophyre–type copper–nickel sulfide[J]. China Geology, 2: 238−239.

附中文参考文献

陈长虹. 2015. 内蒙古自治区亚干地区铜镍钴矿床成因及找矿标志[J]. 科技创新与应用, (36): 167.

程先钰, 张天福, 程银行, 王少轶, 田健. 2021. 鄂尔多斯盆地北缘塔然高勒地区直罗组古沉积环境演化——来自地球化学特征的证据[J]. 华北地质, 44(2): 1−3.

程银行, 张天福, 李艳锋, 李敏, 牛文超, 滕学建, 段连峰, 刘洋, 杜叶龙, 胡晓佳. 2016. 内蒙古东乌旗早二叠世超镁铁岩的发现及其构造意义[J]. 地质学报, 90(1): 115−125.

段明, 郗爱华, 孙国胜, 谢瑜, 司马献章, 魏佳林, 张锋, 冯晓曦, 曾威. 2016. 内蒙古东乌旗地区崇根山岩块超基性岩地球化学特征[J]. 世界地质, 35(3): 653−665.

耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA–MC–ICP–MS 测定[J]. 地质通报, 30(10): 1508−1513.

洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 徐海明, 靳满元. 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 68(3): 219−230.

江思宏, 聂凤军, 刘妍, 王新亮. 2003. 内蒙古小南山铂–铜–镍矿区辉长岩地球化学特征及成因[J]. 地球学报, 24(2): 121−126.

李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪 (LA–MC–ICPMS) 测定锆石 U–Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 29(S1): 600−601.

李俊建. 2006. 内蒙古阿拉善地块区域成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1–193.

李志丹, 朵兴芳, 李效广, 张锋, 张健, 陈军强, 王佳营, 文思博. 2020. 内蒙古达茂旗黄花滩铜镍矿辉长岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄、地球化学和 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 39(4): 491−502.

李志丹, 王佳营, 文思博, 陈军强, 段明, 张锋, 魏佳林, 谢瑜. 2015. 内蒙古乌拉特中旗克布镍矿地质特征及超基性—基性岩

LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄[J]. 矿物学报, 35(S1): 130−131.
黎彤, 饶纪龙. 1963. 中国岩浆岩的平均成分[J]. 地质学报, 43(3): 271−280.
马士委, 周志广, 柳长峰, 李瑞杰, 来林, 张学斌, 孟元库. 2016. 内蒙古西乌旗地区晚石炭世石英闪长岩的岩石成因及构造意义[J]. 中国地质, 43(6): 1932−1946.
牛文超, 辛后田, 段连峰, 赵泽霖, 张国震, 任邦方, 张永. 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.
冉皞, 张维杰, 刘治博. 2012. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒晚二叠世二长花岗岩地球化学特征和 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年[J]. 地质通报, 31(10): 1565−1575.
邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化[M]. 北京: 北京大学出版社, 1–135.
史兴俊, 童英, 王涛, 张建军, 张招崇, 张磊, 郭磊, 曾涛, 耿建珍. 2012. 内蒙古西部阿拉善地区哈里努登花岗岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 31(5): 662−670.
宋嘉佳. 2017. 阿拉善地块北部雅干断裂带周缘晚古生代花岗岩体特征[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1–82.
田健, 滕学建, 辛后田, 段霄龙, 程先钰, 张永, 任邦方. 2020. 北山造山带白云山地区蛇绿混杂岩结构、组成特征与形成时代[J]. 岩石学报, 36(12): 3741−3756.
王敏芳, 夏庆霖, 肖凡, 汪新庆, 杨武胜, 姜楚灵. 2012. 新疆东天山土墩铜镍硫化物矿床岩石地球化学和铂族元素特征及其对成矿的指示意义[J]. 矿床地质, 31(6): 1195−1208.
王倩. 2010. 内蒙古乌拉特中旗温根 A 区镁铁—超镁铁质岩体成因及岩浆源区讨论[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 1–58.
王涛, 郑亚东, 刘树文, 李天斌, 马铭波. 2002. 中蒙边界亚干变质核杂岩糜棱状钾质花岗岩——早中生代收缩与伸展构造体制的转换标志[J]. 岩石学报, 18(2): 177−186.
王廷印, 张铭杰, 王金荣, 高军平. 1998. 恩格尔乌苏冲断带特征及大地构造意义[J]. 地质科学, 33(4): 385−394.
肖文交, 宋东方, Windley B F., 李继亮, 韩春明, 万博, 张继恩, 敖松坚, 张志勇. 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.
徐东卓, 张维杰, 周海涛, 孙启凯. 2014. 内蒙古阿拉善地块中北部地区辉长岩岩体特征、锆石定年及其构造意义[J]. 地质通报, 33(5): 661−671.
杨立东. 2012. 内蒙古阿拉善左旗亚干多金属矿地质特征及找矿前景[J]. 内蒙古科技与经济, (22): 59−60.
张超, 戚学祥, 唐贯宗, 赵宇浩, 吉风宝. 2014. 滇西哀牢山构造带长安铜钼金矿集区碱性斑岩岩石地球化学、锆石 U–Pb 定年及其对成矿作用的约束[J]. 岩石学报, 30(8): 2204−2216.
张超, 戚学祥, 王善博, 俞礽安, 程银行, 张国震, 曾辉, 李建国, 李志丹, 奥琮. 2020. 云南金平铜厂 Cu–Mo 矿床矽卡岩地球化学特征及成因[J]. 地质与勘探, 56(5): 19−32.
张超, 司庆红, 俞礽安, 王善博, 程银行, 于航, 冯平, 石广顺, 奥琮, 李志丹, 高雪峰. 2023. 柴西北缘花土沟地区新近系狮子沟组沉积特征与砂岩型铀矿关系分析[J]. 中国地质, 50(5): 1327–1342.
张建军, 王涛, 张招崇, 童英, 张磊, 史兴俊, 郭磊, 李舢, 曾涛. 2012. 华北地块北缘西段巴音诺尔公—狼山地区牙马图岩体的岩浆混合成因——岩相学和元素地球化学证据[J]. 地质论评, 58(1): 53−66.
张磊, 史兴俊, 张建军, 杨奇荻, 童英, 王涛. 2013. 内蒙古阿拉善北部陶豪托西圈辉长岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 32(10): 1536−1547.
张拴宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 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.
张善明, 贺中银, 赵鹏彬, 胡二红, 王亚楠, 周彦波. 2019. 阿拉善地块北缘乌力吉岩体锆石 U–Pb 年代学、地球化学及其对区域构造演化的制约[J]. 地球科学, 44(11): 1842−1874.
张文, 吴泰然, 冯继承, 郑荣国, 贺元凯. 2013. 阿拉善地块北缘古大洋闭合的时间制约: 来自乌力吉花岗岩体的证据[J]. 中国科学: 地球科学, 43(8): 1299−1311.
张宗清. 2003. 白云鄂博矿床年龄和地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
章永梅, 张华锋, 周志广, 刘文灿. 2008. 内蒙古四子王旗大庙花岗岩体的成因与构造意义[J]. 矿物岩石, 28(2): 28−38.
赵磊, 吴泰然, 罗红玲, 贺元凯. 2008. 内蒙古乌拉特中旗温更辉长岩类的岩石学、地球化学特征及其构造意义[J]. 北京大学学报 (自然科学版), 44(2): 201−211.
赵磊, 吴泰然, 罗红玲. 2011. 内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 27(10): 3071−3082.
赵利刚, 王文龙, 高学生, 王树庆, 徐雅雯, 胡晓佳. 2024. 内蒙古达茂旗北部包尔汉图群时代及中早—中三叠世变质锆石年龄的启示[J]. 华北地质, 47(2): 1−15, 37.
赵振华. 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J]. 地学前缘, 17(1): 267−286.
郑荣国, 吴泰然, 张文, 冯继承, 徐操, 孟庆鹏, 张昭昱. 2013. 阿拉善地块北缘雅干花岗岩体地球化学、地质年代学及其对区域构造演化制约[J]. 岩石学报, 29(8): 2665−2675.
郑亚东, 张青. 1993. 内蒙古亚干变质核杂岩与伸展拆离断层[J]. 地质学报, 67(4): 301−309.
朱弟成, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 廖忠礼. 2008. 新特提斯演化的热点与洋脊相互作用: 西藏南部晚侏罗世—早白垩世岩浆作用推论[J]. 岩石学报, 24(2): 225−237.