

辽东宽甸钴矿勘查区变基性岩地球化学特征和年代学研究

廉涛¹, 孙莉¹, 王舫², 刘福来², 邓文婷¹

(1. 辽宁省第七地质大队有限责任公司, 辽宁 丹东 118003; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 以辽东宽甸钴矿勘查区南辽河群里尔峪组变基性岩为研究对象, 通过全岩地球化学组成和锆石年代学研究, 讨论了里尔峪组变基性岩形成的构造背景以及钴的来源。地球化学分析结果显示, 钴矿中变基性岩为正斜长角闪岩, 具有一致的稀土元素配分模式, 弱 Eu 负异常, 显示 E-MORB 的地球化学特征。详细的矿物化学分析和地质温压计算结果表明, 含辉石斜长角闪岩(ZK2-1)记录了峰期高角闪岩相变质温压条件, $p = 0.82 \sim 1.00$ GPa 和 $t = 712 \sim 751^\circ\text{C}$; (含辉石)斜长角闪岩(ZK1-1 和 ZK3-1)记录了峰后退变质阶段的温压条件, 分别为 $p = 0.42 \sim 0.81$ GPa 和 $t = 688 \sim 759^\circ\text{C}$, $p = 0.59 \sim 0.85$ GPa 和 $t = 703 \sim 739^\circ\text{C}$ 。锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果表明, 变基性岩中变质锆石记录的年龄为 $1.857 \sim 1.850$ Ma。综合宽甸地区变基性岩地球化学和年代学结果, 推测其原岩为古元古代中期拉斑玄武岩, 形成于伸展环境, 并且在其形成过程中岩浆经历了显著的地壳物质混染, 暗示古元古代中期打开的洋盆规模可能有限。通过与南、北辽河群变基性岩全岩地球化学特征对比研究, 认为宽甸地区变基性岩不是钴矿化的主要成矿物质来源, 有关钴矿化的物质来源仍需进一步研究。

关键词: 变基性岩; 宽甸; 里尔峪组; 古元古代; 变质事件; 钴矿化

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1281-21

Whole-rock geochemistry and geochronology of meta-basic rocks from the cobalt exploration area in Kuandian, eastern Liaoning Province

LIAN Tao¹, SUN Li¹, WANG Fang², LIU Fu-lai² and DENG Wen-ting¹

(1. Liaoning Province Seventh Geological Brigade Co., Ltd., Dandong 118003, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: In this study, the whole-rock geochemistry and zircon U-Pb ages are reported for the meta-basic rocks of the Lieryu Formation of the South Liaohe Group from the cobalt exploration area in Kuandian. These data provide a significant insight into the tectonic background, as well as the source of cobalt. Geochemical features of the meta-basic rocks in boreholes show that they are orthorhombic amphibolite, and have similar rare-earth elements (REEs) patterns, with slightly negative Eu anomalies. REEs and trace elements compositions have affinity to those of E-MORB. Based on the mineral compositional analyses and p - t estimates using conventional geothermobarometers, the clinopyroxene-bearing amphibolite (ZK2-1) records p - t conditions of $p = 0.82 \sim 1.00$ GPa and $t = 712 \sim 751^\circ\text{C}$, which probably constrained the peak high amphibolites-facies stage. The metamorphic p - t conditions of (clinopyroxene-bearing) amphibolite (ZK1-1 and ZK3-1) are $p = 0.42 \sim 0.81$ GPa, $t = 688 \sim 759^\circ\text{C}$ and $p = 0.59 \sim 0.85$ GPa,

收稿日期: 2024-03-29; 接受日期: 2024-08-25; 编辑: 尹淑苹; 英文审校: 王 丹

基金项目: 国家自然科学基金项目(92062214); 国家重点研发计划(2022YFC2903502); 中国地质调查项目(DD20242528); 中国地质科学院基本业务费项目(JB2304)

作者简介: 廉涛(1970-), 男, 正高级工程师, 地质找矿与勘探专业, E-mail: liantao999@126.com; 通讯作者: 王舫(1981-), 女, 博士, 研究员, 岩石学专业, E-mail: wangfang_mr@163.com。

$t=703\sim739^{\circ}\text{C}$, respectively, which represent the conditions of the retrograde stage. The metamorphic zircon from the meta-basic rocks yield the SHRIMP U-Pb ages of $1\,857\sim1\,850\text{ Ma}$. The integrated study of geochemistry and zircon U-Pb dating reveals that their protoliths of the meta-basic rocks are mid-Paleoproterozoic tholeiitic basalt and formed in an extended tectonic environment. Their protoliths underwent significant crustal assimilation imply that the scale of the mid-Paleoproterozoic oceanic basin may be limited. By comparing the geochemical characteristics of meta-basic rocks in the North and South Liaohe groups, it is believed that meta-basic rocks in the Kuandian area are not the main source of cobalt mineralization. The material sources of cobalt mineralization still needs further research.

Key words: meta-basic rocks; Kuandian area; Li'eryu Group; Paleoproterozoic; metamorphic events; cobalt mineralization

Fund support: National Natural Science Foundation of China (92062214); National Key Research and Development Program of China (2022YFC2903502); China Geological Survey Bureau Project (DD20242528); Basic Scientific Research Foundations of the Chinese Academy of Geological Sciences (JB2304)

钴是我国紧缺的战略性矿产资源,因其具有耐高温、耐腐蚀以及良好的延展性等特点,被广泛应用于航天航空、新能源等领域。华北克拉通是我国出露面积最大的克拉通,东部的胶-辽-吉构造带内构造、岩浆活动十分强烈,记录了漫长而复杂的演化历史,具有优越的成矿地质条件,各种矿产资源分布广泛。辽-吉构造带内赋存多种类型钴镍矿床,例如吉林大横路和杉松岗的铜钴矿床、辽宁周家和宽甸铁钴矿、辽宁小女寨镍钴矿等(张勇等, 2023)。

辽河群各组地层均有不同矿产分布,如里尔峪组分布着规模大小不等的铁矿和硼矿。前人通过化探异常和矿产调查在宽甸地区发现钴的矿化,目前还处于调查阶段,其形成的构造背景、钴富集过程和富集机制等问题,尚不清楚。详细研究里尔峪组的原岩属性、形成的构造背景以及演化过程对揭示不同类型矿产成因具有重要的科学意义。然而,有关里尔峪组的原岩属性,目前仍然存在着争论。有研究者认为里尔峪组主体岩性为一套火山岩,其原岩是一套由变基性岩和变流纹岩组成的双峰式火山岩(张秋生等, 1988; Sun *et al.*, 1993; 李守义, 1994; 孙敏等, 1996);有研究者认为里尔峪组的岩性为一套变质杂岩,包括变质火山岩和变沉积岩(刘福来等, 2015)。里尔峪组以及整个辽河群形成的构造背景以及演化过程,同样也存在着较大的争议。目前主要存在着陆内裂谷开启-闭合模式(张秋生等, 1988; 李三忠等, 2003; Luo *et al.*, 2004, 2008; Li *et al.*, 2005; Li and Zhao, 2007)、弧-陆碰撞模式(白瑾, 1993; Faure *et al.*, 2004; Lu *et al.*, 2006)和陆内裂谷打开-初始洋形成-洋壳俯冲-碰撞造山模式(Zhao *et al.*, 2012)。其中,支持陆内裂谷开启

-闭合模式,反对弧-陆碰撞模式的重要证据之一就是双峰式火山岩的存在。此外,有研究者提出,里尔峪组形成于由被动大陆边缘向活动大陆边缘转换的重要时期(Xu *et al.*, 2020)。为此,深入研究里尔峪组变基性岩的原岩属性、形成环境和构造演化过程,是解决以上争论的关键。本文报道了宽甸地区钻孔中变基性岩的 SHRIMP U-Pb 年龄、岩石地球化学结果,探讨变基性岩的变质时代、岩石类型和形成环境以及钴资源的可能来源,对认识宽甸钴矿的成矿过程和找矿勘查提供依据。

1 地质背景与样品描述

辽-吉构造带位于华北克拉通东部陆块,其北侧为龙岗地块,南侧为狼林地块(张秋生等, 1988),构造带内广泛分布着古元古代变质火山-沉积岩系和古元古代花岗质岩石等(图 1a)。古元古代变质火山-沉积岩系包括辽东南地区南部的南辽河群和北部的北辽河群,吉南地区南部的集安群和北部的老岭群(局部为光华群)。它们的原岩集中形成于 $2.15\sim1.95\text{ Ga}$ 之间,之后经历了古元古代构造事件的改造,峰期麻粒岩相变质时代为 $1.95\sim1.90\text{ Ga}$ 左右;在构造折返中-低压麻粒岩相退变质阶段 $1.86\sim1.84\text{ Ga}$, 发生区域性的深熔作用(刘福来等, 2015)。

宽甸地区位于辽-吉构造带内,区内出露地层以南辽河群为主,包括里尔峪组、高家峪组和大石桥组(图 1b)。里尔峪组一段主要分布在主向斜核部,其余区域也有零散分布,岩性主要为中细粒电气石斜长(微斜)石变(浅)粒岩、电气石黑云母变粒岩、磁

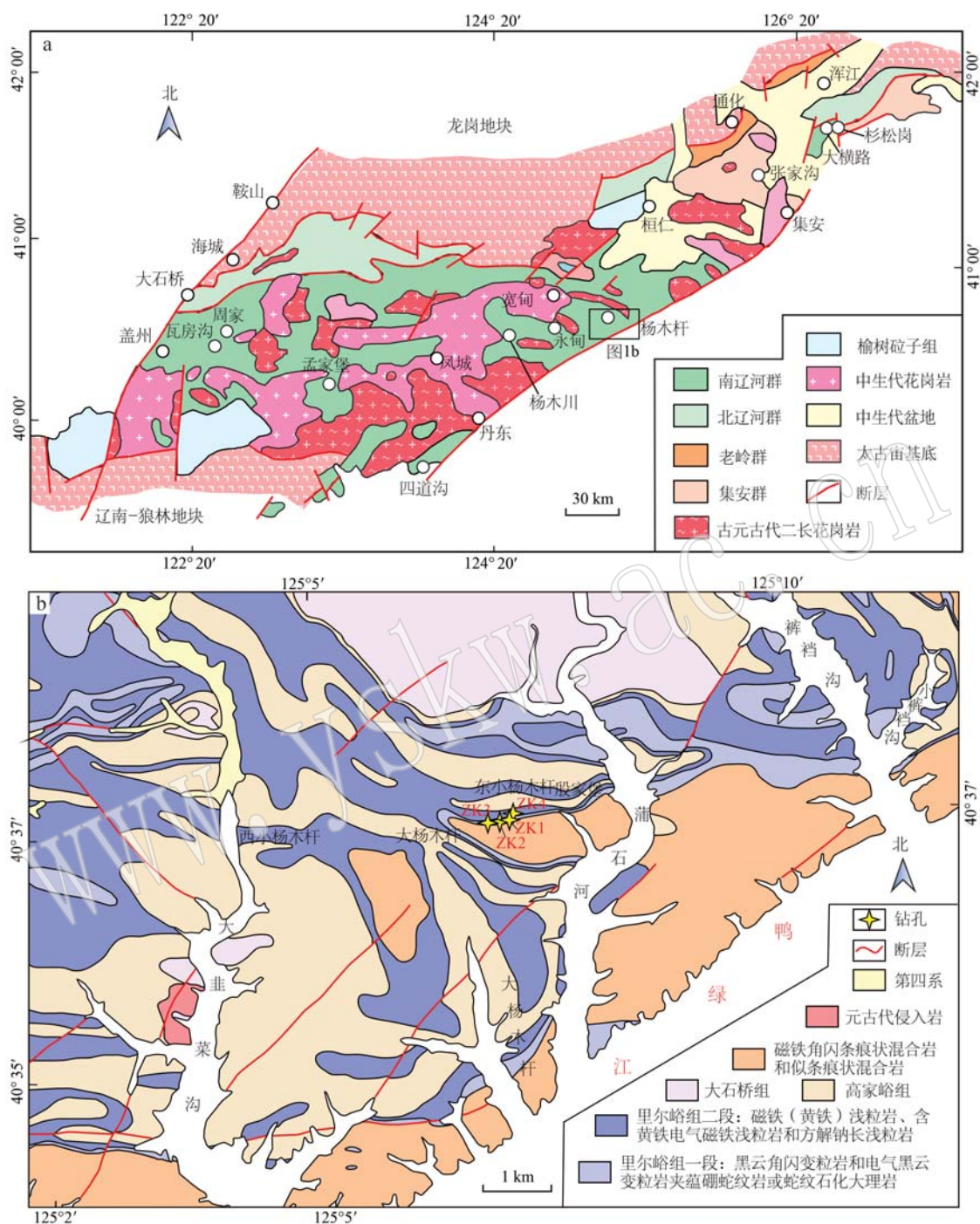


图1 辽-吉构造带区域地质简图(a, 据 Li *et al.*, 2005)和宽甸地区区域地质简图及钻孔位置图(b, 辽宁省第七地质大队有限责任公司, 2023)^①

Fig. 1 Regional geological map of the Liao-Ji belt (a, modified after Li *et al.*, 2005) and the Kuandian area (b, modified after Liaoning Province Seventh Geological Brigade Co., Ltd., 2023)^① which showing the distribution of Liaohe Group and drilling locations

① 辽宁省第七地质大队有限责任公司. 2023. 1:50 000 辽宁省宽甸县殷家堡子一带区域地质图.

铁矿电气石变粒岩、黑云母角闪石变(浅)粒岩和阳起石角闪石变粒岩,中下部夹蛇纹岩、蛇纹石化白云质大理岩和薄层状中细粒斜长角闪岩,与底部条痕状混合岩呈混合交代接触,混合岩中有斜长角闪岩混合残留体。该段赋存硼矿、与硼矿伴生的铁矿及大理石矿、水镁石矿等。里尔峪组二段零散分布,走向与区内地层一致,以南东向为主,主要岩性为细粒黄铁矿浅粒岩、含黄铁矿电气石磁铁矿浅粒岩、磁铁矿浅粒岩(具混合岩化)和方解石钠长石浅粒岩、夹磁铁矿黑云母片麻岩、黑云母磁铁矿浅粒岩、电气石微斜长石浅粒岩和混合质阳起石电气石黑云母斜长石变粒岩。该段赋存铁矿、铜矿及重晶石矿。研究区内高家峪组地层岩性主要包括中细粒石墨透闪石透辉石变粒岩,夹石墨斜长石变(浅)粒岩,偶见斜长角闪岩;石墨石榴石夕线石黑云母斜长(微斜)片麻岩(片岩)和石墨变粒岩,夹石墨透闪石透辉石变粒岩。大石桥组主要岩性为一套大理岩。

本研究的样品为宽甸满族自治县东部红石镇钻孔岩心,钻孔分布见图1b所示。样品为4个钻孔中的变基性岩,包括钻孔ZK1的2个样品ZK1-1和ZK1-2,钻孔ZK2、ZK3和ZK4中的3件样品ZK2-1、ZK3-1和ZK4-1,其中样品ZK4-1中含大量黄铁矿和

磁铁矿。含辉石斜长角闪岩(ZK1-1、ZK1-2和ZK2-1;图2a~2c),主要矿物组合为斜长石(40%~50%,体积分数)和角闪石(40%~50%),还含有少量辉石(~5%)和黄铁矿(~5%);样品ZK1-2和ZK2-1中斜长石发生蚀变,ZK2-1中可见少量黑云母和方解石细脉。斜长角闪岩(ZK3-1;图2d),主要矿物组合为斜长石(40%~50%)和角闪石(40%~50%),还含有少量黄铁矿(1%~3%),偶见钛铁矿。含矿斜长角闪岩(ZK4-1;图2e、2f),主要矿物包括斜长石(20%~30%)、角闪石(20%~30%)、磁铁矿(15%~25%)、黄铁矿(15%~25%)和黑云母(10%~15%)。根据样品中黄铁矿的形态特征和矿物组合,可以分为半自形-他形粗粒黄铁矿、半自形-自形细粒黄铁矿和网脉状黄铁矿(图2f)。半自形-他形粗粒和细粒黄铁矿与角闪石、斜长石和磁铁矿共生,形成于变质阶段;网脉状黄铁矿,在基质中呈细脉状分布于其他矿物粒间或裂隙中,形成于热液阶段。

2 分析方法

对采自辽东宽甸地区钻孔中变基性岩进行了全岩主微量元素分析、电子探针矿物化学成分分析和

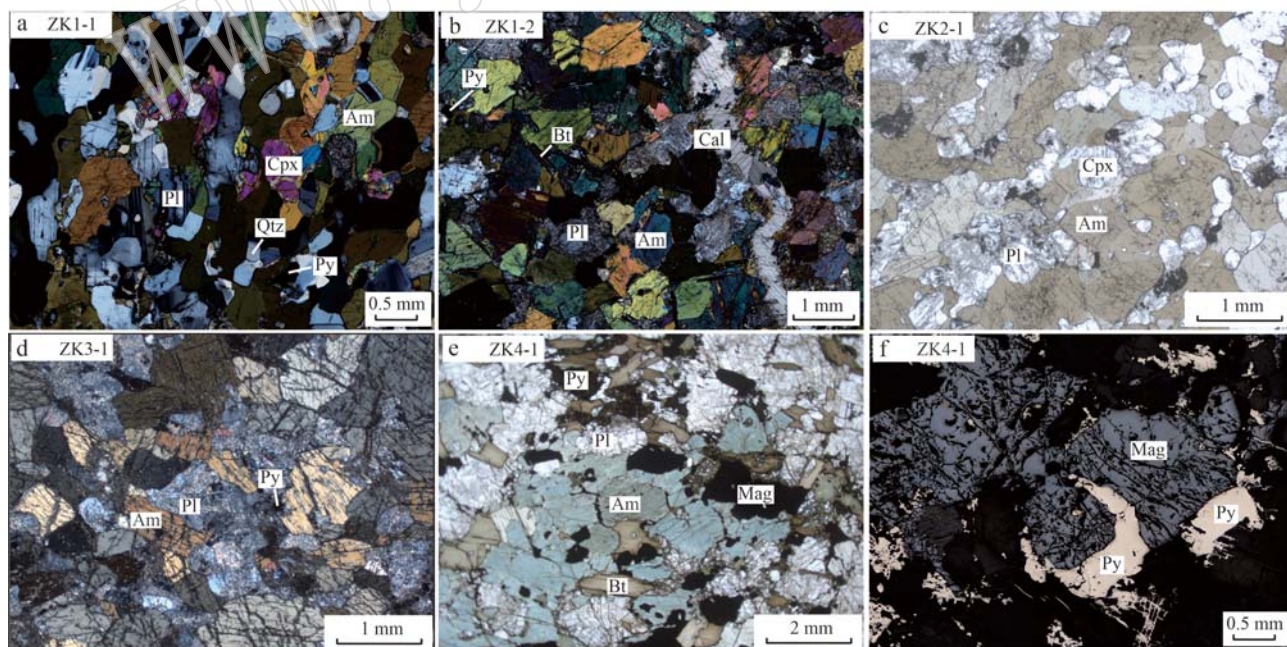


图2 宽甸地区变基性岩显微结构照片(a、b、d为正交偏光照片;c和e为单偏光照片;f为反射光照片)

Fig. 2 Microtexture photographs of meta-basic rock in the Kuandian area (a, b, d = crossed-polarized light, CPL; c, e = plane-polarized light, PPL; f = reflected light)

Am—角闪石; Bt—黑云母; Cal—方解石; Cpx—单斜辉石; Mag—磁铁矿; Pl—斜长石; Py—黄铁矿; Qtz—石英

Am—amphibolite; Bt—biotite; Cal—calcite; Cpx—clinopyroxene; Mag—magnetite; Pl—plagioclase; Py—pyrite; Qtz—quartz

锆石 SHRIMP U-Pb 年代学分析。样品前加工处理包括薄片的磨制、全岩粉末(200目)样品的制备以及单矿物的分选工作均在北京前寒武科技有限公司完成。

全岩主量和微量元素化学成分测试在澳实分析检测(广州)有限公司完成。全岩主量元素分析将粉末样品与硼酸锂-硝酸锂混合熔融,采用熔片-X射线荧光光谱法(XRF)测试,换算成氧化物表示,其中FeO含量通过酸消解-重铬酸钾滴定方法测定分析,主量元素分析相对误差低于5%。微量元素分析将粉末样品消解后,采用美国Perkin Elmer公司生产的Elan9000型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)定量分析,分析误差低于5%。

电子探针成分分析在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,利用的仪器是配备有4道/5道波谱仪的JEOL JXA-8230/JXA-iHP200F电子探针。详细的电子探针分析流程见Yang等(2022)。测试工作条件为:加速电压15 kV,加速电流20 nA,束斑直径5 μm 。使用天然矿物或合成氧化物作为标样。所有测试数据均进行了ZAF校正处理。

分选出变基性岩中锆石与Plešovice标样(Sláma *et al.*, 2008; $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为337.1 $\pm$ 0.4 Ma)一起

粘贴、抛光,制成SHRIMP定年的锆石靶。制靶完成后进行透反射光和阴极发光照相,观察并分析锆石表面形态及内部结构。锆石U-Pb定年在北京离子探针中心SHRIMP II上完成。分析流程参考Williams(1998),数据处理采用SQUID和ISOPLLOT程序(Ludwig, 2001)。实验分析中一次流 O^{2-} 强度为3~5 nA,束斑大小约为25 μm 。每个分析点采用5组扫描,每分析4个未知样品数据,分析1次Plešovice标样。标样M257($\text{U}=840\times 10^{-6}$, Nasdala *et al.*, 2008)和Plešovice($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为337.13 $\pm$ 0.37 Ma, Sláma *et al.*, 2008)分别用于锆石的U含量和年龄的校正。使用实测 ^{204}Pb 含量进行普通铅校正。同位素比值和单点年龄误差为1 σ 。

3 实验结果

3.1 全岩主微量元素

对宽甸地区采集的5件钻孔岩心样品进行全岩地球化学分析,结果见表1和表2中,样品ZK4-1的 SiO_2 含量较低为31.50%,样品中含大量黄铁矿和磁铁矿,全岩 Fe_2O_3 含量达45.28%。4件斜长角闪岩样品中,除了样品ZK3-1的烧失量较高,其余3件样品 SiO_2 含量为48.20%~49.32%,属基性岩; Al_2O_3

表1 宽甸地区变基性岩主量元素含量

$w_B/\%$

Table 1 Major elements data of meta-basic rocks in Kuandian area

样品	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	FeO	K ₂ O+Na ₂ O	$\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$
ZK1-1	49.32	0.92	15.42	11.55	0.19	6.65	11.70	2.83	0.69	0.07	0.48	9.05	3.52	1.56
ZK1-2	48.20	0.86	13.98	11.30	0.18	8.55	12.60	1.87	0.68	0.06	0.97	8.96	2.55	1.19
ZK2-1	48.58	0.86	14.34	11.20	0.18	7.96	12.10	2.06	0.86	0.07	1.28	9.03	2.92	1.27
ZK3-1	43.19	0.69	11.89	9.20	0.17	7.04	11.65	1.36	1.21	0.04	12.4	6.31	2.57	1.18
ZK4-1	31.50	0.23	7.80	45.28	0.04	4.27	1.41	2.38	1.37	0.07	4.73	15.90	3.75	9.54

表2 宽甸地区变基性岩微量元素含量

$w_B/10^{-6}$

Table 2 Trace elements data of meta-basic rocks in Kuandian area

样品	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Pb	Zr	Hf	Nb	Sn	Ba	La
ZK1-1	5.70	0.74	36.8	280	40.0	43.9	22.3	30.5	77.0	18.4	11.7	218	17.5	2.90	65.0	1.90	3.50	1.00	98.9	6.90
ZK1-2	9.30	0.44	38.1	296	600	45.3	71.9	40.1	79.0	16.1	21.8	213	16.0	2.80	53.0	1.60	2.90	1.00	98.6	6.10
ZK2-1	14.4	0.57	41.3	314	410	47.9	52.9	40.1	78.0	16.2	39.2	246	16.7	3.60	60.0	1.70	3.20	0.90	110	6.60
ZK3-1	47.6	0.62	30.9	225	340	36.8	44.2	29.7	90.0	14.8	76.4	390	12.7	8.50	43.0	1.30	2.30	1.00	267	4.30
ZK4-1	2.90	1.26	9.50	60.0	50.0	88.8	231	314	11.0	13.2	112	21.1	10.9	1.90	111	2.90	6.00	9.00	207	45.80
样品	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Ta	Tl	Th	U	ΣREE	Eu/Eu^*	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$
ZK1-1	16.4	2.29	10.2	2.66	0.90	3.04	0.51	3.10	0.63	1.80	0.26	1.71	0.25	0.20	0.08	1.07	0.37	50.65	0.97	2.89
ZK1-2	15.2	2.02	9.30	2.34	0.79	2.89	0.46	2.90	0.58	1.63	0.23	1.39	0.21	0.20	0.13	0.69	0.29	46.04	0.93	3.15
ZK2-1	15.6	2.19	9.90	2.68	0.92	2.99	0.51	3.14	0.62	1.86	0.27	1.58	0.25	0.20	0.19	0.93	0.27	49.11	0.99	3.00
ZK3-1	10.8	1.53	7.30	2.03	0.65	2.16	0.35	2.26	0.47	1.43	0.19	1.24	0.18	0.10	0.43	0.74	0.18	34.89	0.95	2.49
ZK4-1	78.0	7.54	25.1	3.47	0.68	2.38	0.34	1.85	0.38	1.06	0.16	1.04	0.16	0.40	0.19	8.27	0.92	167.96	0.72	31.59

含量为 13.98% ~ 15.42%; FeO 含量为 8.96% ~ 9.05%; $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量为 11.20% ~ 11.55%; MgO 含量变化范围为 6.65% ~ 8.55%; CaO 含量为 11.70% ~ 12.60%; Na_2O 含量范围为 1.87% ~ 2.83%; K_2O 含量为 0.68% ~ 0.86%; $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 的变化范围为 1.19 ~ 1.56; $\text{FeO}^{\text{T}}-\text{CaO}-\text{MgO}$ 图解中斜长角闪岩均落入正斜长角闪岩范围内(图 4a); 在 TAS 图解中其原岩落入玄武岩范围内(图 4b)。

稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图如图 3a 和 3b 所示, 图中明显可以看出含矿斜长角闪岩(ZK4-1)的稀土微量元素与斜长角闪岩样品不同, 明显富集轻稀土元素而亏损重稀土元素[$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 31.59$], 具有 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.72$); Co、Ni、Cu 以及 Rb、Zr、Ce、Th、U 和 Ta 含量相对较高, 而 V、Cr、Zn、Pb、Sr 和 Ti 含量低。4 件斜长角闪岩样品中, ZK3-1 稀土元素总量

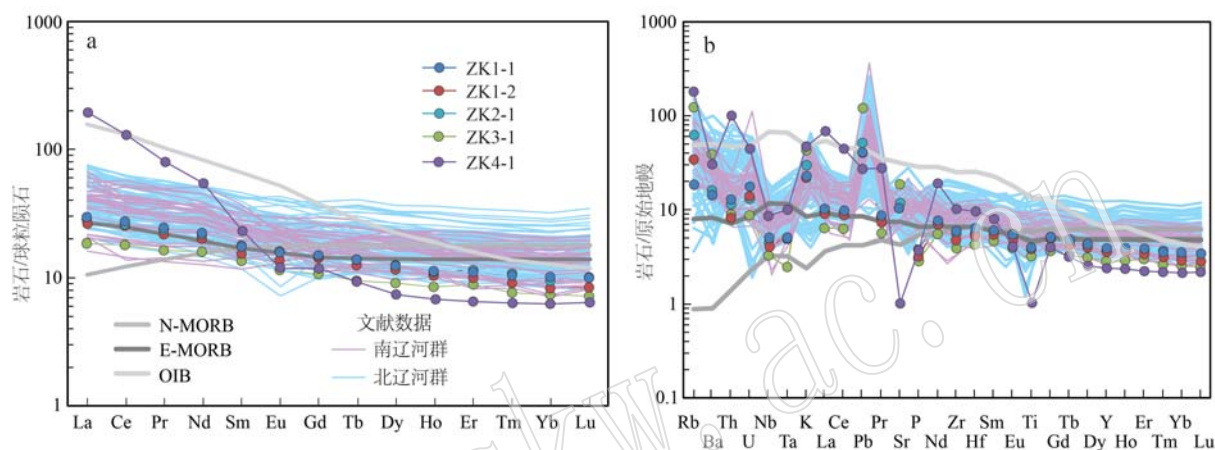


图 3 宽甸地区变基性岩稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(球粒陨石、原始地幔、N-MORB、E-MORB 和 OIB 数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns spidergram of meta-basic rocks from the Kuandian area (b) (data of chondrite, primitive mantle, N-MORB, E-MORB and OIB are after Sun and McDonough, 1989)

文献数据引自 Meng *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016; 许王等, 2017; 高铂森等, 2017; Xu *et al.*, 2018a, 2018b; Liu *et al.*, 2021

data from references after Meng *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016; Xu Wang *et al.*, 2017; Gao Bosen *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2018a, 2018b and Liu *et al.*, 2021

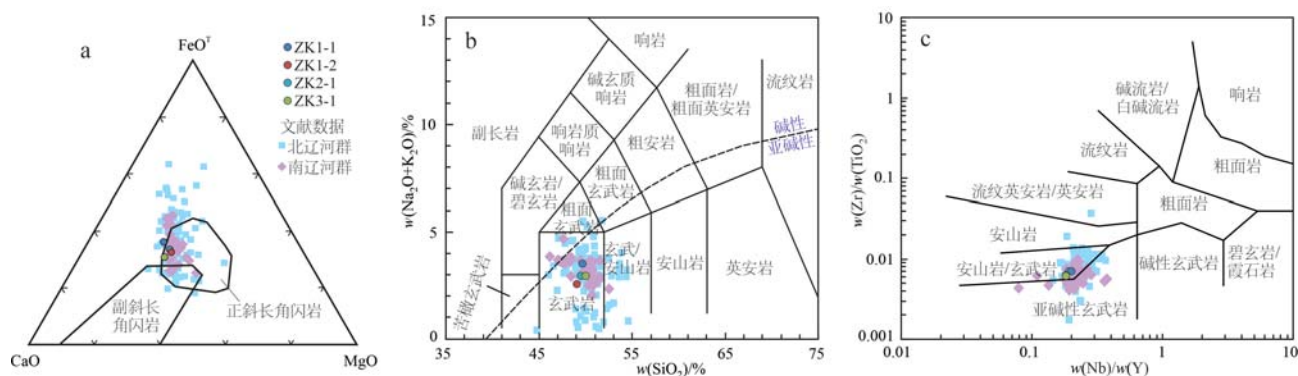


图 4 宽甸地区变基性岩地球化学图解

Fig. 4 Geochemical diagram of meta-basic rocks from the Kuandian area

a— $\text{FeO}^{\text{T}}-\text{CaO}-\text{MgO}$ 图解(底图引自 Walker *et al.*, 1960); b—TAS 图解(底图引自 Le *et al.*, 1986); c— $\text{Zr}/\text{TiO}_2-\text{Nb}/\text{Y}$ 图解(底图引自 Winchester and Floyd, 1976); 参考文献数据同图 3

a— $\text{FeO}^{\text{T}}-\text{CaO}-\text{MgO}$ diagram (after Walker *et al.*, 1960); b—TAS diagram (after Le *et al.*, 1986); c— $\text{Zr}/\text{TiO}_2-\text{Nb}/\text{Y}$ diagram (after Winchester and Floyd, 1976); the reference data in Fig. 4 are the same as those in Fig. 3

偏低,其他3件样品稀土元素具有一致性,稀土元素总量(ΣREE)变化范围为 $46.04 \times 10^{-6} \sim 50.65 \times 10^{-6}$ 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化范围为2.89~3.15,稀土元素配分曲线右倾,轻稀土元素相对富集,弱Eu负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.93 \sim 0.99$);Th/Nb值比较低,为0.24~0.31,La/Yb、Y/Nb、La/Nb和Ce/Pb值比较高,分别为4.04~4.39、5.00~5.52、1.97~2.10和4.33~5.66;在稀土元素配分图解中显示E-MORB的地球化学特征(图3a)。虽然岩石受到一定程度的变质作用的改造,但是其高场强元素(HFSE,例如REE、Y、Th、U、Zr、Hf、Ti、Nb和Ta)通常不会发生显著的迁移(Pearce and Cann, 1973),利用Zr/TiO₂-Nb/Y图解恢复其原岩,落入安山岩/玄武岩范围内(图4c)。

3.2 矿物化学成分

角闪石: ZK1-1中Si含量为6.565~6.800, X_{Mg} 值[$X_{\text{Mg}} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$]范围为0.542~0.578, $(\text{Na} + \text{K})_A$ 范围为0.415~0.583(表3); ZK1-2中Si含量为6.617~7.009, X_{Mg} 值为0.573~0.623, $(\text{Na} + \text{K})_A$ 范围为0.350~0.541; ZK2-1中Si含量为6.513~6.652, X_{Mg} 值为0.492~0.539, $(\text{Na} + \text{K})_A$ 范围为0.420~0.516; ZK3-1中Si含量为6.669~6.819, X_{Mg} 值为0.583~0.621, $(\text{Na} + \text{K})_A$ 范围为0.297~0.488。4件变基性岩样品中角闪石主要为钙角闪石($\text{Ca}_B \geq 1.50$),在角闪石分类图解中(Leake *et al.*, 1997; 图5a和5b),当 $\text{Ca}_B \geq 1.50$, Ti<0.50, $(\text{Na} + \text{K})_A \geq 0.50$ 时属于浅闪石,当 $\text{Ca}_B \geq 1.50$, $(\text{Na} + \text{K})_A < 0.50$, $\text{Ca}_A < 0.50$ 时属于镁角闪石。

斜长石: 基质中斜长石的电子探针成分见图5c和表4,5件样品中ZK3-1的CaO含量最高(9.94%~13.66%), Na₂O含量最低(3.79%~5.74%),对应的An和Ab值分别为49~66和33~51;样品ZK2-1的CaO含量和Na₂O含量集中于9.89%~10.77%和5.41%~5.95%,对应的An和Ab值分别为48~51和48~52;样品ZK1-1的CaO含量和Na₂O含量变化范围相对较大为7.71%~12.15%和4.64%~7.00%,对应的An和Ab值分别为37~59和41~62;样品ZK1-2的CaO含量和Na₂O含量分别为6.15%~8.14%和6.94%~8.05%,对应的An和Ab值分别为30~39和60~69。

3.3 锆石 U-Pb 年代学结果

3件斜长角闪岩(ZK1-1、ZK1-2和ZK3-1)和1件含矿斜长角闪岩(ZK4-1)样品中锆石被分选出来,

进行SHRIMP U-Pb定年。4件样品中锆石多呈长柱状、短柱状或浑圆状,部分锆石为半自形棱柱状或者破碎呈不规则状(图6)。颗粒相对完整的锆石颗粒长轴以100~150 μm为主。阴极发光图像显示,大部分锆石呈均匀灰白色或者灰黑色,少部分锆石具有核-边结构(图6d)或者保存清晰的振荡环带(图6b)。

ZK1-1: 对该样品中16颗锆石进行了SHRIMP U-Pb定年(表5),16个测试点中除了4个测试点(表5中编号为1、2、5和14)明显不谐和,其余12个测试点均分布在谐和线附近(图7a)。所有谐和测试点均分析在阴极发光呈灰白色或灰黑色的均匀锆石微区,它们的Th含量为 $68 \times 10^{-6} \sim 266 \times 10^{-6}$, U含量较高为 $258 \times 10^{-6} \sim 3399 \times 10^{-6}$, Th/U值较低为0.04~0.09(除ZK1-1-13为0.13), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于1857.0±6.2 Ma~1842.2±4.4 Ma之间,加权平均年龄为1849.8±2.6 Ma(MSWD=0.70, n=12)。

ZK1-2: 对该样品中16颗锆石进行定年,16个测试点中除了点ZK1-2-12外,其余15个测试点均位于谐和线附近(图7b)。它们的Th含量为 $66 \times 10^{-6} \sim 431 \times 10^{-6}$, U含量较高为 $909 \times 10^{-6} \sim 2484 \times 10^{-6}$, Th/U值较低为0.07~0.18, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于1849.2±4.1 Ma~1859.3±4.8 Ma之间(表5),加权平均年龄为1853.5±2.6 Ma(MSWD=0.54, n=15)。

ZK3-1: 对该样品中16颗锆石进行了年代学测试(表5),16个测试点中除了ZK3-1-3明显不谐和,其余15个测试点均分布在谐和线附近(图7c)。所有谐和测试点均分析在阴极发光呈灰白色或灰黑色的均匀锆石微区,它们的Th含量为 $52 \times 10^{-6} \sim 469 \times 10^{-6}$,与样品ZK1-1和ZK1-2相比, U含量较低,为 $168 \times 10^{-6} \sim 992 \times 10^{-6}$, Th/U值较高,为0.20~0.55, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化范围为1842.4±7.2 Ma~1862±16 Ma之间,加权平均年龄为1853.6±4.3 Ma(MSWD=0.57, n=15)。

ZK4-1: 对该样品中20颗锆石进行年代学测试(表5),除点号为ZK4-1-04、ZK4-1-08、ZK4-1-09、ZK4-1-11、ZK4-1-15、ZK4-1-16和ZK4-1-17的7个测试点,其余13个测试点Th含量为 $44 \times 10^{-6} \sim 221 \times 10^{-6}$, U含量较低为 $356 \times 10^{-6} \sim 897 \times 10^{-6}$, Th/U值较低为0.12~0.27, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄变化于1847.9±6.5 Ma~1868±10 Ma之间,加权平均年龄为1857.4±3.9 Ma(MSWD=0.70, n=13)。另外,测试点ZK4-1-04和ZK4-1-09分析在锆石核部(图6d),可能为继承核部。

表 3 宽甸地区变基性岩中角闪石电子探针成分

Table 3 Representative mineral EPMA composition of amphibole from meta-basic rocks in the Kuandian area

点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	X _{Mg}	(Na+K) _A
ZK1-1																								
1	44.77	1.63	10.16	0.02	16.36	0.29	10.98	12.19	1.44	1.07	98.90	6.609	0.181	1.768	0.002	0.114	1.906	0.036	2.416	1.928	0.412	0.202	0.559	0.574
2	44.84	1.62	10.56	0.06	16.91	0.27	10.81	11.84	1.47	1.08	99.44	6.576	0.179	1.826	0.007	0.202	1.872	0.034	2.363	1.861	0.418	0.202	0.558	0.515
3	44.92	1.70	10.26	0.04	16.88	0.20	10.62	11.83	1.50	1.09	99.03	6.623	0.189	1.783	0.005	0.139	1.943	0.025	2.334	1.869	0.429	0.205	0.546	0.528
4	45.21	1.64	9.56	0.00	16.81	0.28	11.18	11.66	1.37	0.98	98.70	6.664	0.182	1.661	0.000	0.247	1.826	0.035	2.456	1.842	0.392	0.184	0.574	0.453
5	45.20	1.58	9.69	0.00	16.72	0.39	11.04	11.81	1.38	1.03	98.83	6.663	0.175	1.684	0.000	0.204	1.858	0.049	2.425	1.865	0.394	0.194	0.566	0.502
6	45.11	1.46	10.02	0.00	16.39	0.33	10.72	12.05	1.43	1.08	98.59	6.678	0.163	1.749	0.000	0.086	1.944	0.041	2.365	1.911	0.410	0.204	0.549	0.551
7	44.19	1.82	10.56	0.02	16.57	0.25	10.52	11.78	1.44	1.17	98.32	6.565	0.203	1.850	0.002	0.142	1.917	0.031	2.329	1.875	0.415	0.222	0.549	0.543
8	44.82	1.74	10.21	0.00	16.67	0.25	10.75	11.89	1.48	1.10	98.91	6.615	0.193	1.777	0.000	0.137	1.921	0.031	2.365	1.880	0.424	0.207	0.552	0.542
9	45.95	1.48	9.24	0.00	16.37	0.27	11.24	11.50	1.35	0.95	98.35	6.771	0.164	1.605	0.000	0.209	1.808	0.034	2.468	1.816	0.386	0.179	0.577	0.415
10	45.15	1.58	9.87	0.03	16.60	0.30	10.80	11.79	1.43	1.05	98.58	6.674	0.176	1.720	0.004	0.149	1.903	0.038	2.379	1.867	0.410	0.198	0.556	0.513
11	44.59	1.79	10.09	0.00	16.57	0.26	10.59	12.02	1.51	1.13	98.53	6.621	0.200	1.766	0.000	0.075	1.983	0.033	2.344	1.912	0.435	0.214	0.542	0.583
12	46.01	1.37	8.98	0.01	16.04	0.27	11.39	11.83	1.31	0.91	98.11	6.800	0.152	1.565	0.001	0.151	1.832	0.034	2.509	1.873	0.375	0.172	0.578	0.454
13	44.76	1.65	10.14	0.04	16.62	0.30	10.92	11.86	1.45	1.03	98.78	6.608	0.183	1.765	0.005	0.183	1.869	0.038	2.402	1.876	0.415	0.194	0.562	0.523
ZK1-2																								
1	47.06	1.07	8.36	0.00	16.43	0.27	11.87	12.18	1.03	0.88	99.15	6.868	0.117	1.438	0.000	0.237	1.768	0.033	2.582	1.905	0.291	0.164	0.594	0.393
2	46.22	1.19	9.41	0.14	15.13	0.36	11.31	12.38	1.11	0.97	98.22	6.820	0.132	1.637	0.016	0.017	1.850	0.045	2.487	1.957	0.318	0.183	0.573	0.462
3	45.68	1.21	9.71	0.07	15.31	0.33	11.64	12.24	1.22	1.11	98.52	6.724	0.134	1.685	0.008	0.110	1.775	0.041	2.554	1.931	0.348	0.208	0.590	0.518
4	46.33	1.06	8.98	0.01	15.47	0.32	11.77	12.35	1.06	0.99	98.33	6.820	0.117	1.559	0.001	0.132	1.773	0.040	2.582	1.948	0.303	0.186	0.593	0.461
5	46.28	1.19	8.67	0.05	16.07	0.30	11.56	12.23	1.05	0.96	98.35	6.826	0.132	1.507	0.006	0.163	1.819	0.037	2.541	1.933	0.300	0.181	0.583	0.445
6	46.63	1.17	8.35	0.14	16.62	0.34	11.74	12.12	1.21	0.86	99.19	6.824	0.129	1.441	0.016	0.240	1.794	0.042	2.560	1.901	0.343	0.161	0.588	0.447
7	48.14	0.91	7.01	0.03	15.89	0.40	12.65	12.20	1.00	0.65	98.87	7.009	0.100	1.203	0.003	0.275	1.660	0.049	2.745	1.903	0.282	0.121	0.623	0.350
8	46.08	1.11	9.14	0.07	16.33	0.27	11.91	12.30	1.11	0.93	99.25	6.721	0.122	1.572	0.008	0.331	1.660	0.033	2.589	1.922	0.314	0.173	0.609	0.442
9	45.13	1.25	10.21	0.00	16.23	0.31	11.38	12.26	1.24	1.11	99.13	6.617	0.138	1.765	0.000	0.245	1.745	0.038	2.487	1.926	0.353	0.208	0.588	0.522
10	44.87	1.27	10.23	0.04	15.65	0.33	11.21	12.11	1.25	1.18	98.13	6.648	0.142	1.787	0.005	0.131	1.808	0.041	2.475	1.922	0.359	0.223	0.578	0.541
11	46.61	1.17	8.48	0.09	16.36	0.31	11.66	12.44	1.24	0.94	99.30	6.829	0.129	1.465	0.010	0.132	1.873	0.038	2.546	1.953	0.352	0.176	0.576	0.503
12	47.40	1.00	7.94	0.04	15.90	0.26	12.15	12.42	1.02	0.77	98.91	6.924	0.110	1.367	0.005	0.187	1.755	0.032	2.645	1.944	0.289	0.144	0.601	0.402

续表 3
Continued Table 3

点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	X _{Mg}	(Na+K) _A
ZK2-1																								
1	43.29	1.28	10.85	0.05	18.01	0.28	9.72	11.47	1.24	1.13	97.33	6.513	0.145	1.925	0.006	0.335	1.931	0.036	2.180	1.849	0.362	0.217	0.530	0.464
2	43.55	1.34	10.80	0.06	18.58	0.22	9.19	11.69	1.24	1.13	97.80	6.553	0.152	1.916	0.007	0.213	2.125	0.028	2.061	1.885	0.362	0.217	0.492	0.492
3	44.33	1.15	10.24	0.08	17.82	0.27	9.72	11.81	0.99	1.04	97.44	6.652	0.130	1.812	0.009	0.236	2.000	0.034	2.174	1.899	0.288	0.199	0.521	0.420
4	43.71	1.22	10.74	0.00	17.77	0.25	9.66	11.75	1.25	1.13	97.48	6.574	0.138	1.904	0.000	0.203	2.033	0.032	2.165	1.894	0.365	0.217	0.516	0.508
5	43.87	1.25	10.65	0.00	17.83	0.32	9.89	11.85	1.13	1.09	97.87	6.558	0.141	1.877	0.000	0.301	1.928	0.041	2.203	1.898	0.328	0.208	0.533	0.475
6	44.00	1.43	10.65	0.01	17.27	0.32	9.85	11.75	1.19	1.15	97.61	6.596	0.161	1.882	0.001	0.166	1.999	0.041	2.201	1.887	0.346	0.220	0.524	0.494
7	44.28	1.30	10.84	0.01	17.86	0.32	10.05	12.10	1.18	1.17	99.11	6.544	0.144	1.889	0.001	0.264	1.943	0.040	2.213	1.916	0.338	0.221	0.532	0.513
8	44.53	1.34	10.24	0.05	17.24	0.35	10.28	12.07	1.18	1.10	98.38	6.620	0.150	1.795	0.006	0.193	1.950	0.044	2.278	1.923	0.340	0.209	0.539	0.508
9	44.18	1.40	10.51	0.07	17.93	0.25	9.94	11.86	1.18	1.13	98.43	6.575	0.157	1.844	0.008	0.247	1.985	0.032	2.204	1.891	0.340	0.215	0.526	0.478
10	43.75	1.54	11.03	0.01	17.76	0.32	9.79	11.88	1.18	1.23	98.47	6.514	0.172	1.936	0.001	0.226	1.985	0.040	2.172	1.895	0.341	0.234	0.522	0.510
11	44.06	1.28	10.53	0.02	17.63	0.24	9.69	11.83	1.23	1.17	97.68	6.616	0.145	1.864	0.002	0.142	2.072	0.031	2.169	1.903	0.358	0.224	0.511	0.516
12	44.07	1.22	10.57	0.00	17.71	0.34	9.61	11.65	1.16	1.09	97.44	6.623	0.138	1.873	0.000	0.195	2.031	0.043	2.152	1.876	0.338	0.209	0.514	0.466
ZK1-3																								
1	45.94	1.33	9.05	0.08	15.13	0.24	11.85	11.41	1.04	0.82	96.89	6.811	0.148	1.582	0.009	0.262	1.614	0.030	2.618	1.813	0.299	0.155	0.619	0.297
2	45.59	1.64	9.72	0.12	15.00	0.35	11.55	12.16	1.10	0.95	98.18	6.718	0.182	1.688	0.014	0.106	1.742	0.044	2.536	1.920	0.314	0.179	0.593	0.443
3	45.80	1.63	9.42	0.16	15.01	0.23	11.94	12.18	1.19	0.91	98.47	6.724	0.180	1.630	0.019	0.129	1.714	0.029	2.612	1.916	0.339	0.170	0.604	0.454
4	46.34	1.62	9.05	0.02	14.97	0.30	12.13	12.14	1.15	0.81	98.52	6.783	0.178	1.562	0.002	0.145	1.688	0.037	2.646	1.904	0.326	0.151	0.611	0.418
5	45.41	1.61	9.66	0.13	14.85	0.33	11.54	12.24	1.08	0.89	97.74	6.721	0.179	1.685	0.015	0.089	1.749	0.041	2.545	1.941	0.310	0.168	0.593	0.443
6	46.53	1.73	9.23	0.03	15.37	0.26	12.07	12.30	1.11	0.80	99.42	6.757	0.189	1.580	0.003	0.156	1.710	0.032	2.612	1.914	0.313	0.148	0.604	0.407
7	46.36	1.50	9.01	0.02	15.06	0.27	12.04	12.15	1.14	0.85	98.39	6.799	0.165	1.558	0.002	0.133	1.715	0.034	2.632	1.909	0.324	0.159	0.605	0.426
8	45.11	1.59	9.95	0.10	15.38	0.28	11.36	12.20	1.23	0.90	98.09	6.669	0.177	1.734	0.012	0.112	1.790	0.035	2.503	1.933	0.353	0.170	0.583	0.488
9	46.09	1.46	9.17	0.07	15.22	0.19	11.99	12.14	1.18	0.77	98.28	6.768	0.161	1.588	0.008	0.161	1.708	0.024	2.624	1.910	0.336	0.144	0.606	0.414
10	46.14	1.47	9.31	0.01	15.35	0.23	11.90	12.07	1.21	0.83	98.50	6.763	0.162	1.609	0.001	0.159	1.723	0.029	2.600	1.896	0.344	0.155	0.601	0.424
11	45.84	1.39	9.46	0.10	14.69	0.27	11.66	12.02	1.19	0.86	97.47	6.785	0.155	1.651	0.012	0.091	1.727	0.034	2.572	1.906	0.342	0.162	0.598	0.437
12	45.45	1.50	9.59	0.06	14.84	0.31	11.83	11.93	1.17	0.84	97.52	6.721	0.167	1.672	0.007	0.172	1.664	0.039	2.607	1.890	0.336	0.158	0.610	0.423
13	46.85	1.36	9.21	0.00	14.71	0.26	12.33	12.05	1.19	0.75	98.69	6.819	0.149	1.580	0.000	0.160	1.631	0.032	2.675	1.879	0.336	0.139	0.621	0.386

注: 角闪石以 23 个氧为标准计算; $X_{Mg} = Mg / (Mg + Fe^{2+})$; EPMA 测试数据单位为 $w_B / \%$ 。

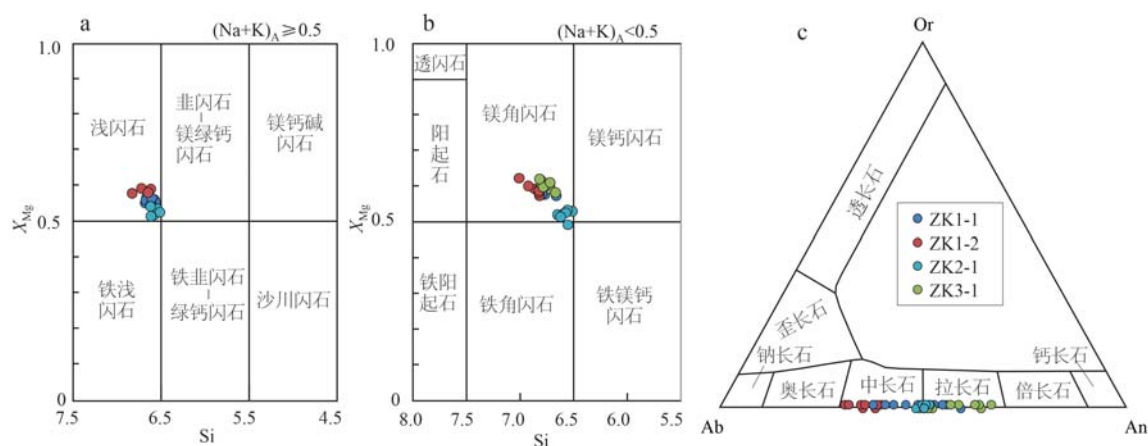


图5 角闪石和斜长石分类图解 (a 和 b 据 Leake *et al.*, 1997; c 据 Deer *et al.*, 1963)

Fig. 5 Diagrams for amphibole and plagioclase classification (a, b after Leake *et al.*, 1997; c after Deer *et al.*, 1963)

4 讨论

4.1 变基性岩的变质时代及变质温压条件

前人对辽河群中出露的大量古元古代变质火山-沉积岩系进行了年代学研究,将其沉积时代限定在 2.05~1.95 Ga (Luo *et al.*, 2004, 2008; 刘福来等, 2015; 刘平华等, 2017; Wang *et al.*, 2017a, 2020; Liu *et al.*, 2018), 变质时代限定在 1.95~1.85 Ga (李三忠等, 2003; Luo *et al.*, 2004, 2008; Li and Zhao, 2007; 刘福来等, 2015; Wang *et al.*, 2017a)。通过对辽吉构造带南部亚带(集安群、南辽河群和荆山群)变沉积岩进行变质作用研究,得到与北部亚带(老岭群、北辽河群和粉子山群)一致的顺时针 p - t 轨迹,其峰后近等温减压中-低压麻粒岩相变质时代为 1 870~1 840 Ma (Liu F L *et al.*, 2019); 以泥质麻粒岩中深熔脉体为重点研究对象,得到两阶段深熔时代分别为 1 870~1 865 Ma 和 1 843~1 835 Ma, 分别对应于初始深熔时代和熔体结晶结束的时代 (Liu F L *et al.*, 2019)。而有关基性岩的原岩时代和变质时代目前仍然存在争议(于介江等, 2007; 董春艳等, 2012; Meng *et al.*, 2014; Yuan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2016; 刘平华等, 2017; Xu *et al.*, 2018b; 陈井胜等, 2020)。前人通过对侵入北辽河群的基性岩中斜锆石或者锆石进行年代学研究,得到 ~2.12 Ga/~2.13 Ga 的结晶年龄 (Wang *et al.*, 2016; Xu *et al.*, 2018b) 和 ~1.88 Ga 的变质年龄 (Xu *et al.*, 2018b)。有关南辽河群变沉积岩中变基性岩, 刘平华等(2017)选择三家子地区石榴斜长角闪

岩进行变质作用及年代学研究,将其原岩时代限定在 2.17~2.06 Ga, 变质时代限定在 1.92~1.83 Ga 之间; 陈井胜等(2020)对宽甸地区里尔峪组变沉积岩中基性火山岩夹层进行年代学研究,将其形成时代限定在 2.17~2.03 Ga, 斜长角闪岩记录的变质时代可以分为 1.87~1.86 Ga、1.85~1.84 Ga 和 1.79~1.78 Ga 三个阶段,另外 1 件样品则记录了 1.29 Ga 的变质年龄。本研究通过对宽甸地区 4 件变基性岩中变质锆石进行 SHRIMP U-Pb 定年,分别得到 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1\,849.8 \pm 2.6$ Ma、 $1\,853.5 \pm 2.6$ Ma、 $1\,853.6 \pm 4.3$ Ma 和 $1\,857.4 \pm 3.9$ Ma, 表明 4 件样品记录了非常一致的变质年龄为 1.86~1.85 Ga。此外,宽甸地区变基性岩是否如陈井胜等(2020)的研究结果,记录了古元古代造山事件的不同阶段,南、北辽河群变基性岩记录的变质年龄是否完全一致,变基性岩是否存在 1.29 Ga 哥伦比亚超大陆裂解事件的记录,都有待于进一步研究。

本研究根据电子探针化学成分测试结果,利用角闪石-斜长石温度计 (Holland and Blundy, 1994) 和角闪石-斜长石-石英压力计 (Bhadra and Bhattacharya, 2007) 得到斜长角闪岩的变质温压条件见图 8。样品 ZK1-1、ZK1-2、ZK2-1 和 ZK3-1 记录的温压条件分别为 $p=0.42\sim0.81$ GPa 和 $t=688\sim759^\circ\text{C}$ 、 $p=0.27\sim0.54$ GPa 和 $t=621\sim696^\circ\text{C}$ 、 $p=0.82\sim1.00$ GPa 和 $t=712\sim751^\circ\text{C}$ 、 $p=0.59\sim0.85$ GPa 和 $t=703\sim739^\circ\text{C}$ 。4 件样品得到的温压范围存在一定差异,样品 ZK1-2 中斜长石的 An 值相对较低,而角闪石的 Ca 含量相对较高,导致得到的温度相对较低(部分点 $t<650^\circ\text{C}$)。此外,角闪石-斜长石-石英压

表 4 宽甸地区变基性岩中斜长石电子探针成分
Table 4 Representative mineral EPMA composition of plagioclase from meta-basic rocks in Kuandian area

点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Ab	An
ZK1-1																								
1	55.77	0.00	27.86	0.03	0.02	0.00	0.01	9.95	5.80	0.12	99.56	2.517	0.000	1.482	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.481	0.508	0.007	51	48
2	54.90	0.01	28.95	0.04	0.08	0.05	0.00	11.23	5.19	0.13	100.57	2.463	0.000	1.531	0.001	0.003	0.000	0.002	0.000	0.540	0.451	0.007	45	54
3	54.48	0.00	29.36	0.04	0.04	0.00	0.01	11.25	5.00	0.13	100.30	2.449	0.000	1.556	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.542	0.436	0.007	44	55
4	57.84	0.00	26.73	0.04	0.02	0.01	0.03	8.67	6.46	0.16	99.96	2.589	0.000	1.411	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002	0.416	0.561	0.009	57	42
5	55.94	0.00	28.02	0.00	0.08	0.02	0.00	10.14	5.73	0.14	100.07	2.513	0.000	1.484	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000	0.488	0.499	0.008	50	49
6	58.48	0.02	26.49	0.03	0.08	0.00	0.00	8.29	6.77	0.19	100.35	2.606	0.001	1.392	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.396	0.585	0.011	59	40
7	53.71	0.02	29.68	0.03	0.02	0.02	0.00	12.15	4.64	0.10	100.38	2.419	0.001	1.576	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.586	0.405	0.006	41	59
8	55.79	0.00	28.55	0.01	0.05	0.00	0.02	10.69	5.47	0.15	100.74	2.493	0.000	1.504	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.512	0.474	0.009	48	51
9	55.61	0.00	28.33	0.00	0.03	0.01	0.00	10.71	5.40	0.14	100.22	2.497	0.000	1.500	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.515	0.470	0.008	47	52
10	59.38	0.00	26.25	0.02	0.02	0.00	0.01	7.71	7.00	0.16	100.55	2.633	0.000	1.372	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.366	0.602	0.009	62	37
11	54.48	0.00	28.80	0.00	0.05	0.00	0.01	11.24	4.94	0.15	99.67	2.464	0.000	1.536	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.545	0.433	0.009	44	55
12	57.06	0.04	27.31	0.00	0.00	0.07	0.00	9.33	6.20	0.17	100.17	2.555	0.001	1.442	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.448	0.538	0.010	54	45
13	54.45	0.00	29.16	0.02	0.06	0.04	0.00	11.31	4.85	0.11	100.01	2.454	0.000	1.549	0.001	0.002	0.000	0.002	0.000	0.546	0.424	0.006	43	56
ZK1-2																								
1	58.95	0.00	26.20	0.01	0.00	0.00	0.00	8.04	7.01	0.17	100.38	2.623	0.000	1.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.383	0.605	0.010	61	38	
2	59.92	0.00	25.45	0.00	0.07	0.00	0.00	7.09	7.54	0.08	100.15	2.665	0.000	1.334	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.338	0.650	0.005	65	34
3	60.67	0.00	25.12	0.00	0.14	0.00	0.00	6.63	7.95	0.12	100.64	2.684	0.000	1.310	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000	0.314	0.682	0.007	68	31
4	59.21	0.00	26.14	0.00	0.02	0.00	0.00	7.68	7.14	0.13	100.30	2.633	0.000	1.370	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.366	0.616	0.007	62	37
5	59.39	0.02	25.83	0.01	0.00	0.02	0.00	7.39	7.45	0.12	100.21	2.643	0.001	1.355	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.352	0.643	0.007	64	35
6	60.77	0.02	24.53	0.00	0.22	0.06	0.03	6.15	7.85	0.32	99.95	2.705	0.001	1.287	0.000	0.008	0.000	0.002	0.293	0.678	0.018	69	30	
7	59.03	0.04	26.22	0.02	0.02	0.00	0.00	7.99	7.17	0.11	100.59	2.622	0.001	1.373	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.380	0.617	0.006	62	38
8	59.44	0.03	25.65	0.00	0.05	0.02	0.00	7.26	7.42	0.10	99.98	2.651	0.001	1.348	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.347	0.642	0.006	65	35
9	58.82	0.02	26.11	0.00	0.05	0.00	0.00	7.85	7.09	0.14	100.08	2.625	0.001	1.374	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.375	0.613	0.008	62	38
10	58.57	0.00	26.33	0.02	0.06	0.00	0.02	8.14	6.94	0.17	100.26	2.612	0.000	1.384	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.389	0.600	0.010	60	39
11	60.46	0.02	24.99	0.00	0.06	0.00	0.01	6.54	7.99	0.15	100.22	2.686	0.001	1.309	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.311	0.688	0.009	68	31
12	60.91	0.01	24.87	0.00	0.01	0.00	0.00	6.39	8.05	0.17	100.41	2.698	0.000	1.299	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.303	0.691	0.010	69	30

续表 4
Continued Table 4

点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Ab	An
ZK2-1																								
1	55.44	0.00	27.82	0.04	0.03	0.00	0.00	10.14	5.73	0.11	99.30	2.511	0.000	1.485	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.492	0.503	0.006	50	49
2	55.19	0.01	27.82	0.02	0.04	0.00	0.01	10.23	5.62	0.08	99.01	2.507	0.000	1.490	0.001	0.002	0.000	0.000	0.001	0.498	0.495	0.005	50	50
3	54.64	0.01	28.28	0.00	0.04	0.00	0.02	10.77	5.61	0.08	99.44	2.478	0.000	1.512	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.523	0.493	0.005	48	51
4	55.43	0.00	28.18	0.00	0.06	0.03	0.01	10.30	5.72	0.07	99.79	2.499	0.000	1.498	0.000	0.002	0.000	0.001	0.001	0.498	0.500	0.004	50	50
5	55.22	0.03	28.10	0.00	0.05	0.00	0.02	10.52	5.69	0.08	99.70	2.494	0.001	1.496	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.509	0.498	0.005	49	50
6	55.72	0.00	27.53	0.00	0.00	0.00	0.01	9.89	5.95	0.07	99.19	2.525	0.000	1.471	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.480	0.523	0.004	52	48
7	55.42	0.00	27.74	0.03	0.07	0.04	0.03	10.32	5.72	0.06	99.43	2.509	0.000	1.480	0.001	0.003	0.000	0.002	0.002	0.501	0.502	0.003	50	50
8	55.28	0.03	27.91	0.03	0.04	0.00	0.00	10.49	5.47	0.08	99.32	2.504	0.001	1.490	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.509	0.480	0.005	48	51
9	55.61	0.00	28.07	0.00	0.00	0.02	0.03	10.39	5.77	0.07	99.97	2.504	0.000	1.490	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.501	0.504	0.004	50	50
10	55.45	0.01	27.79	0.00	0.00	0.03	0.00	10.57	5.69	0.06	99.59	2.507	0.000	1.481	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.512	0.499	0.003	49	50
11	55.11	0.01	28.11	0.00	0.02	0.00	0.01	10.52	5.64	0.09	99.49	2.494	0.000	1.500	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.510	0.495	0.005	49	50
12	55.13	0.01	28.22	0.02	0.03	0.02	0.00	10.59	5.41	0.17	99.59	2.492	0.000	1.504	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.513	0.474	0.010	48	51
ZK3-1																								
1	54.49	0.03	28.68	0.00	0.08	0.00	0.00	9.95	5.31	0.10	98.63	2.481	0.001	1.539	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.485	0.469	0.006	49	51
2	55.41	0.02	28.03	0.03	0.08	0.00	0.00	10.37	5.70	0.12	99.73	2.501	0.001	1.491	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.501	0.499	0.007	50	50
3	53.61	0.05	29.41	0.02	0.12	0.02	0.02	12.18	4.73	0.07	100.22	2.420	0.002	1.565	0.001	0.005	0.000	0.001	0.001	0.589	0.414	0.004	41	58
4	55.67	0.00	28.24	0.00	0.10	0.00	0.02	10.65	5.74	0.09	100.50	2.495	0.000	1.492	0.000	0.004	0.000	0.000	0.001	0.512	0.499	0.005	49	50
5	55.26	0.00	28.41	0.00	0.07	0.00	0.00	10.76	5.60	0.11	100.21	2.485	0.000	1.506	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.519	0.488	0.006	48	51
6	53.96	0.00	28.90	0.00	0.06	0.00	0.00	11.65	4.90	0.09	99.55	2.447	0.000	1.545	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.566	0.431	0.005	43	56
7	52.59	0.01	30.03	0.00	0.06	0.00	0.00	12.87	4.25	0.05	99.86	2.386	0.000	1.606	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.626	0.374	0.003	37	62
8	55.07	0.00	28.39	0.00	0.09	0.00	0.00	10.79	5.46	0.05	99.85	2.484	0.000	1.510	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.522	0.478	0.003	48	52
9	51.18	0.00	30.87	0.02	0.09	0.01	0.00	13.66	3.79	0.10	99.71	2.333	0.000	1.659	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.667	0.335	0.006	33	66
10	55.03	0.03	28.19	0.00	0.03	0.02	0.00	10.53	5.45	0.19	99.48	2.491	0.001	1.505	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.511	0.478	0.011	48	51
11	52.20	0.00	30.48	0.00	0.06	0.04	0.00	13.10	4.14	0.09	100.10	2.366	0.000	1.629	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.636	0.364	0.005	36	63
12	52.08	0.01	30.42	0.00	0.10	0.00	0.01	13.11	4.09	0.07	99.89	2.365	0.000	1.629	0.000	0.004	0.000	0.000	0.001	0.638	0.360	0.004	36	64
13	55.38	0.00	28.19	0.00	0.10	0.00	0.00	9.94	5.69	0.07	99.38	2.504	0.000	1.503	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.482	0.499	0.004	51	49

注: 斜长石以 8 个氧为标准计算; EPMA 测试数据单位 $w_B/\%$ 。

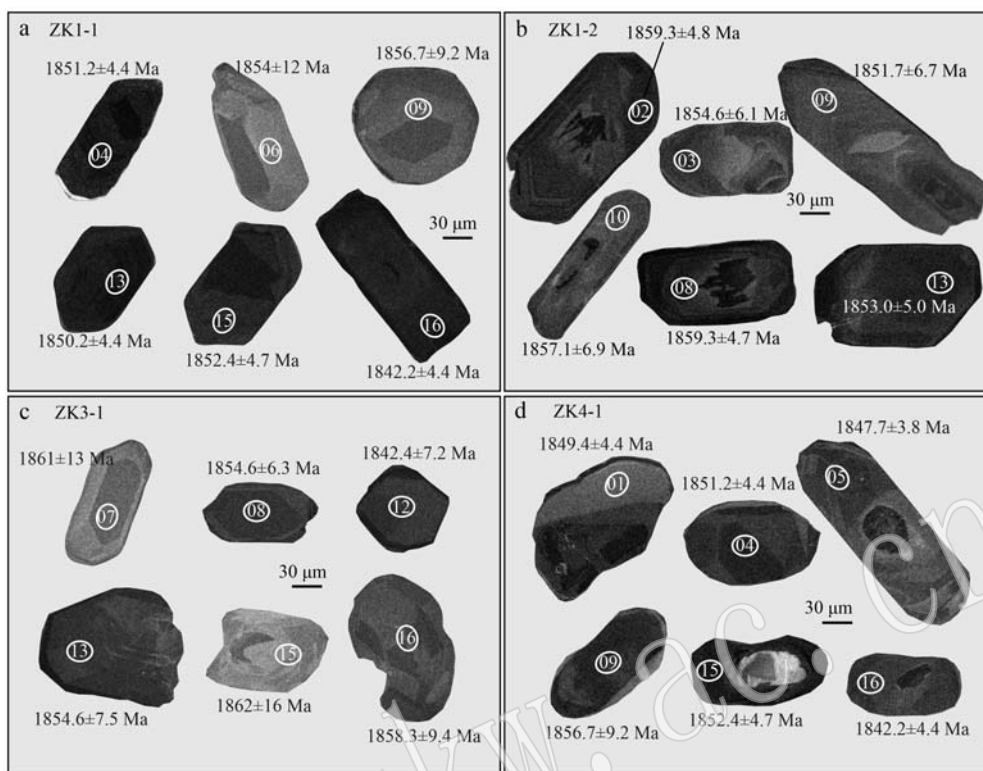


图6 宽甸地区变基性岩中锆石阴极发光图像(分析点位及U-Pb定年结果亦在图中标出)

Fig. 6 Representative cathodoluminescence (CL) images and age data of zircon from meta-basic rocks in the Kuandian area (the spots and ages are also shown)

力计的适用温度范围 $t = 650 \sim 950^{\circ}\text{C}$, 较低的温度也导致样品 ZK1-2 的压力计算有偏差。刘平华等 (2017) 利用相平衡模拟结合矿物温压计的方法, 建立三家子地区石榴斜长角闪岩顺时针变质演化 p - t 轨迹, 峰期变质阶段 (M_1)、峰期变质阶段 (M_2) 与峰后退变质阶段 (M_3) 稳定的温压条件分别为: $p = 0.68 \sim 0.72 \text{ GPa}$, $t = 570 \sim 600^{\circ}\text{C}$; $p = 0.98 \sim 1.01 \text{ GPa}$, $t = 690 \sim 710^{\circ}\text{C}$; $p = 0.52 \sim 0.61 \text{ GPa}$, $t = 670 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 。三家子石榴斜长角闪岩近峰期高压角闪岩相变质的时代为 $1.96 \sim 1.94 \text{ Ga}$; 峰后近等温减压中-低压角闪岩相退变质时代为 $1.92 \sim 1.83 \text{ Ga}$ (刘平华等, 2017)。通过对比可以发现本次报道的含辉石斜长角闪岩 (ZK2-1) 记录的变质温压条件与近峰期 (三家子石榴斜长角闪岩 M_2 阶段) 温压条件相当。(含辉石)斜长角闪岩 (ZK1-1 和 ZK3-1) 中变质锆石年龄为 $\sim 1.85 \text{ Ga}$, 记录的温压条件与区域退变质阶段温压条件 (三家子石榴斜长角闪岩 M_3 阶段) 相当。

4.2 宽甸地区变基性岩原岩及形成环境

本次研究的样品中 ZK3-1 具有高的烧矢量

(12.4%), ZK4-1 发生明显的矿化, 黄铁矿含量达 15%~25% (体积分数)。因此, 原岩类型和形成环境的讨论主要依据 ZK1-1、ZK1-2、ZK2-1 的全岩地球化学进行。根据样品的 FeO^T 、 CaO 、 MgO 含量, 本次报道的样品为正斜长角闪岩 (图 4a)。3 件样品具有低的 SiO_2 (48.20%~49.32%) 和 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (2.55%~3.52%) 含量, 原岩属亚碱性玄武岩 (图 4b)。利用相对稳定的元素判别, 3 件样品落在安山岩/玄武岩区域。在多类主、微量元素化学成分判别图解中, 这些样品均落入拉斑玄武岩区域内 (图 9)。尽管本次研究的样品仅记录了古元古代晚期的变质作用年龄, 但其产出于南辽河里尔峪组, 其地球化学组成于前人报道的辽河群中 $2.19 \sim 2.06 \text{ Ga}$ 变基性岩一致 (图 9)。综上, 笔者认为宽甸地区钻孔中变基性岩样品原岩为古元古代中期的拉斑玄武岩。

与前人报道样品相同, 3 件变基性岩样品亏损 Nb、Ta 等高场强元素, 表现出弧岩浆岩的特征 (图 3b), 在 $\text{La}/\text{Nb}-\text{La}$ 等图解中也落在岛弧玄武岩区域 (图 9c~9e)。因此, 一些研究者认为辽河群变基性岩可能形成于大陆弧或岛弧环境 (Faure *et al.*, 2004;

表 5 宽甸地区变基性岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果
Table 5 SHRIMP U-Pb data for zircon from meta-basic rocks in Kuandian area

点号	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	$\text{U}/10^{-6}$	$\text{Th}/10^{-6}$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$1\sigma/\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$1\sigma/\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$1\sigma/\%$	误差相 关系数	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	不谐和 度/%
ZK1-1															
ZK1-1-01	-	2 163	127	0.06	656	0.113 07	0.24	5.502	1.0	0.352 9	0.99	0.971	1 948±17	1 849.4±4.4	-5
ZK1-1-02	0.01	4 574	590	0.13	1390	0.113 03	0.18	5.506	0.99	0.353 3	0.97	0.982	1 950±16	1 848.7±3.3	-6
ZK1-1-03	-	1 550	68	0.05	451	0.113 03	0.28	5.283	1.0	0.339 0	0.98	0.960	1 882±16	1 848.6±5.1	-2
ZK1-1-04	-	2 063	107	0.05	598	0.113 19	0.24	5.269	1.0	0.337 6	0.97	0.970	1 875±16	1 851.2±4.4	-1
ZK1-1-05	-	2 385	135	0.06	737	0.112 97	0.21	5.602	1.0	0.359 7	0.98	0.978	1 981±17	1 847.7±3.8	-7
ZK1-1-06	0.04	258	75	0.30	74.2	0.113 35	0.66	5.220	1.3	0.334 0	1.1	0.857	1 858±18	1 854±12	0
ZK1-1-07	0.00	3 399	230	0.07	996	0.113 46	0.19	5.334	0.98	0.341 0	0.96	0.980	1 891±16	1 855.5±3.5	-2
ZK1-1-08	0.01	1 675	80	0.05	489	0.112 96	0.27	5.287	1.0	0.339 5	0.97	0.964	1 884±16	1 847.6±4.9	-2
ZK1-1-09	0.04	467	266	0.59	136	0.113 53	0.51	5.292	1.1	0.338 1	1.0	0.896	1 877±17	1 856.7±9.2	-1
ZK1-1-10	0.00	2 647	144	0.06	786	0.112 99	0.21	5.382	1.0	0.345 5	0.98	0.978	1 913±16	1 848.0±3.7	-4
ZK1-1-11	0.01	2 442	139	0.06	720	0.113 16	0.22	5.355	0.99	0.343 2	0.97	0.974	1 902±16	1 850.7±4.1	-3
ZK1-1-12	0.01	2 164	198	0.09	632	0.112 92	0.24	5.293	1.0	0.340 0	0.97	0.972	1 887±16	1 846.9±4.3	-2
ZK1-1-13	-	2 063	250	0.13	601	0.113 12	0.24	5.291	1.0	0.339 2	0.97	0.970	1 883±16	1 850.2±4.4	-2
ZK1-1-14	-	2 049	85	0.04	525	0.113 55	0.34	4.673	1.1	0.298 5	1.1	0.952	1 684±16	1 857.0±6.2	9
ZK1-1-15	0.00	1 730	72	0.04	501	0.113 26	0.26	5.265	1.0	0.337 1	0.97	0.966	1 873±16	1 852.4±4.7	-1
ZK1-1-16	0.01	1 920	130	0.07	563	0.112 63	0.24	5.299	1.0	0.341 2	0.97	0.970	1 893±16	1 842.2±4.4	-3
ZK1-2															
ZK1-2-01	0.02	2 383	379	0.16	695	0.113 06	0.23	5.294	0.99	0.339 6	0.97	0.973	1 885±16	1 849.2±4.1	-2
ZK1-2-02	0.01	1 725	222	0.13	508	0.113 69	0.26	5.373	1.0	0.342 7	0.97	0.965	1 900±16	1 859.3±4.8	-2
ZK1-2-03	0.00	1 033	88	0.09	303	0.113 40	0.34	5.337	1.0	0.341 3	0.99	0.947	1 893±16	1 854.6±6.1	-2
ZK1-2-04	0.00	2 484	431	0.18	744	0.113 27	0.22	5.445	1.4	0.348 6	1.4	0.987	1 928±23	1 852.5±4.0	-4
ZK1-2-05	0.02	1 177	169	0.15	345	0.112 86	0.32	5.307	1.4	0.341 1	1.4	0.974	1 892±22	1 845.9±5.8	-2
ZK1-2-06	0.02	1 087	174	0.17	318	0.113 53	0.33	5.326	1.2	0.340 2	1.1	0.958	1 888±18	1 856.7±6.0	-2
ZK1-2-07	0.01	2 135	332	0.16	634	0.113 09	0.24	5.392	1.0	0.345 8	0.99	0.972	1 915±16	1 849.6±4.3	-4
ZK1-2-08	-	1 790	187	0.11	516	0.113 69	0.26	5.263	1.0	0.335 7	0.97	0.966	1 866±16	1 859.3±4.7	0
ZK1-2-09	0.04	909	86	0.10	264	0.113 22	0.37	5.280	1.3	0.338 2	1.3	0.961	1 878±21	1 851.7±6.7	-1
ZK1-2-10	0.00	917	66	0.07	265	0.113 56	0.38	5.270	1.1	0.336 6	0.99	0.933	1 870±16	1 857.1±6.9	-1
ZK1-2-11	0.01	1 840	275	0.15	534	0.113 33	0.34	5.279	1.0	0.337 8	0.99	0.946	1 876±16	1 853.6±6.2	-1
ZK1-2-12	0.01	1 634	14	0.01	479	0.114 69	0.28	5.397	1.0	0.341 3	0.98	0.962	1 893±16	1 875.0±5.0	-1
ZK1-2-13	0.01	1 546	266	0.18	455	0.113 30	0.28	5.346	1.0	0.342 2	0.98	0.962	1 897±16	1 853.0±5.0	-2
ZK1-2-14	0.02	1 045	97	0.10	304	0.113 42	0.33	5.293	1.0	0.338 4	0.99	0.947	1 879±16	1 854.9±6.0	-1
ZK1-2-15	0.01	1 069	100	0.10	312	0.113 50	0.39	5.324	1.1	0.340 2	0.99	0.931	1 888±16	1 856.2±7.0	-2
ZK1-2-16	0.01	1 885	271	0.15	551	0.113 34	0.25	5.315	1.0	0.340 1	0.97	0.968	1 887±16	1 853.6±4.6	-2

续表 5
Continued Table 5

点号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Th / 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/10^{-6}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$1\sigma/\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$1\sigma/\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$1\sigma/\%$	误差相 关系数	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄/Ma	不谐和 度/%
ZK3-1														
ZK3-1-01	0.03	701	349	199	0.112 95	0.42	5.144	1.1	0.330 3	10	0.921	1 840±16	1 847.5±7.7	0
ZK3-1-02	0.01	475	91	138	0.112 82	0.49	5.246	1.2	0.337 2	1.1	0.907	1 873±17	1 845.3±8.9	-2
ZK3-1-03	0.04	287	110	87.7	0.114 32	0.64	5.600	1.4	0.355 3	1.2	0.882	1 960±20	1 869±12	-5
ZK3-1-04	-	641	293	184	0.113 97	0.43	5.238	1.1	0.333 4	1.0	0.920	1 855±16	1 863.6±7.7	0
ZK3-1-05	0.03	305	126	88.1	0.113 74	0.62	5.272	1.2	0.336 1	1.1	0.864	1 868±17	1 860±11	0
ZK3-1-06	0.02	897	257	256	0.113 39	0.35	5.199	1.0	0.332 6	0.99	0.944	1 851±16	1 854.4±6.2	0
ZK3-1-07	0.05	412	218	120	0.113 80	0.71	5.333	1.3	0.339 9	1.1	0.832	1 886±18	1 861±13	-1
ZK3-1-08	0.02	992	469	284	0.113 40	0.35	5.205	1.0	0.332 9	0.99	0.942	1 852±16	1 854.6±6.3	0
ZK3-1-09	0.03	568	261	165	0.112 96	0.46	5.261	1.1	0.337 8	1.0	0.912	1 876±16	1 847.6±8.3	-2
ZK3-1-10	0.07	263	96	75.1	0.113 74	0.70	5.217	1.3	0.332 7	1.1	0.842	1 851±17	1 860±13	0
ZK3-1-11	0.02	662	321	187	0.113 41	0.50	5.152	1.1	0.329 5	1.0	0.901	1 836±17	1 854.8±9.0	1
ZK3-1-12	0.02	763	226	218	0.112 64	0.40	5.163	1.2	0.332 4	1.1	0.944	1 850±18	1 842.4±7.2	0
ZK3-1-13	0.00	812	242	230	0.113 40	0.42	5.151	1.1	0.329 4	0.99	0.922	1 836±16	1 854.6±7.5	1
ZK3-1-14	0.07	275	101	76.8	0.113 75	0.64	5.098	1.3	0.325 1	1.1	0.869	1 814±18	1 860±11	2
ZK3-1-15	0.14	168	52	46.8	0.113 90	0.90	5.087	1.5	0.323 9	1.2	0.787	1 809±17	1 862±16	3
ZK3-1-16	0.00	427	169	121	0.113 63	0.52	5.178	1.2	0.330 5	1.0	0.894	1 841±17	1 858.3±9.4	1
ZK4-1														
ZK4-1-01	0.08	356	58	103	0.114 25	0.56	5.300	1.2	0.336 5	1.1	0.884	1 870±17	1 868±10	0
ZK4-1-02	0.04	863	204	250	0.114 12	0.39	5.294	1.1	0.336 5	0.99	0.932	1 870±16	1 866.0±7.0	0
ZK4-1-03	0.02	774	191	221	0.114 12	0.37	5.227	1.1	0.332 2	0.99	0.937	1 849±16	1 866.1±6.7	1
ZK4-1-04	0.00	985	409	297	0.114 74	0.34	5.545	1.1	0.350 5	1.0	0.948	1 937±17	1 875.9±6.1	-3
ZK4-1-05	0.03	820	204	238	0.113 24	0.37	5.266	1.1	0.337 3	0.99	0.936	1 874±16	1 852.0±6.8	-1
ZK4-1-06	0.00	472	54	135	0.113 37	0.48	5.215	1.3	0.333 6	1.2	0.932	1 856±20	1 854.1±8.8	0
ZK4-1-07	0.02	626	154	179	0.113 53	0.44	5.214	1.1	0.333 1	1.0	0.915	1 853±16	1 856.6±8.0	0
ZK4-1-08	0.04	431	38	129	0.113 30	0.79	5.428	1.3	0.347 4	1.0	0.794	1 922±17	1 853±14	-4
ZK4-1-09	0.02	994	49	303	0.118 36	0.33	5.790	1.1	0.354 8	1.0	0.950	1 957±17	1 931.6±5.9	-1
ZK4-1-10	0.02	641	150	184	0.113 50	0.41	5.225	1.1	0.333 9	10	0.925	1 857±16	1 856.3±7.4	0
ZK4-1-11	0.02	1074	51	315	0.114 44	0.32	5.384	1.0	0.341 2	0.98	0.950	1 892±16	1 871.1±5.8	-1
ZK4-1-12	0.02	527	120	151	0.113 33	0.46	5.215	1.1	0.333 7	1.0	0.911	1 856±16	1 853.4±8.3	0
ZK4-1-13	0.02	850	221	244	0.113 54	0.36	5.236	1.1	0.334 4	0.99	0.939	1 860±16	1 856.9±6.5	0
ZK4-1-14	0.01	784	196	228	0.112 98	0.36	5.281	1.1	0.339 0	1.0	0.943	1 847±17	1 847.9±6.5	-2
ZK4-1-15	0.02	1064	44	330	0.116 37	0.31	5.799	1.1	0.361 4	1.0	0.956	1 989±17	1 901.2±5.5	-5
ZK4-1-16	-	751	169	222	0.114 43	0.36	5.435	1.1	0.344 5	0.99	0.940	1 908±16	1 870.9±6.5	-2
ZK4-1-17	0.03	639	23	190	0.117 79	0.39	5.626	1.1	0.346 4	10.0	0.933	1 917±17	1 922.9±6.9	0
ZK4-1-18	0.00	897	214	260	0.113 58	0.34	5.286	1.0	0.337 5	0.99	0.944	1 875±16	1 857.5±6.2	-1
ZK4-1-19	0.03	789	202	228	0.113 32	0.38	5.250	1.1	0.336 0	0.99	0.935	1 867±16	1 853.3±6.8	-1
ZK4-1-20	0.00	841	208	243	0.113 85	0.36	5.287	1.1	0.336 8	0.99	0.941	1 871±16	1 861.8±6.4	0

注: ^{206}Pb 表示 ^{206}Pb 中普通 ^{206}Pb 的比例, * 表示放射成因 Pb 。

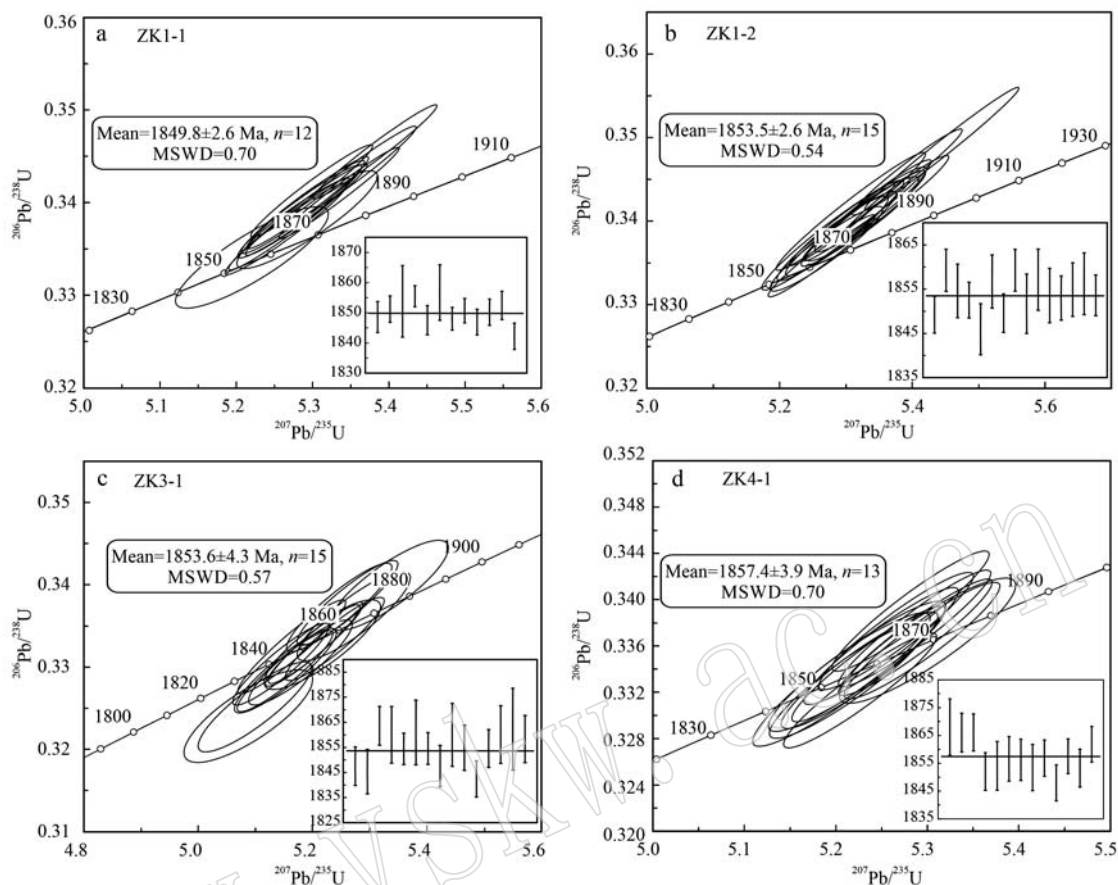


图 7 宽甸地区变基性岩中谐和锆石年龄图解

Fig. 7 U-Pb concordia diagrams of the concordia zircons from meta-basic rocks in the Kuandian area

马立杰等, 2007; Yuan *et al.*, 2015)。值得注意的是, 辽河群变基性岩大多为拉斑系列, 与典型岛弧岩浆岩以钙碱性系列为主明显不同。在 Th/Yb - Nb/Yb 图解中, 本文报道的变基性岩样品与前人报道的变基性岩样品均表现出自 E-MORB 向大陆地壳演化的趋势 (Xu *et al.*, 2018b), 与弧火山岩的演化趋势明显不同 (图 9f), 表明辽河群变基性岩原岩可能是经历了与地壳物质相互作用的 E-MORB, 与地壳物质相互作用也解释了辽河群变沉积岩 Nb、Ta 的亏损。以上结果表明辽河群变基性岩很可能不是形成于弧环境。

辽-吉构造带内广泛发育 2.19~2.16 Ga 的辽吉花岗岩和长英质火山岩, 该期岩浆作用被认为是辽-吉活动带内最早的古元古代岩浆作用 (Xu and Liu, 2019 及文中参考文献)。该期岩浆岩具有 A2 型花岗岩的地球化学特征, 代表形成于大陆裂谷环境或弧后的伸展环境 (Li *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2005, 2012; Wang *et al.*, 2017b; Xu and Liu, 2019)。辽河群变基性岩形式时代略晚于 2.19~2.16 Ga 的中

酸性岩浆岩, 被认为克拉通岩石圈地幔之下软流圈在伸展环境下部分熔融, 形成熔体并混染地壳物质的产物 (Xu and Liu, 2019)。无论辽-吉变基性岩形成于哪种环境之下, 伸展形成洋盆的规模可能有限 (Zhao *et al.*, 2012; Xu and Liu, 2019), 若洋盆规模较大, 这些变基性岩应该具有典型的 MORB 地球化学特征, 而不是有显著的地壳物质混染的地球化学特征。洋盆打开后, 在古元古代晚期闭合, 造成辽河群经历角闪岩相-麻粒岩相变质作用 (刘平华等, 2017; Liu P H *et al.*, 2019; 本次研究)。

4.3 对宽甸地区钴矿化的指示意义

钴为相容元素, 其在地幔的含量可达 102×10^{-6} (Palme and O'Neill, 2014), 而地壳中的含量仅为 27×10^{-6} , 上地壳钴含量进一步降至 17×10^{-6} (Rudnick and Gao, 2014)。不同类型岩浆岩中, 超基性岩具有最高的 Co 含量, 基性岩的 Co 含量约为超基性岩的 50%, 而花岗岩中的 Co 含量仅为超基性岩的 ~5% (Williams-Jones and Vasyukova, 2022)。由于超基性-基性岩高的 Co 含量, 钴元素的富集成矿通常

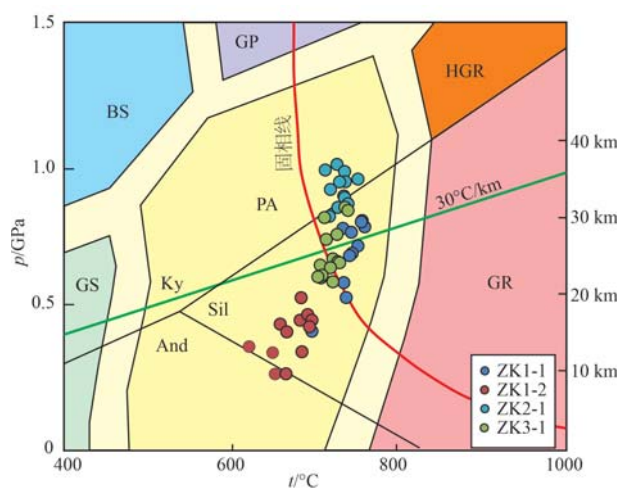


图8 变基性岩变质温压条件图(变质相划分根据

Zheng and Chen, 2017)

Fig. 8 p - t conditions of the metabasic rocks (modified after Zheng and Chen, 2017)

GS—绿片岩相; BS—蓝片岩相; PA—角闪岩相; GP—石榴辉石岩相; HGR—高压麻粒岩相; GR—麻粒岩相; Ky—蓝晶石; Sil—夕线石; And—红柱石

GS—greenschist facies; BS—blueschist facies; PA—plagioclase amphibolite facies; GP—garnet pyroxenite facies; HGR—high-p granulite facies; GR—granulite facies; Ky—kyanite; Sil—sillimanite; And—andalusite

被认为它们有关,超基性-基性岩经历硅酸盐-硫化物液态不混溶作用、后期热液改造和风化作用均可促进成矿(赵俊兴等, 2019; Williams-Jones and Vasyukova, 2022; Vasyukova and Williams-Jones, 2022)。例如,经典的沉积岩容矿型铜钴矿床模型认为成矿元素在盆地卤水的作用下萃取自“红层”或基性火山岩(Hitzman *et al.*, 2005, 2010)。前期研究表明,宽甸地区的钴赋存于里尔峪组的浅粒岩/变粒岩中,为变火山岩容矿型钴矿床。如前文所述,宽甸地区钴矿中变基性岩与前人报道的南、北辽河群里尔峪组变基性岩具有一致的地球化学特征,指示它们为同时期、同一构造环境下形成。除矿化的 ZK4-1 外,其他样品的 Co 含量为 $36.8 \times 10^{-6} \sim 47.9 \times 10^{-6}$, 平均值为 43.5×10^{-6} , 与前人报道的其他地区南辽河群以及北辽河群里尔峪组变基性岩 Co 含量相近(图 10)。该值也与全球基性岩平均 Co 含量($\sim 47 \times 10^{-6}$, Slack *et al.*, 2017)相当。前人研究表明,南辽河群变质温压条件普遍高于北辽河群。根据以上 Co 含量对比可见,南、北辽河群经历的不同级别变质作用可能均未引起变基性岩中钴的显著活化,表

明里尔峪组变基性岩可能不是宽甸地区钴矿化的主要成矿物质来源。

山西省中条山铜钴矿集区位于华北克拉通中部造山带南部,发育沉积岩容矿型铜钴矿,赋矿地层为古元古代中期变沉积岩,包括大理岩和含石墨的变沉积岩(邱正杰等, 2023)。宽甸地区出露变火山岩型铁钴矿,赋矿地层为里尔峪组(磁铁矿黄铁矿)浅粒岩或变粒岩。中条山铜钴矿和宽甸地区铁钴矿的赋矿地层,均经历古元古代晚期造山作用改造。如前文所述,变基性岩可能不是宽甸地区钴的主要成矿物质来源。同样,中条山矿区变基性岩可能也不是钴矿床的主要成矿物质来源(Qiu *et al.*, 2021; 邱正杰等, 2023)。Qiu 等(2021)通过对赋矿围岩篦子沟组黑色片岩中钴赋存状态进行研究,提出含钴黑色片岩是潜在的矿源层。宽甸地区钴元素源区可能也与富有机质的围岩有关,但仍需加强对富有机质的围岩中钴赋存状态的研究。中条山铜钴矿矿体分布规律显示,矿体在空间上总是与黑色片岩相毗邻,赋存在矿源层和白云石化大理岩之间(邱正杰等, 2023)。宽甸地区矿化的变基性岩(ZK4-1)尽管也表现出一定程度的钴富集(Co 含量为 88.8×10^{-6}),但远未达到工业品位,需加强对矿源层的识别,为进一步的矿体勘探提供依据。

5 结论

(1) 宽甸地区变基性岩经历了高角闪岩相变质作用改造,样品 ZK2-1 记录的温压为 $p = 0.82 \sim 1.00$ GPa 和 $t = 712 \sim 751^\circ\text{C}$,很可能代表变质峰期温压条件。ZK1-1 和 ZK3-1 中变质锆石年龄为 $1850 \sim 1854$ Ma,记录的温压分别为 $p = 0.42 \sim 0.81$ GPa 和 $t = 688 \sim 759^\circ\text{C}$ 、 $p = 0.59 \sim 0.85$ GPa 和 $t = 703 \sim 739^\circ\text{C}$,代表区域退变质阶段的温压条件。

(2) 宽甸地区变基性岩与前人报道的辽河群变基性岩具有相似的地球化学组成,原岩为古元古代中期拉斑玄武岩,其形成于伸展环境。辽河群变基性岩具有显著的地壳物质混染的地球化学特征,指示的洋盆规模可能有限。

(3) 宽甸地区里尔峪组变基性岩与辽-吉构造带内南、北辽河群里尔峪组变基性岩钴含量相近,表明里尔峪组含矿变基性岩可能不是该地区钴矿化的主要成矿物质来源。

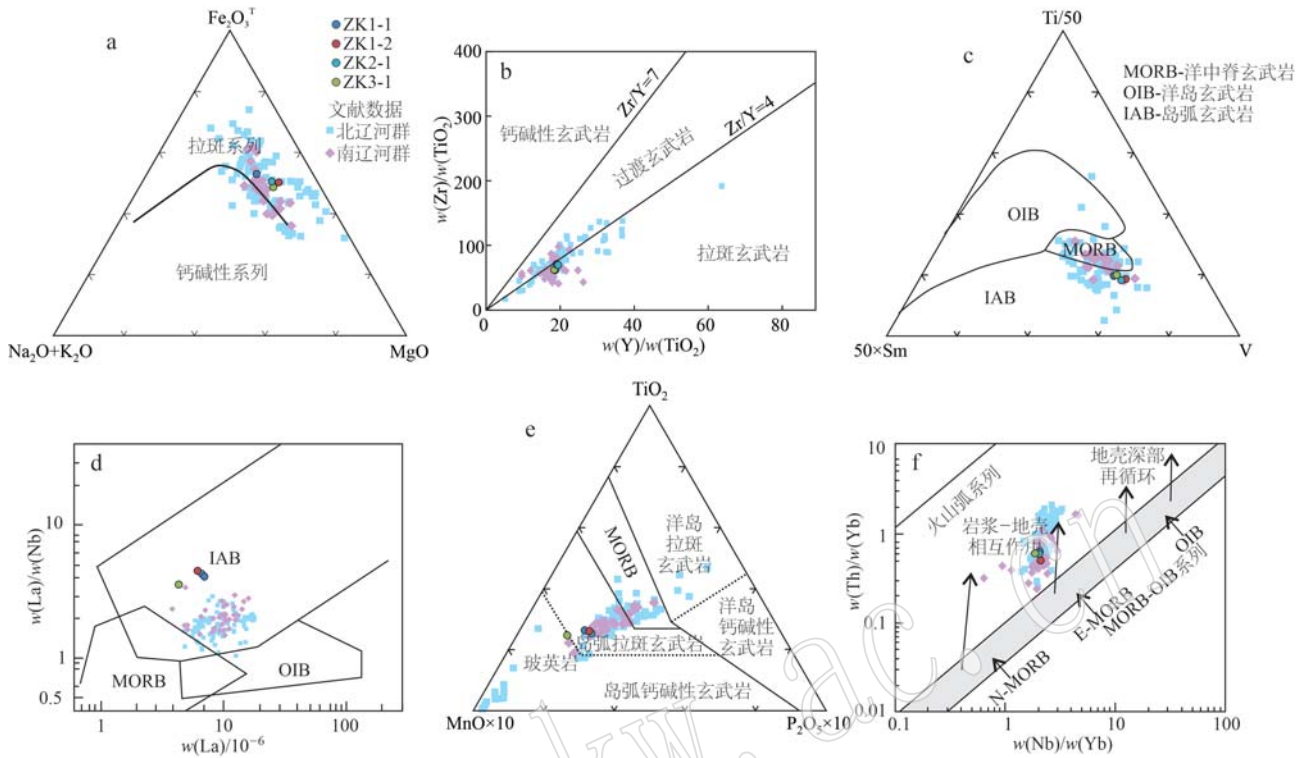


图 9 变基性岩构造判别图解

Fig. 9 Tectonic discrimination diagrams of meta-basic rocks

a—AFM 图解 (据 Irvine and Baragar, 1971); b— Zr/TiO_2 — Y/TiO_2 图解 (据 Barrett and MacLean, 1999); c—Ti—Sm—V 图解 (据 Vermeesch, 2006); d—La/Nb—La 图解 (据李曙光, 1993); e— TiO_2 —MnO— P_2O_5 图解 (据 Mullen, 1983); f—Th/Yb—Nb/Yb 图解 (据 Pearce, 2008)

a—AFM diagram (after Irvine and Baragar, 1971); b— Zr/TiO_2 — Y/TiO_2 diagram (after Barrett and MacLean, 1999); c—Ti—Sm—V diagram (after Vermeesch, 2006); d—La/Nb—La diagram (after Li Shuguang, 1993); e— TiO_2 —MnO— P_2O_5 diagram (after Mullen, 1983); f—Th/Yb—Nb/Yb diagram (after Pearce, 2008)

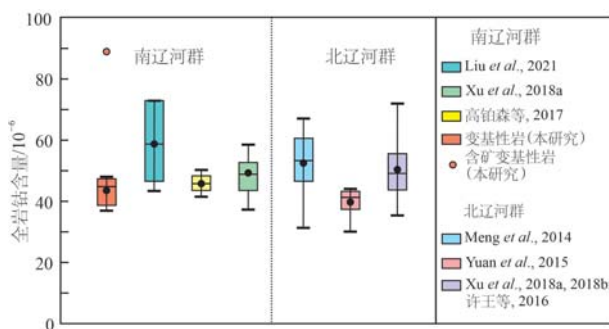


图 10 南、北辽河群中变基性岩全岩钴含量箱式图

Fig. 10 Box-plot of the whole rock cobalt contents of meta-basic rocks from the North and South Liaohe groups

致谢 感谢陈振宇研究员在电子探针矿物化学成分分析中给予的帮助; 感谢杨淳老师在锆石 SHRIMP U-Pb 定年工作中给予的帮助。感谢编辑老师和审稿专家认真审阅本文, 并提出许多宝贵的修改意见。

References

- Bai Jin. 1993. The Precambrian Geology and Pb-Zn Mineralization in the Northern Margin of North China Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House, 47~89 (in Chinese with English abstract).
- Barrett T J and MacLean W H. 1999. Volcanic sequences, lithogeochemistry, and hydrothermal alteration in some bimodal volcanic-associated massive sulfide systems[J]. Reviews in Economic Geology, 8: 101~131.
- Bhadra S and Bhattacharya A. 2007. The barometer tremolite+tschermakite+2 albite = 2 pargasite+8 quartz: Constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages[J]. American Mineralogist, 92: 491~502.
- Chen Jingsheng, Tian Dexin, Xing Dehe, et al. 2020. Zircon U-Pb geochronology and its geological significance of the basic volcanic rocks from the Li'eryu formation, Liaohe Group in Kuandian Area, Liaoning Province[J]. Earth Science, 45(9): 3 282~3 294 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1963. Rock-forming Minerals [M]. UK: The Geological Society Publishing House.
- Dong Chunyan, Ma Mingzhu, Liu Shoujie, *et al.* 2012. Middle Paleoproterozoic crustal extensional regime in the North China Craton: New evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of metagabbro in the Anshan-Gongchangling area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9): 2 785~2 792 (in Chinese with English abstract).
- Faure M, Lin W, Monié P, *et al.* 2004. Palaeoproterozoic arc magmatism and collision in Liao dong Peninsula (north east China) [J]. *Terra Nova*, 16: 75~80.
- Gao Bosen, Dong Yongsheng, Li Fuqiang, *et al.* 2017. Petrogenesis of the Lieryu Formation of the South Liaohe Group in the Huanghuadian area, Liaodong Peninsula [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2 725~2 742 (in Chinese with English abstract).
- Hitzman M W, Kirkham R, Broughton D, *et al.* 2005. The sediment-hosted stratiform copper ore system[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 627~639.
- Hitzman M W, Selley D and Bull S. 2010. Formation of sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits through Earth history[J]. *Economic Geology*, 105(3): 627~639.
- Holland T J B and Blundy J D. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 433~447.
- Irvine T N and Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523~548.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, 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.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names[J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Li S Z and Zhao G C. 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 158(1~2): 1~16.
- Li Sanzhong, Hao Defeng, Han Zongzhu, *et al.* 2003. Paleoproterozoic deep processes and tectono-thermal evolution in Jiao-Liao massif[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 328~340 (in Chinese with English abstract).
- Li S Z, Zhao G G, Sun M, *et al.* 2005. Deformation history of the Paleoproterozoic Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24: 659~674.
- Li Shouyi. 1994. The bimodal volcanic rocks and magma evolution in Liaoji paleo-rift[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 24(2): 143~147 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang. 1993. Ba-Th-Nb-La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(2): 146~157 (in Chinese with English abstract).
- Liu F L, Liu L S, Cai J, *et al.* 2019. A widespread Paleoproterozoic partial melting event within the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Zircon U-Pb dating of granitic leucosomes within pelitic granulites and its tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 326: 155~173.
- Liu Fulai, Liu Pinghua, Wang Fang, *et al.* 2015. Progresses and overviews of voluminous meta-sedimentary series within the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji orogenic/mobile belt, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2 816~2 846 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Zhang J, Liu Z H, *et al.* 2018. Geochemical and geochronological study on the Paleoproterozoic rock assemblage of the Xiuyan Region: New constraints on an integrated rift-and-collision tectonic process involving the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 310: 179~197.
- Liu J H, Wang X J and Chen H. 2021. Intracontinental extension and geodynamic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt, North China craton: Insights from coeval A-type granitic and mafic magmatism in eastern Liaoning Province[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 133(7~8): 1 765~1 792.
- Liu Pinghua, Cai Jia, Zou Lei. 2017. Metamorphic *P-T-t* path and its geological implication of the Sanjiazzi garnet amphibolites from the northern Liaodong Peninsula, Jiao-Liao-Ji belt: Constraints on phase equilibria and Zircon U-Pb dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2 649~2 674 (in Chinese with English abstract).
- Liu P H, Liu F L, Tian Z H, *et al.* 2019. Petrological and geochronological evidence for Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism of the South Liaohe Group in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 327: 121~143.
- Lu X P, Wu F Y, Guo J H, *et al.* 2006. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern Block in the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 146(3~4): 138~164.
- Ludwig K R. 2001. Squid 1.02: A User's Manual[M]. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, 2: 1~19.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, *et al.* 2004. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of the Liaohe Group in the Eastern Block of the North China Craton: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt[J]. *Precambrian Research*, 134(3~4): 349~371.
- Luo Y, Sun M, Zhao G C, *et al.* 2008. A comparison of U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the North and South Liaohe Groups: Constraints on the evolution of the Jiao-Liao-Ji Belt, North

- China Craton[J]. *Precambrian Research*, 163(3~4): 279~306.
- Ma Lijie, Cui Yingchun, Liu Junlai, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and the tectonic setting of amphibolites of the North Liaohe Group in Liaodong area[J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 30(4): 515~524 (in Chinese with English abstract).
- Meng E, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2014. Petrogenesis and tectonic significance of Paleoproterozoic meta-mafic rocks from central Liaodong Peninsula, northeast China: Evidence from zircon U-Pb dating and in situ Lu-Hf isotopes, and whole-rock geochemistry[J]. *Precambrian Research*, 247: 92~109.
- Mullen E D. 1983. $\text{MnO}/\text{TiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5$: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 62(1): 53~62.
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, *et al.* 2008. Zircon M257—A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247~265.
- Palme H and O'Neill H S. 2014. Cosmochemical estimates of mantle composition[C] \ Rudnick R L. *Treatise on geochemistry*. 2nd Edition. Oxford: Elsevier Ltd., 1~38.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 100(1~4): 14~48.
- Pearce J A and Cann J R. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290~300.
- Qiu Z J, Fan H R, Goldfarb R, *et al.* 2021. Cobalt concentration in a sulfidic sea and mobilization during orogenesis: Implications for targeting epigenetic sediment-hosted Cu-Co deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 305: 1~18.
- Qiu Zhengjie, Fan Hongrui, Yang Kuifeng, *et al.* 2023. Cobalt sources and enrichment processes of the Paleoproterozoic sedimentary rock-hosted Cu-Co deposits in the Zhongtiao Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(4): 1 019~1 029 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick R L and Gao S. 2014. Composition of the continental crust [C] \ Holland H D and Turekian K K. *Treatise on Geochemistry*. 2nd Edition. Amsterdam: Elsevier Ltd., 1~64.
- Slack J F, Kimball B E and Shedd K B. 2017. Cobalt[C] \ Schulz K J, DeYoung J H, Seal R R, *et al.* *Critical Mineral Resources of the United States: Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. Reston, V A: U. S. Geological Survey, F1~F40.
- Sláma J, Košler J, Condon D J, *et al.* 2008. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249(1~2): 1~35.
- Sun M, Armstrong R L, St J Lambert R, *et al.* 1993. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of the Paleoproterozoic Kuandian complex, the eastern Liaoning Province, China[J]. *Precambrian Research*, 62(1~2): 171~190.
- Sun Min, Zhang Lifei and Wu Jiahong. 1996. The origin of the early Proterozoic Kuandian complex: Evidence from geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 70(3): 207~222 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Vasyukova O V and Williams-Jones A E. 2022. Carbonatite metasomatism, the key to unlocking the carbonatite-phoscorite-ultramafic rock paradox[J]. *Chemical Geology*, 602: 120888.
- Vermeesch P. 2006. Tectonic discrimination diagrams revisited[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(6): 006017.
- Walker K R, Jopin G A, Lovering J F, *et al.* 1960. Metamorphic and metasomatic convergence of basic igneous rocks and lime magnesia sediments of the Precambrian of north-western Queensland[J]. *Journal of Geological Society of Australia*, 6: 149~178.
- Wang F, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2017a. In situ zircon U-Pb dating and whole-rock geochemistry of metasedimentary rocks from South Liaohe Group, Jiao-Liao-Ji orogenic belt: Constraints on the depositional and metamorphic ages, and implications for tectonic setting[J]. *Precambrian Research*, 303: 764~780.
- Wang F, Liu F L, Schertl H P, *et al.* 2020. Detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of the Liaohe Group, Jiao-Liao-Ji Belt: Implications for the Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 340: 105633.
- Wang X P, Peng P, Wang C, *et al.* 2016. Petrogenesis of the 2115 Ma Haicheng mafic sills from the Eastern North China Craton: Implications for an intra-continental rifting[J]. *Gondwana Research*, 39: 347~364.
- Wang X P, Peng P, Wang C, *et al.* 2017b. Nature of three episodes of Paleoproterozoic magmatism (2 180 Ma, 2 115 Ma and 1 890 Ma) in the Liaoji belt, North China with implications for tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 298: 252~267.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[J]. *Reviews in Economic Geology*, 7: 1~35.
- Williams-Jones A E and Vasyukova O V. 2022. Constraints on the genesis of cobalt deposits: Part I. theoretical considerations[J]. *Economic Geology*, 117(3): 513~528.
- Winchester J A and Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed basic igneous rocks [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 28(3): 459~469.
- Xu W and Liu F L. 2019. Geochronological and geochemical insights into the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji Belt, Sino-

- Korean Craton[J]. *Earth-Science Reviews*, 193; 162~198.
- Xu Wang, Liu Fulai, Liu Chaohui. 2017. Petrogenesis and geochemical characteristics of the North Liaohe metabasic rocks, Jiao-Liao-Ji orogenic belt and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2 743~2 757 (in Chinese with English abstract).
- Xu W, Liu F L, Liu P H, *et al.* 2020. Paleoproterozoic transition in tectonic regime recorded by the Eastern Block of the North China Craton: Evidence from detrital zircons of the Langzishan Formation, Jiao Liao Ji Belt[J]. *International Geology Review*, 62(2): 168~185.
- Xu W, Liu F L, Santosh M, *et al.* 2018a. Constraints of mafic rocks on a Paleoproterozoic back-arc in the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166: 195~209.
- Xu W, Liu F L, Tian Z H, *et al.* 2018b. Source and petrogenesis of Paleoproterozoic meta-mafic rocks intruding into the North Liaohe Group: Implications for back-arc extension prior to the formation of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 307: 66~81.
- Yang S Y, Jiang S Y, Mao Q, *et al.* 2022. Electron probe microanalysis in geosciences: Analytical procedures and recent advances[J]. *Atomic Spectroscopy*, 43: 186~200.
- Yu Jiejiang, Yang Debin, Feng Hong, *et al.* 2007. Chronology of amphibolite protolith in Haicheng of southern Liaoning: Evidence from LA-ICP-MS zircon U-Pb dating[J]. *Global Geology*, 26 (4): 391~396 (in Chinese with English abstract).
- Yuan L L, Zhang X H, Xue F H, *et al.* 2015. Two episodes of Paleoproterozoic mafic intrusions from Liaoning Province, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Precambrian Research*, 264: 119~139.
- Zhang Qiusheng and Yang Zhensheng. 1988. Early Crust and Mineral Deposits of Liaodong Peninsula, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 218~450 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yong, Ding Jianhua, Song Quanheng, *et al.* 2023. Metallogenic regularity, genetic type and potential prospects of cobalt deposits in Northeast China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 53(3): 693~712 (in Chinese with English abstract).
- Zhao G C, Cawood P A, Li S Z, *et al.* 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222: 55~76.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Research*, 136(2): 177~202.
- Zhao Junxing, Li Guangming, Qin Kezhang, *et al.* 2019. A review of the types and ore mechanism of the cobalt deposits[J]. *Chinese Science Bulletin*, 64(24): 2 484~2 500 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y F and Chen R X. 2017. Regional metamorphism at extreme conditions: Implications for orogeny at convergent plate margins[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145: 46~73.
- ### 附中文参考文献
- 白 瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 47~89.
- 陈井胜, 田德欣, 邢德和, 等. 2020. 辽宁宽甸地区辽河群里尔峪组基性火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *地球科学*, 45 (9): 3 282~3 294.
- 董春艳, 马铭铄, 刘守偈, 等. 2012. 华北克拉通元古代中期伸展体制新证据: 鞍山-弓长岭地区变质辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和全岩地球化学[J]. *岩石学报*, 28(9): 2 785~2 792.
- 高铂森, 董永胜, 李富强, 等. 2017. 辽东黄花甸地区南辽河群里尔峪组成因研究[J]. *岩石学报*, 33(9): 2 725~2 742.
- 李三忠, 郝德峰, 韩宗珠, 等. 2003. 胶辽地块古元古代构造-热演化与深部过程[J]. *地质学报*, 77(3): 328~340.
- 李守义. 1994. 辽吉古裂谷中的双峰式火山岩及岩浆演化[J]. *长春地质学院学报*, 24(2): 143~147.
- 李曙光. 1993. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J]. *岩石学报*, 9(2): 146~157.
- 刘福来, 刘平华, 王 舫, 等. 2015. 胶-辽-吉古元古代造山/活动带巨量变沉积岩系的研究进展[J]. *岩石学报*, 31(10): 2 816~2 846.
- 刘平华, 蔡 佳, 邹 雷. 2017. 辽东半岛北部三家子石榴斜长角闪岩变质演化 $P-T-t$ 轨迹及其地质意义: 来自相平衡模拟与锆石 U-Pb 定年的约束[J]. *岩石学报*, 33(9): 2 649~2 674.
- 马立杰, 崔迎春, 刘俊来, 等. 2007. 辽东北辽河群斜长角闪岩的地球化学特征及构造背[J]. *山西大学学报*, 30(4): 515~523.
- 邱正杰, 范宏瑞, 杨奎峰, 等. 2023. 中条山古元古代沉积岩容矿型铜钴矿床钴来源及富集过程[J]. *岩石学报*, 39(4): 1 019~1 029.
- 孙 敏, 张立飞, 吴家弘. 1996. 早元古代宽甸杂岩的成因: 地球化学证据[J]. *地质学报*, 70(3): 207~222.
- 许 王, 刘福来, 刘超辉. 2017. 胶-辽-吉造山带北辽河变基性岩的成因、地球化学属性及其构造意义[J]. *岩石学报*, 33(9): 2 743~2 757.
- 于介江, 杨德彬, 冯 虹, 等. 2007. 辽南海城斜长角闪岩原岩的形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据[J]. *世界地质*, 26 (4): 391~396, 408.
- 张 勇, 丁建华, 松权衡, 等. 2023. 东北地区富钴矿床成矿规律、成因类型与远景预测[J]. *东北大学学报(地球科学版)*, 53(3): 693~712.
- 张秋生, 杨振声. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~546.
- 赵俊兴, 李光明, 秦克章, 等. 2019. 富含钴矿床研究进展与问题分析[J]. *科学通报*, 64(24): 2 484~2 500.