https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.016



华北克拉通中部带云中山石榴斜长 角闪岩变质演化及其构造意义

郭敏洁^{1,2}, 钱加慧^{1,2*}, 尹常青^{1,2}, 张 健^{1,2}, 卢成森^{1,2}

广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室,中山大学地球科学与工程学院,广东珠海 519082
南方海洋科学与工程广东省实验室,广东珠海 519082

摘 要:云中山地体位于华北克拉通中部造山带中部,是衔接吕梁地体和五台-恒山地体的关键位置.确定云中山地体的变质作用演化历史可为深入理解吕梁-云中山-五台-恒山地区的整体地质过程提供重要限定.对云中山石榴斜长角闪岩开展了详细的岩石学、相平衡模拟和锆石年代学研究.两个代表性样品均具有顺时针变质*P-T-t*轨迹,峰期阶段位于金红石稳定域,温压条件分别为0.96±0.11 GPa/720±8.0℃(L1903)和1.26±0.08 GPa/756±14.0℃(L1906);峰期后发生降压作用,金红石转变成钛铁矿,石榴石边部生长斜长石(+普通角闪石)冠状边,普通角闪石转变成镁铁闪石;晚期阶段以冷却为主,石榴石的边部出现少量绿泥石交代.对两个样品的岩石组构和化学成分对比表明,石榴斜长角闪岩的部分熔融受全岩成分影响,岩石贫硅钠而富铁镁钛时难熔,反之则易熔.样品变质锆石的U-Pb定年结果为1928~1806 Ma.这些锆石相对富集重稀土,利用锆石 Ti 温度计计算的结晶温度为520~680℃,与岩石的冷却温度相近,因此所获年龄应代表退变冷却时代.吕梁-云中山-五台-恒山地区的整体地质特征对比表明,云中山地体的岩石-地层组成和变质作用演化与五台-恒山地体非常相似,记录了古元古代晚期的碰撞造山事件.

关键词:华北克拉通;云中山地体;石榴斜长角闪岩;变质*P-T-t*轨迹;构造意义;岩石学.

中图分类号: P588 **文章编号:** 1000-2383(2021)11-3892-18 **收稿日期:** 2021-01-02

Metamorphic Evolution and Tectonic Implications of Garnet Amphibolite from Yunzhongshan Terrane in Central North China Craton

Guo Minjie^{1,2}, Qian Jiahui^{1,2*}, Yin Changqing^{1,2}, Zhang Jian^{1,2}, Lu Chengsen^{1,2}

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources & Geological Processes, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai 519082, China

Abstract: The Yunzhongshan terrane is situated in the middle segment of the Trans-North China Orogen, a key position connecting the Lüliang and Wutai-Hengshan terranes. Addressing its metamorphic evolution is of great importance in understanding the tectonic process of the Lüliang-Yunzhongshan-Wutai-Hengshan areas. Detailed studies of petrology, phase modelling and geochronology were carried out on garnet amphibolite from the Yunzhongshan terrane. Both samples exhibit clockwise P-T-t paths, which are characterized by rutile-bearing peak stages with P-T conditions of 0.96 ± 0.11 GPa/720 \pm 8.0 °C (L1903) and 1.26 ± 0.08 GPa/756 \pm 14.0 °C (L1906), respectively. The post-peak stages are dominated by decompression,

引用格式:郭敏洁,钱加慧,尹常青,等,2021.华北克拉通中部带云中山石榴斜长角闪岩变质演化及其构造意义.地球科学,46(11):3892-3909.

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos. 41972197, 41890831);广东省基础与应用基础研究基金项目(No. 2019A1515012189);中央高校 基本科研业务费(No. 18lgpy17).

作者简介:郭敏洁(1996-),女,硕士生,主要从事变质地质学研究.ORCID:0000-0002-4539-5523.E-mail:guomj5@mail2.sysu.edu.cn * 通讯作者:钱加慧,ORCID:0000-0003-1119-8035.E-mail:qianjh5@mail.sysu.edu.cn

accompanied by transition of rutile by ilmenite, growth of plagioclase (+hornblende) coronae surrounding garnet and transition of hornblende by cummingtonite. The late stages are dominated by cooling, with local metasomatism of garnet by chlorite. By comparing petrographical features and chemical compositions of the two samples, it can be concluded that the partial melting of garnet amphibolite is affected by the bulk-rock compositions. The rock is refractory when it is rich in Fe, Mg and Ti and poor in Si and Na. Zircon U-Pb dating yields metamorphic ages of 1 928–1 806 Ma, interpreted to represent the cooling stage of metamorphism. This is supported by high concentration of HREE in zircon grains and low crystallization temperatures of 520– 680 °C calculated by Ti-in-zircon thermometer. Comparison of the overall geological characteristics of the Lüliang-Yunzhongshan-Wutai-Hengshan areas shows that the lithostratigraphic units and metamorphism evolution in the Yunzhongshan terrane are very similar to those in the Wutai-Hengshan terranes, which record the Late Paleoproterozoic collision orogeny.

Key words: North China Craton; Yunzhongshan terrane; garnet amphibolite; *P*-*T*-*t* path; tectonic implication; petrology.

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一,由 多个微陆块在新太古代晚期至古元古代时期拼合而 成 (Zhao et al., 2005, 2012; Faure et al., 2007; Kusky, 2011; Zhai and Santosh, 2011; Wei et al., 2014).Zhao et al.(2005, 2012)在华北克拉通西部划 分出阴山地块和鄂尔多斯地块,两者于1.95 Ga拼合 形成西部陆块;在华北克拉通东部划分了龙岗地块 和狼林地块,两者在1.92 Ga汇聚形成东部陆块;东-西陆块的最终碰撞拼合发生在1.85 Ga,形成中部造 山带.近年来,许多学者在中部造山带的不同地区开 展了锆石年代学研究,陆续发现了大量老于1.90 Ga 的变质年龄(Qian et al., 2013, 2015, 2017, 2018; Zhang et al., 2013; Wei et al., 2014; Qian and Wei, 2016; Wang et al., 2016; Zhang et al., 2016; Wu et al., 2017; Xiao et al., 2017, 2019; Zhao et al., 2017). Wei et al. (2014) 和 Qian et al. (2017) 基于五 台-恒山-阜平地区的变质年代学格架,提出中部 造山带的碰撞主期为1.95 Ga,接续发生了加厚地 壳的快速抬升与缓慢冷却.而后,魏春景(2018)和 Qian et al. (2019)又在恒山中部的朱家坊韧性剪 切带中识别出1.85 Ga的晚期变质-变形事件,该 事件导致北恒山高级变质地体的最终折返(Qian et al., 2021).上述系列发现,为进一步深入理解 华北克拉通的构造演化过程带来了新的视角.

云中山地体位于中部造山带吕梁地体的东北侧,是衔接吕梁地体和五台-恒山地体之间的"桥梁".前人在吕梁地体和五台-恒山地体开展了大量变质作用研究.如在吕梁中西部,于津海等(2004)根据变泥质岩的矿物组合和成岩格子限定了顺时针P-T轨迹,峰期温压条件为0.40~0.60 GPa/650~710℃;Zhao et al.(2010)在石榴斜长角闪岩中也得到顺时针P-T轨迹,峰期温压条件为0.83~0.92 GPa/748~753℃,峰后发生近等温降压作用.

在吕梁东南部, Xiao et al. (2017, 2019)从基性麻粒 岩和泥质麻粒岩中获得的P-T轨迹均为顺时针型, 峰期温压条件分别为0.94 GPa/790 ℃和0.70 GPa/ 750 ℃; Zhao et al. (2017) 在泥质麻粒岩中获得的峰 期温度更高,达0.56~0.86 GPa/815~838 ℃.五台-恒山地体的变质作用以从南往北的中压相系(蓝晶 石型)递增演化为特征,其中五台岩群、南恒山和北 恒山杂岩的代表性峰期温压条件分别为1.10 GPa/ 670 °C、1.20 GPa/745 °C和 1.50 GPa/760~830 °C (Zhang et al., 2013; Wei et al., 2014; Qian and Wei, 2016; Qian et al., 2017, 2019). 上述数据表 明,吕梁地体与五台-恒山地体在峰期温压条件上 存在较明显的差异.因此,地处两者中间的云中 山地体似乎显得尤为关键,其变质作用演化是否 也显示"衔接"两侧的特征?或类似某一侧?亦或 独具特色?厘清上述科学问题,尤其是利用相平 衡模拟方法建立起云中山地体的 P-T-t轨迹,将 为揭示中部造山带的地质过程提供重要限定.

石榴斜长角闪岩常显示斑状变晶和冠状边("白眼圈")结构,在造山带变质作用研究中具有重要价值(Qian and Wei, 2016).同时,此类岩石的变质矿物组合与结构特征还能较敏感地反映出岩石的化学组成特征和*P-T*条件变化,为深入揭示造山演化过程提供直接证据.本文重点开展云中山石榴斜长角闪岩的岩石学、矿物化学、相平衡模拟以及年代学研究,构建岩石的变质*P-T-t*轨迹,探讨变质作用的地质意义.

1 地质背景与野外观察

华北克拉通中部造山带贯穿南北,长约为 1 200 km,宽约为100~300 km,主要由中低级到 高级变质地体组成(图 1a).吕梁地体位于中部造 山带的中段西部,主要由前寒武纪变质表壳岩和



图 1 华北克拉通中部造山带构造简图(a)和吕梁-云中山地区地质图(b) Fig.1 Simplified tectonic map of the Trans-North China Orogen (a) and geological map of the Lüliang-Yunzhongshan area (b) a.据Zhao et al.(2007); b.据Zhao et al.(2008)和王惠初等(2020)修改.图 a中变质杂岩体缩写; HS.恒山; WF.五台; FP.阜平

花岗质侵入岩组成(图1b).其中,变质表壳岩可进 一步划分为界河口群、吕梁群和野鸡山群.

界河口群主要分布于吕梁地体的西北部,少 量分布于东南部,主要由角闪岩相-麻粒岩相变质 的含石墨泥质片岩、长英质副片麻岩、大理岩、石 英岩和少量斜长角闪岩组成(Zhao et al., 2008). 由于界河口群的岩石组合和地球化学特征与华北 克拉通西部陆块孔兹岩带具有相似性,一些学者 推测其形成于鄂尔多斯地块东缘的被动大陆边缘 盆地,而后在东-西部陆块碰撞过程中成为中部造 山带的一部分(Wan et al., 2006).界河口群大量 碎屑锆石的U-Pb年龄在2.30~2.00 Ga范围(Wan et al., 2006),部分老碎屑锆石为2.75~2.50 Ga, 表明源区存在太古宙的岩石(杨崇辉等, 2018). 变质锆石U-Pb定年和独居石Th-U-Pb定年得到 的变质时代为1.95~1.80 Ga(Xiao et al., 2017, 2019; Zhao et al., 2017; Liu et al., 2020).

吕梁群仅分布于吕梁地体的中部,总体走向近南北.该群经历了绿片岩相-高角闪岩相变质,下部由各种变质砂岩、粉砂岩组成,上部由变基性火山岩和变质流纹岩组成(于津海等,2004).多数学者认为吕梁群形成于古元古代中期(2050~2360 Ma;于津

海等,2004;Liu et al.,2012,2020).但最近王惠初等(2020)从侵入吕梁群的辉长岩中获得了2.52~2.53 Ga的锆石结晶年龄,提出吕梁群形成于新太古代晚期,而非古元古代.吕梁群的形成构造环境也存在争议,主要有裂谷、活动大陆边缘弧或弧后盆地等多种认识(Liu et al.,2012).

野鸡山群呈北东-南西向狭长带状展布于吕 梁地体的西北部,东、西分别与赤坚岭花岗片麻 岩、界河口群呈断层接触.野鸡山群自下而上可 分为青杨树湾组、白龙山组和程道沟组,整体经 历了绿片岩相变质.青杨树湾组底部为变质碎屑 岩,向上为长石石英砂岩和粉砂岩,夹大理岩;白 龙山组和程道沟组分别以变质基性火山岩和变 质泥砂质沉积岩为主(刘树文等,2009;杨崇辉 等,2018).野鸡山群变质沉积岩具有新太古代晚 期至古元古代晚期的碎屑锆石年龄,最年轻的年 龄峰值为1.87~1.84 Ga(Wang *et al.*,2017).

花岗质侵入岩可根据形成时代划分为早期和 晚期两大类型.早期以呈现片麻状构造为特征,包 括盖家庄片麻状花岗岩(2.40~2.36 Ga;耿元生等, 2006;Zhao et al., 2008)和赤坚岭-关帝山片麻状花 岗岩(2.20~2.15 Ga;刘树文等, 2009;Zhao et al.,



图 2 云中山地体石榴斜长角闪岩样品的野外照片

Fig.2 Field photographs of garnet amphibolite samples in the Yunzhongshan terrane

表1 云中山地体石榴斜长角闪岩样品的全岩成分及标准化摩尔比

Table 1 Bulk-rock compositions and their normalized mole-proportions of garnet amphibolite samples from the Yunzhongshan terrane

质量百分比(wt.%)	SiO_2	${\rm TiO}_2$	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	$\mathrm{Fe_2O_3}^\mathrm{T}$	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	$\mathrm{P_2O_5}$	LOI	$X_{\rm Mg}$
L1903	48.31	2.27	14.06	17.41	0.23	5.89	9.61	0.81	0.40	0.38	0.30	0.40
L1906.01	60.60	0.68	17.24	7.32	0.12	2.32	5.81	4.43	0.60	0.13	0.52	0.39
L1906 ₋₀₂	61.96	0.67	16.98	6.60	0.10	2.09	6.13	4.22	0.40	0.12	0.35	0.39
摩尔比(%)	H_2O	SiO_2	$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	CaO	MgO	FeO	K_2O	Na_2O	TiO_2	0	$X_{\rm Mg}$	
L1903		52.80	9.06	10.66	9.59	14.32		0.85	1.86	0.85	0.40	图 7a、7b
L1906-02	0.00	67.58	10.91	6.98	3.40	5.41	0.28	4.46	0.55	0.43	0.39	图 7c
L1906-02	5.00	64.20	10.37	6.63	3.23	5.14	0.26	4.24	0.52	0.40	0.39	图 7c
L1906.02	1.68	66.45	10.73	6.86	3.34	5.32	0.27	4.38	0.54	0.42	0.39	图 7d

注:X_{Mg}=Mg/(Mg+Fe)(mol%);Fe₂O₃^T代表全铁;L1906₋₀₁和L1906₋₀₂表示采自同一块岩石样品,进行主量成分平行对比测试,其中L1906₋₀₂用于下文相平衡模拟.

2020).晚期花岗岩则以弱变形或无变形为特征, 包括惠家庄花岗岩(1.90~1.83 Ga;耿元生等, 2006;Zhao et al., 2008)和芦芽山紫苏花岗岩、芦 草沟斑状花岗岩以及关帝山块状花岗岩(1.82~ 1.76 Ga;耿元生等, 2006;Zhao et al., 2008).

云中山地体位于吕梁地体的东北部,北段划归 五台岩群,主要由黑云斜长片麻岩、黑云变粒岩、斜 长角闪岩和云母石英片岩等组成;南段包括新太古 代TTG片麻岩、古元古代云中山花岗岩、新太古代 片麻状花岗岩和古元古代三交组(图1b).其中,新 太古代TTG片麻岩的形成时代为~2.50 Ga(Zhao *et al.*, 2008;康健丽等, 2017;米广尧等, 2018;王惠 初等, 2018),古元古代云中山花岗岩的形成时 代为~1.80 Ga(Zhao *et al.*, 2008).云中山地体变 质作用研究程度较低,缺少确切的研究数据.

在云中山新太古代TTG片麻岩中,经常可见透 镜体状的(石榴)斜长角闪岩.本文选取了两个代表 性石榴斜长角闪岩样品进行研究,L1903样品位于上 马 圈 村 南 侧 200~300 m 的 道 路 西 侧 (38° 24′43.256″N/112°23′50.262″E),岩石中可见明显的 石榴石变斑晶,无长英质脉体(图2a);L1906样品来 自枪杆村南侧(38°24′26.629″N/112°15′14.841″E), 石榴石变斑晶相对较为细小,可见明显的部分熔融 现象,以尺度不一的长英质脉或团块为特征(图2b).

2 岩石学特征

2.1 全岩化学

石 榴斜长角闪岩样品的全岩主量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司利用日本理学 ZSX Primus II型波长色散型 X射线荧光光谱仪(XRF)完成.测试条件:电压为50 kV,电流为60 mA;测试相对标准偏差(RSD)<2%.分析结果列在表1中.

不同的石榴斜长角闪岩样品在全岩成分上显示了较明显的差异(表1),L1903样品相对富集 Fe₂O₃^T(17.41%)、MgO(5.89%)和TiO₂(2.27%), 贫SiO₂(48.31%)和Na₂O(0.81%);L1906样品则相

果
ťΠ
1 L
下
t3
4
崧
M-
电
玓
吜
样
)(
6
Ξ
문
ŝ
90
Ξ
цп
2
価
()
*
余
褶
ЧЧ
筷
茗
Ξ
⊕
١þ
-
7
表

样品						L1905	~									LJ	9061				
矿物	g-C	g-R1	g-R2 p	1-包体 p	1-基质	hb-包体	hb-基质1	hb-基质2	chl	cumm	ilm	g-C	g-R1	g-R2	hb-冠状边	hb-基质1	hb-基质2	pl-冠状边	pl-基质	chl	ilm
SiO_2	36.71	37.87	36.89	45.56	43.85	43.24	42.51	42.59	27.95	52.40	0.04	34.97	35.72	36.61	41.20	41.20	42.34	54.80	58.41	21.95	0.01
${\rm TiO}_2$	0.11	00.00	0.06	0.02	0.67	0.84	0.70	0.83	1.35	0.05	54.04	0.04	0.02	0.00	0.73	0.64	0.49	0.02	0.02	0.02	51.06
$\mathrm{Al}_{2}\mathrm{O}_{3}$	20.83	20.74	20.38	34.70	12.02	13.23	12.54	14.10	16.48	0.70	0.01	20.54	20.50	20.52	13.40	13.07	13.26	23.83	23.71	19.78	0.00
Cr_2O_3	0.08	0.06	0.01	0.03	0.03	0.07	0.04	0.06	0.05	0.00	0.07	0.02	0.00	0.05	0.05	0.00	0.02	00.00	0.02	0.03	0.02
$\mathrm{Fe_2O_3}$	2.79	1.01	1.58	0.14	21.48	0.88	3.57	2.28	00.00	0.08	0.00	3.00	1.82	0.87	5.28	4.56	2.88	0.71	0.00	0.00	1.52
FeO	25.83	29.10	29.53	0.00	0.00	15.33	14.65	15.85	27.02	29.70	46.63	29.51	30.25	32.05	14.67	14.43	14.97	0.00	0.00	37.80	45.31
MnO	1.61	1.39	2.10	0.00	0.07	0.11	0.09	0.14	0.04	0.49	0.59	1.24	1.65	2.01	0.12	0.22	0.19	0.06	0.00	0.65	0.53
MgO	2.38	2.33	1.87	0.00	8.37	8.74	8.47	7.98	12.06	13.23	0.25	3.39	2.67	2.10	7.75	8.11	8.10	0.04	0.00	4.00	0.02
CaO	9.50	8.18	7.09	19.29	11.46	11.80	11.24	11.49	0.44	0.80	0.07	3.86	4.61	4.53	10.79	11.06	11.08	9.39	5.60	0.07	0.00
$\rm Na_2O$	0.02	0.03	0.02	1.02	0.87	1.00	0.87	1.04	0.10	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	1.14	1.21	1.01	7.10	8.24	0.06	0.01
$\rm K_2O$	0.01	00.00	0.00	0.00	0.34	0.43	0.36	0.44	0.57	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.35	0.26	0.05	0.17	0.00	0.00
Totals	99.87 1	00.71	99.53]	00.76	99.16	95.67	95.04	96.80	86.06	97.47	101.73	96.59	97.27	98.77	95.45	94.85	94.60	96.00	96.17	84.36	98.48
Oxygens	12.00	12.00	12.00	8.00	8.00	23.00	23.00	23.00	14.00	23.00	3.00	12.00	12.00	12.00	23.00	23.00	23.00	8.00	8.00	14.00	3.00
Si	2.93	3.00	2.98	2.09	2.19	6.54	6.50	6.41	3.04	7.93	0.00	2.90	2.95	2.99	6.32	6.35	6.50	2.58	2.70	2.62	0.00
Ti	0.01	00.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.08	0.09	0.11	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.95
Al	1.96	1.94	1.94	1.88	0.71	2.36	2.26	2.50	2.11	0.13	0.00	2.01	1.99	1.98	2.42	2.38	2.40	1.33	1.29	2.79	0.00
Cr	0.01	00.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$\mathrm{Fe}^{\mathrm{3+}}$	0.17	0.06	0.10	0.01	0.81	0.10	0.41	0.26	00.00	0.01	0.00	0.19	0.11	0.05	0.61	0.53	0.33	0.03	0.00	0.00	0.03
$\mathrm{F}\mathrm{e}^{2+}$	1.72	1.93	1.99	0.00	0.00	1.94	1.87	1.99	2.46	3.76	0.96	2.05	2.09	2.19	1.88	1.86	1.92	0.00	0.00	3.78	0.97
Mn	0.11	0.09	0.14	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.06	0.01	0.09	0.12	0.14	0.02	0.03	0.03	0.00	0.00	0.07	0.01
Mg	0.28	0.28	0.23	0.00	0.62	1.97	1.93	1.79	1.96	2.98	0.01	0.42	0.33	0.26	1.77	1.86	1.85	0.00	0.00	0.71	0.00
Са	0.81	0.70	0.61	0.95	0.61	1.91	1.84	1.85	0.05	0.13	0.00	0.34	0.41	0.40	1.77	1.83	1.82	0.47	0.28	0.01	0.00
Na	0.00	0.01	0.00	0.09	0.08	0.29	0.26	0.30	0.02	0.00	0.00	00.00	0.01	0.01	0.34	0.36	0.30	0.65	0.74	0.01	0.00
К	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.07	0.08	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.07	0.05	0.00	0.01	0.00	0.00
$X(\overline{w}, \underline{w})$	0.10	0.09	0.08	0.91	0.88	0.90	0.76	0.91	0.44			0.15	0.12	0.09	0.74	0.73	0.89	0.42	0.27	0.16	
$Y(\overline{w}, \overline{w})$	0.29	0.24	0.22			0.10	0.08	0.09				0.12	0.14	0.14	0.08	0.07	0.06				





Fig.3 Photomicrographs of garnet amphibolite samples from the Yunzhongshan terrane a. (L1903)石榴石变斑晶包裹普通角闪石、金红石、钛铁矿和石英,"包裹体"型斜长石生长于裂隙,长红线表示石榴石成分环带的位 置;b. (L1903)石榴石变斑晶包裹普通角闪石、钛铁矿和石英,"包裹体"型斜长石生长于裂隙;石榴石边部可见绿泥石交代,普通角 闪石可见镁铁闪石边;c. (L1903)基质矿物主要为普通角闪石、斜长石、钛铁矿、镁铁闪石和石英;d. (L1906)石榴石变斑晶被斜长 石(+普通角闪石)冠状边结构包围.斜长石的An值从冠状边向基质逐渐降低;e. (L1906)石榴石含有钛铁矿和石英包裹体;f. (L1906)基质矿物组成主要为普通角闪石、斜长石、钛铁矿和石英

对富集 SiO₂(60.60%~61.96%)和 Na₂O(4.22%~ 4.43%),贫 Fe₂O₃^T(6.60%~7.32%)、MgO (2.09%~2.32%)和 TiO₂(0.67%~0.68%).

2.2 岩相学与矿物化学

石榴斜长角闪岩样品的矿物化学成分测试在 中山大学物质成分分析实验室的 SHIMADZU-1720HT型电子探针上进行,测试条件:加速电压 为15 kV,电子流为20 nA,束斑为1 μm.采用 SPI公司的天然矿物和合成矿物进行标准化,分 析的相对误差小于2%.分析结果列于表2.文中 使用的矿物名称缩写参照 Holland and Powell (2011).g代表石榴石; hb代表角闪石; cumm代 表镁铁闪石; pl代表斜长石; ru代表金红石; ilm 代表钛铁矿; chl代表绿泥石; ep代表绿帘石; dio 代表透辉石; bi代表黑云母; opx代表斜方辉石; mt代表磁铁矿; q代表石英; L代表熔体.

2.2.1 L1903样品 该样品显示斑状变晶结构,石 榴石变斑晶呈半自形粒状,粒径为4~7mm,含有普 通角闪石、钛铁矿、金红石和石英等矿物包裹体, "包裹体"样式的斜长石一般生长于裂隙中,可能属 于后期生长(图3a,3b).石榴石边部发育斜长石(+ 普通角闪石)冠状边,局部出现晚期绿泥石交代(图 3b).基质矿物主要为普通角闪石、斜长石、钛铁矿和 石英(图3c).其中,部分普通角闪石的边部转变为



Fig.4 Compositional zoning of garnet in the garnet amphibolite samples from the Yunzhongshan terrane 镁铝榴石(X_{py}=Mg/(Fe²⁺+Mg+Ca+Mn);X_{gr},X_{sps},X_{alm}定义方式相同)、钙铝榴石X_{gr}、锰铝榴石X_{sps}和铁铝榴石X_{alm}.R1、C和R2分别与表2、 图 3a和图 3d对应



图 5 云中山地体石榴斜长角闪岩样品的斜长石 An 值图解(a)和角闪石成分分类图(b)

Fig.5 A diagram showing the An value of plagioclase compositions (a) and a classification diagram showing compositions of hornblende (b) in garnet amphibolite samples from the Yunzhongshan terrane

颜色更浅的镁铁闪石(图 3b, 3c).石榴石从核到 边,镁铝榴石含量(X_{pv} =Mg/(Fe²⁺+Mg+Ca+ Mn); X_{gr} , X_{alm} , X_{sps} 的定义方式同理)略微降低(= 0.10~0.08), 锰铝榴石略微增加(X_{sps}=0.03~ (0.05),钙铝榴石明显降低($X_{gr}=0.29\sim0.21$),铁铝 榴石显著升高(X_{am}=0.57~0.67),总体具有扩散 环带特征(图4a).不同产状的斜长石成分变化不 明显,"包裹体"型、基质型和冠状边型斜长石的 An(=Ca/(Ca+Na))值分别为0.88~0.91、0.88~ 0.91、0.91(图 5a). 普通角闪石的 Si=6.38~6.55, $Ca_{M4} = 1.84 \sim 1.91$, $(Na + K)_A < 0.50$, $Mg/(Mg + Ca_{M4}) = 0.50$ Fe^{2+}) =0.46~0.53, Ti=0.07~0.10, Al_{M2}=0.71~ 0.90. 依据 Leake et al.(1997)的分类,包裹体型角 闪石属于镁钙闪石、铁角闪石-镁角闪石,基质型 以铁镁钙闪石为主,冠状边型属于铁角闪石.绿泥 石的 X_{Mg} (=Mg/(Mg+Fe²⁺))=0.44(表 2).

根据以上岩相学观察和矿物化学组成,该样 品中的矿物组合可划分如下:(1)包裹体组合,石 榴石(核部)+普通角闪石+钛铁矿+金红石+石 英;(2)基质组合,石榴石+普通角闪石+斜长 石+钛铁矿+石英;(3)晚期矿物以石榴石周围的 斜长石(+普通角闪石)冠状边、基质普通角闪石 的镁铁闪石边和(更)晚期绿泥石交代为特征.

2.2.2 L1906样品 该样品经历过部分熔融(图 2b),镜下同样显示斑状变晶结构,但整体矿物结 构关系比L1903样品更为简单.石榴石变斑晶呈 他形-半自形粒状,粒径为0.7~1.0 mm,内部相 对干净,仅见少量钛铁矿、金红石和石英等矿物 包裹体(图 3d, 3e).石榴石边部分解形成斜长石 (+普通角闪石)冠状边,局部可见晚期绿泥石交 代(图 3d).基质矿物主要由普通角闪石、斜长石、 钛铁矿和石英组成(图 3f).石榴石从核到边,镁 铝榴石含量(X_{py} =0.15~0.09)降低,锰铝榴石和 钙铝榴石略微增加(X_{sps} =0.03~0.05; X_{gr} =0.12~ 0.14),铁铝榴石变化不明显,总体具有扩散环带 特征(图 4b).不同产状的斜长石成分变化较明 显,基质型和冠状边型斜长石的 An 值(=Ca/ (Ca+Na+K))分别为 0.27~0.37 和 0.30~0.42 (图 5a). 普通角闪石的 Si=6.50~6.16, Ca_{M4}= 1.76~1.83, (Na+K)_A<0.50, Mg/(Mg+Fe²⁺)= 0.48~0.51, Ti=0.06~0.08, Al_{M2}=0.65~0.89. 基质 型角闪石属于铁镁钙闪石, 冠状边型属于铁镁钙 闪石和镁钙闪石(图 5b). 绿泥石的 X_{Mg} =0.16.

根据以上岩相学特征和矿物化学组成,该样品的矿物演化可划分如下:(1)基质组合,石榴石+ 普通角闪石+斜长石+钛铁矿±金红石+石英; (2)冠状边组合(斜长石±普通角闪石)及(更)晚 期形成的绿泥石.此外,高级变质岩石在退变至缺 流体固相线时往往会形成最终矿物组合,对确定岩 石的流体状态具有重要意义(Korhonen *et al.*, 2012).经观察,L1906样品的最终矿物组合为石榴 石+普通角闪石+斜长石+钛铁矿+石英.

3 相平衡模拟

石榴斜长角闪岩 L1903样品的相平衡模拟, 是利用 THERMOCALC 3.33版本和 ds55数据库 (Holland and Powell, 1998; 2009年10月更新)进 行的,选择的模式体系为NCFMASHTO(Na₂O-CaO-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-O).石英设 为过量,流体相设为纯水,在固相线以下时设为过 量.MnO和K₂O在全岩和各矿物中的含量较低, 忽略不计,O(Fe₂O₃)含量通过重铬酸钾滴定法测 得.采用的矿物活度模型包括:石榴石(White *et al.*, 2007),单斜辉石、镁铁闪石和普通角闪石 (Diener and Powell, 2012),斜方辉石(White *et al.*, 2002),绿泥石、绿帘石(Holland and Powell, 1998),斜长石(Holland and Powell, 2003),钛铁矿 (White *et al.*, 2000).金红石和石英为纯端元相.

L1906样品的相平衡模拟,是利用 THER-MOCALC 3.45版本和 ds62数据库(Holland and Powell, 2011)进行的,选择的模式体系为NCKF-MASHTO(Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-O).石英设为过量,MnO忽略不计,水 含量通过 T- X_{H2O} 图确定.采用的矿物活度模型 为:石榴石、斜方辉石、黑云母(White *et al.*, 2014),单斜辉石、普通角闪石和熔体(Green *et al.*, 2014),单斜辉石、普通角闪石和熔体(Green *et al.*, 2016),斜长石(Holland and Powell, 2003), 钛铁矿(White *et al.*, 2000),绿帘石(Holland and Powell, 2011).金红石和石英为纯端元相.

3.1 L1903样品的P-T视剖面图

L1903样品的P-T视剖面图在0.20~1.50 GPa/

500~800 ℃条件下计算(图 6a),石榴石稳定在 0.50 GPa以上,斜长石出现在1.00 GPa以下,镁铁 闪石稳定于0.20~0.65 GPa/540~780 ℃,绿泥石出 现于610 ℃以下,金红石则在0.74 GPa以上才出现. 值得注意的是,该样品的饱和水固相线在~770 ℃ 才出现,可能与岩石特别富铁镁和钛而贫硅和钠有 关(表1).此外,岩石中未见到明显的部分熔融现 象,推测主要的变质反应在亚固相线条件下发生.

将主要矿物的成分等值线(其中普通角闪石 的 Ti 含量等值线由 THERMOCALC 3.45 和 ds62 数据库计算)投入视剖面图中(图 6b),结果表 明,石榴石的镁铝榴石含量和钙铝榴石含量、斜 长石 An 值、普通角闪石的 Ti 含量均显示与温度 正相关;普通角闪石 M2位的 Al 值在不含斜长 石域与压力负相关,在斜长石域随温度升高或 压力降低而降低. 石榴石的实测成分投点均落 入 610 ℃以下的绿泥石稳定域,可能与其成分已 发生扩散有关(图4a). 岩相学观察到的包裹体 组合以无斜长石、含有金红石为特征,包裹体型 普通角闪石的Al_{M2}=0.90, Ti=0.10, 两者可在金 红石域获得峰期温压条件为 0.96± 0.11 GPa/ 720±8.0 ℃(图 6b). 此处压力和温度的误差 (1σ) 通过 THERMOCALC 分别对普通角闪石的 Al_{M2}和 Ti 等值线计算确定. 基质矿物组合(hbpl-g-ilm-q)稳定在0.53~0.93 GPa/580~800 ℃,结 合基质型斜长石的An值(=0.88~0.91)、基质型 普通角闪石的 Al_{M2} 值(=0.76~0.90)和 Ti 值 (=0.08~0.09),可进一步限定温压范围为 0.55~0.77 GPa/635~688 ℃. 上述温压变化表明 岩石在峰期后发生了降压作用.石榴石周 围生长斜长石冠状边,也反映了降压过程, 普通角闪石的局部镁铁闪石则指示降压进 人到了镁铁闪石域.石榴石边部生长的绿泥 石指示接续的变质演化以冷却为主,降温至 610 ℃以下进入绿泥石域(图 6b).

3.2 L1906样品的 T-X_{H20}和 P-T 视剖面图

L1906样品的 T-X_{H20} 图(图 6c)在 0.95 GPa条件下进行计算,该压力值通过前期 P-T 图(此处未展示)的模拟获得.T-X_{H20} 图在确定岩石中合适的水含量时,选取观察到的最终矿物组合(hb-pl-g-ilm-L-q)与缺流体固相线的界限,此时矿物组合与剩余熔体处于平衡状态(Korhonen *et al.*, 2012).本文选取相应固相线段的中点,X_{H20}=0.335.





Fig.6 The *P*-*T* and *T*-*X*_{H20} pseudosection of garnet amphibolite samples from the Yunzhongshan terrane a. NCFMASHTO体系下L1903样品的*P*-*T*视剖面图,石英和水设为过量;b. L1903样品主要矿物的成分等值线,石榴石的镁铝榴石py (=Mg/(Fe²⁺+Mg+Ca))、钙铝榴石gr(=Ca/(Fe²⁺+Mg+Ca)),斜长石An(=Ca/(Ca+Na)),普通角闪石Ti和M2位Al;c. NCKF-MASHTO体系下L1906的*T*-*X*_{H20}视剖面图,压力为0.95 GPa,石英设为过量.垂直虚线表示图6d中的水含量;d. L1906样品的*P*-*T*视剖面图,矿物成分等值线包括斜长石An(=Ca/(Ca+Na+K))、石榴石的镁铝榴石py(=Mg/(Fe²⁺+Mg+Ca))、普通角闪石Ti和M2位Al.全岩成分通过XRF测试得到,摩尔百分比归一化后结果见表1

应用上述H₂O值计算的P-T视剖面图如图6d 所示.L1906样品的缺流体固相线在690℃即出现, 比L1903样品的饱和水固相线温度还低,可能与该 样品富硅和钠而贫铁镁和钛有关(表1).将主要矿 物的成分等值线投入视剖面图中,石榴石的镁铝榴 石含量和普通角闪石的Ti值显示与温度正相关;斜 长石的 An 值与压力负相关;普通角闪石 Al_{M2}值与 压力正相关.样品中石榴石的最大 py 值(=0.15)与 斜长石最小 An 值(=0.27)可获得交点温压条件 1.26±0.08 GPa/756±14.0 ℃,位于金红石稳定域, 限定了峰期温压条件.此处压力和温度的误差(1σ) 通过 THERMOCALC 分别对斜长石的 An 和石榴 石的 py 等值线计算确定.不含金红石的基质矿 物组合(hb-pl-g-ilm-L-q)稳定在 0.80~1.10 GPa/ 745~830 °C,基质型角闪石的 M2 位 A1(=0.73~ 0.89)进一步限定温压范围 0.80~1.04 GPa/775~ 825 °C,表明岩石在峰后存在降压,并有少量升 温.冠状边型斜长石的 An 值(=0.30~0.42)可与 峰后降压过程对应(图 6d).岩石在降压之后的 演化没有很好的记录,石榴石边部的绿泥石交 代、冠状边型角闪石的 Al_{M2}值(=0.74)和 Ti 值 (=0.08)的等值线位置大致指示了冷却过程.

4 锆石U-Pb年代学

4.1 分析方法

石榴斜长角闪岩样品的锆石单矿物颗粒分 离在廊坊晨硕地质服务公司进行,采用常规重液 法和磁选法分离锆石颗粒,再在双目镜下手工挑 选后用环氧树脂固结抛光. 锆石的内部结构 CL 图像分析和透反射光拍摄在北京锆年领航科技 有限公司完成. 锆石 U-Pb 定年和稀土元素分析 在武汉市上谱分析科技有限责任公司通过 Agilent 7700e 及激光剥蚀系统 GeolasPro 完成, 以锆 石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标 分别进行同位素和微量元素分馏校正. 激光能 量为 80 MJ, 频率为 5 Hz, 激光束斑直径为 32 µm. 数据处理采用 ICPMSDataCal (Liu *et al.*, 2010)完成, 谐和图绘制和加权平均年龄计算用 Isoplot/Ex Version 4.15(Ludwig, 2012)完成.

4.2 分析结果

L1903样品的锆石呈浑圆状,粒度较小,长 轴为35~70 µm,在CL图像中具有冷杉叶状分 带或无分带(图7a),显示变质锆石特征(吴元 保和郑永飞,2004).L1906样品的锆石在CL图



图7 云中山地体石榴斜长角闪岩样品的锆石阴极发光图像及U-Pb年龄谐和图

Fig.7 Cathodoluminescence images of zircon and concordia diagrams of U-Pb dating results of garnet amphibolite samples from the Yunzhongshan terrane

a, c. 样品 L1903 和 L1906 的锆石阴极发光图像,红圈表示 LA-ICP-MS 分析点位,标注的编号、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄(Ma)及 Th/U 比值分别与表 3 对应; b. L1903 样品的年龄谐和图,蓝圈为I型锆石测点结果,且计算 得到加权平均年龄;灰圈表示 II 型锆石测点结果,Pb 丢失明显

表3 云中山地体石榴斜长角闪岩样品的锆石U-Pb定年结果

Table 3 Zircon U-Pb analytical results of garnet amphibolite samples from the Yunzhongshan terrane

	T 1		m1 /			同位素	比值				年龄	(Ma)	
测点号	1 h (10 ⁻⁶)	U (10 ⁻⁶)	U U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
L1903													
1	0.22	32	0.007	0.113 5	0.004 6	5.1440	0.215 5	0.327 9	0.004 6	1 857	74	1 828	22
2	2.01	158	0.013	0.111 9	0.002 5	4.9177	0.1114	0.317 0	0.003 0	1 831	42	1 775	15
3	0.95	144	0.007	0.110 4	0.002 9	4.917 0	0.131 1	0.320 3	0.003 4	1 806	44	1 791	17
4	4.81	267	0.018	0.114 5	0.002 4	5.603 0	0.119 0	0.352 5	0.003 6	1 873	35	1 947	17
L1906													
5	2.57	101	0.025	0.118 7	0.003 3	5.747 0	0.158 6	0.347 2	0.004 8	1 936	50	1 921	23
6	0.44	86	0.005	0.114 2	0.003 1	5.7034	0.175 8	0.357 1	0.005 5	1 933	50	1 968	26
7	1.09	69	0.016	0.123 8	0.003 8	5.949 7	0.178 6	0.345 9	0.004 7	2 013	49	1 915	22
8	2.43	195	0.012	0.122 5	0.003 2	5.598 9	0.144 0	0.328 3	0.003 5	1 994	46	1 830	17
9	0.12	82	0.001	0.125 6	0.003 7	5.975 8	0.168 1	0.342 4	0.003 9	2 039	52	1 898	19
10	0.08	41	0.002	0.116 7	0.004 0	5.635 8	0.194 7	0.347 5	0.004 3	1 907	62	1 923	21
11	0.79	252	0.003	0.128 3	0.003 0	6.210 7	0.153 8	0.347 9	0.004 4	2 076	41	1 924	21
12	0.50	69	0.007	0.120 9	0.003 3	5.7154	0.149 9	0.340 9	0.003 2	1 970	48	1 891	15

像中可以分为2种类型(图7c): I型锆石呈椭 圆形,长轴约为50~60 µm,内部结构与L1903 样品中的锆石类似,呈冷杉叶状分带或无分 带,应为变质成因; II型锆石呈半自形,长轴为 45~75 µm,内部可见模糊的振荡环带,可能是 原岩的岩浆锆石受到一定程度重结晶的结果.

由于所测样品的锆石普遍具有较低的 Th、U 含量,给年代学分析带来较大误差.在L1903样品 中仅获得4个可靠的变质锆石的分析点,均位于 谐和线附近,但较为分散,对应的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表观 年龄分别为1806 Ma、1831 Ma、1857 Ma、1873 Ma(图7b,表3).L1906样品的 I型变质锆石落在 谐和线上,得到的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 加权平均年龄为1 928±60 Ma, II型锆石的 Pb 丢失明显,²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表观年龄为1970~2076 Ma(图7d,表3).

两个样品的变质锆石具有较高的稀土元素总量.在稀土元素配分模式图中,除个别锆石具有平坦的形态外,总体上显示重稀土富集的左倾特征(图8).两个样品的变质锆石的钛含量都比较低,分别为 $0.76 \times 10^{-6} \sim 3.32 \times 10^{-6}$ (L1903)、 $0.49 \times 10^{-6} \sim 4.97 \times 10^{-6}$ (L1906).利用Ferry and Watson(2007)修正后的锆石 Ti 温度计(由于石英和金红石/钛铁矿的存在,设SiO₂和TiO₂的活度为1),计算得到两个样品的变质锆石形成温度分别为 $551 \sim 652 \ \ C(L1903)$ 和 $524 \sim 684 \ \ C(L1906)$,与变质作用的冷却阶段温度一致(图6).



图8 云中山地体石榴斜长角闪岩样品锆石的球粒陨石标 准化稀土元素模式

5 讨论

5.1 石榴斜长角闪岩的变质作用演化

根据上述两个样品的岩相学观察、矿物化学 分析及相平衡模拟,云中山石榴斜长角闪岩的 变质作用演化可概括为3个阶段(图9).

5.1.1 峰期变质阶段 石榴斜长角闪岩的峰期变质阶段位于金红石稳定域.在L1903样品中,包含了金红石的石榴石包裹体组合(hb-g-ilm-ru-ep-q)最可能反映该阶段的矿物组成.由于石榴石成分已发生了扩散,本文利用包裹体型角闪石的成分(Al_{M2}和Ti含量)来限定峰期温压条件.越来越多的研究表明,

Fig.8 Chondrite-normalized REE patterns of zircon of garnet amphibolite samples from the Yunzhongshan terrane 球粒陨石的数据引自Sun and McDonough (1989)



图9 吕梁-云中山-五台-恒山地区代表性变质P-T轨迹

Fig.9 The representative *P*-*T* paths for metamorphic rocks from the Lüliang-Yunzhongshan-Wutai-Hengshan areas 1. 五台石榴斜长角闪岩(Qian and Wei, 2016); 2. 南恒山石榴斜长角闪岩(Qian and Wei, 2016); 3. 北恒山高压麻粒岩(Zhang *et al.*, 2013); 4. 吕梁变泥质岩(于津海等, 2004); 5. 吕梁石榴斜长角闪岩(Zhao *et al.*, 2010); 6. 吕梁基性麻粒岩(Xiao *et al.*, 2017); 7. 吕梁泥质片麻岩 (Zhao *et al.*, 2017); 8. 云中山石榴斜长角闪岩L1903(本文); 9. 云中山石榴斜长角闪岩L1906(本文). 虚线 ru(L1903)表示L1903样品金红 石的出现线. 变质相的划分引自 Wei and Duan (2018)

角闪石中的Ti含量可有效记录岩石的温度变化, 在恢复石榴斜长角闪岩的峰期条件方面具有重要 作用(Liao and Wei, 2019).包裹体型角闪石的Alma 值和 Ti 值分别为 0.90 和 0.10, 获得峰期温压条件 为 0.96±0.11 GPa/720±8.0 ℃. 值得注意的是,模 拟的峰期矿物组合中包含绿帘石而岩相学中已无 法找到,可能是该矿物在岩石后续减压过程中分解 消耗所致.L1906样品的石榴石粒度相对更细小, 石榴石内部仅含有钛铁矿、金红石和石英,未观察 到完整的包裹体组合.因此,该样品的峰期温压利 用 Qian and Wei(2016) 建立的斜长石最小 An 值 (=0.27)和石榴石最大镁铝榴石值(=0.15)交点 法限定,获得峰期温压条件为1.26±0.08 GPa/ 756±14.0 ℃.L1906 样品的峰期温压条件稍高于 L1903样品,这与L1903样品没有发生部分熔融 而 L1906 样品的部分熔融现象很发育相一致.此 外,由于两个样品均发生了一定程度的退变质作 用,可以认为现在获得的峰期温压条件应代表岩 石真正峰期条件的下限.对比吕梁地体和五台-恒山地体已有的变质作用研究(图9),云中山的 变质峰期条件整体上更接近于五台-恒山地体的 中压相系递增变质序列,显示了比吕梁地体的变 质峰期条件更高的压力和更低的地热梯度.

5.1.2 峰后减压阶段 石榴斜长角闪岩的峰期后 变质演化以降压为特征.在L1903样品中,通过基 质矿物组合(hb-pl-g-ilm-q)的稳定范围并结合基质 型斜长石的An值(=0.88~0.91)、基质型角闪石的 Al_{M2}值(=0.76~0.90)和Ti值(=0.08~0.09),获得 峰后减压阶段的温压条件为0.55~0.77 GPa/635~ 688 ℃.岩石的降压过程也反映在金红石转变成钛 铁矿(图 3a)和石榴石分解形成的斜长石冠状边中 (An=0.91),且降压的轨迹应该已到达镁铁闪石生 长域,因此普通角闪石的边部出现局部镁铁闪石 替代(图 3b).L1906样品的峰后减压阶段通过不 含金红石的基质矿物组合(hb-pl-g-ilm-L-q)的稳 定范围并结合基质型角闪石的M2 位 Al 值 (=0.73~0.89)和冠状边型斜长石的 An 值(0.30~ 0.42)限定,温压条件为 0.80~1.04 GPa/775~ 825℃,可能的降压变质反应为g+ru+L+q= hb+pl±ilm.在吕梁地体和五台-恒山地体的变质 岩中,都存在类似的峰后降压过程(图9),反映了 造山带加厚地壳的快速抬升(魏春景, 2016).

5.1.3 晚期冷却阶段 石榴斜长角闪岩的晚期变 质演化以冷却为主.两个样品的石榴石周围均有晚 期绿泥石的交代,指示岩石的退变质*P-T*轨迹冷却 到了中低温绿泥石域(图 6a).此外,L1906样品中的 冠状边型角闪石的 Al_{M2} 值(=0.74)和 Ti值 (=0.08)也记录了温度降低的特点(图 6d).本文推 测,岩石的晚期冷却过程发生在流体缺失的条件下, 因为岩石总体上较好地保留了早期的矿物组合,晚 期绿泥石仅在极少数石榴石边部发育,可能与局部 少量退变流体活动有关(Guiraud *et al.*, 2001).

5.2 全岩成分对岩石部分熔融能力的影响

云中山石榴斜长角闪岩的两个样品在岩石组 构上显示较大差异,其中L1903样品未见部分熔融 现象,而L1906样品则可见非常明显的部分熔融(图 2). 这一方面跟两者具有约 60~100 ℃的峰期温度 差有关(图9),另一方面也可能受控于两者全岩成 分的变化(表1).一般来说,在中高压条件下,石榴 斜长角闪岩的饱和水固相线位于650~700℃附近 (Qian and Wei, 2016;朱浩忠等, 2020; Qian et al., 2021),因此峰期温度分别为~700 ℃和~800 ℃的 岩石可以显示一定的部分熔融程度差别.魏春景等 (2017)通过模拟石榴斜长角闪岩的熔融过程,发现 ~700 ℃(~6%,摩尔百分比)时产生的熔体含量与 800℃(~10%,摩尔百分比)时熔体含量相差3%~ 4%(摩尔百分比).但是,上述部分熔融程度的变化 可能不会在岩石组构上表现出明显的差异,不足以 形成像本文两个样品那样悬殊的对比.例如,南恒 山石榴斜长角闪岩峰期温度同样比五台石榴斜长 角闪岩高100℃以上,但两者仅在局部结构域显示 长英质脉体含量的差异(Qian and Wei, 2016).本文 的两个石榴斜长角闪岩样品具有明显不同的化学 组成,相比于L1906样品,L1903样品更富集铁镁钛 而贫硅和钠(表1),这些特征为其带来了难熔的属 性.而且,相平衡模拟结果显示,L1903样品的饱 和水固相线出现在>1.00 GPa/770 ℃的条件,高 于该样品的峰期温度条件,甚至比L1906样品的 缺流体固相线温度(>690℃)都高不少(图9),这 也就不难理解为什么两个样品具有明显的岩石组 构差异了.综合而言,石榴斜长角闪岩中的全岩铁 镁钛含量与岩石发生部分熔融的难度成正比,而 全岩硅钠含量则与部分熔融难度成反比.

5.3 变质时代与构造意义

云中山石榴斜长角闪岩记录了1 928~ 1806 Ma的变质锆石年龄(图7).在稀土配分图中, 两个样品的变质锆石总体上具有重稀土富集的左 倾形态(图8).这种重稀土特征表明变质锆石没有 与石榴石平衡共生,因为石榴石通常富集重稀土, 所以与石榴石共生的锆石理论上应该相应地亏损 重稀土(吴元保和郑永飞, 2004;吴春明, 2018;刘 平华等, 2020).重稀土富集的变质锆石更可能生长 于石榴石发生分解的退变质阶段(Zhang et al., 2018).此外,两个样品的变质锆石均含有较低的Ti 含量,利用锆石Ti温度计得到的结晶温度(L1903: 551~652 ℃;L1906:524~684 ℃)明显低于两者的 峰期温度而接近于晚期冷却温度(图9).因此,云中 山石榴斜长角闪岩的这些变质锆石年龄可解释为 岩石的退变冷却时代,其峰期变质时代应该更老. 统计表明,在整个吕梁-云中山-五台-恒山地区,变 质年龄有一个较宽的范围,主要分布于1.97~ 1.80 Ga,并显示~1.95 Ga和~1.85 Ga两个年龄峰 值(图 10).其中,1.95 Ga代表研究区古元古代晚期 碰撞造山事件的峰期时代已得到越来越多的证据 支持,近年来逐渐成为共识(Qian and Wei, 2016; Wu et al., 2017; Zhao et al., 2017; 魏春景, 2018; Xiao et al., 2019);但晚于1.95 Ga的变质年龄不能 笼统地归为漫长的退变冷却过程,需要根据具体情 况进行分析.在多数相对刚性的地体内部,岩石往 往只记录~1.95 Ga的变质事件,并在峰期变质后经 历了快速抬升和缓慢冷却,持续时间超过100 Ma, 如本文的云中山石榴斜长角闪岩很可能符合这种 情况;然而,在一些强变形剪切带中(如恒山朱家坊 韧性剪切带),其内部的岩石除了有早期变质事件记 录,还可能记录了更晚一期(~1.85 Ga)与板内变形有 关的剪切变质事件(魏春景, 2018; Qian et al., 2019).

相比于华北克拉通中部造山带的其他地区,云中山地体出露面积较小,且广泛发育新太古代TTG 片麻岩和古元古代花岗岩,因此前人多将其简单地 视为TTG片麻岩-花岗岩区,与吕梁地体一起共同 称为吕梁杂岩(Zhao *et al.*, 2008, 2010; Wang *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020; Zhao



图10 吕梁-云中山-五台-恒山地区代表性变质年龄的 直方图

Fig.10 Histogram of representative metamorphic ages from the Lüliang-Yunzhongshan-Wutai-Hengshan areas

年龄资料引自Kröner et al. (2006); Zhao et al. (2008); Qian et al. (2013, 2015, 2017, 2019, 2021); Zhang et al. (2013, 2018); Qian and Wei(2016); Xiao et al. (2017, 2019); Zhao et al. (2017); 米广尧等(2018); Liu et al. (2020)和本文数据

et al., 2020).上述划分方式是对云中山地体组成的 一种简化处理,但也在客观上弱化了云中山地体的 重要性.实际上,云中山地体的岩石-地层组成复 杂,变质表壳岩分布较多,且变质-变形现象丰富, 对于理解吕梁-云中山-五台-恒山地区的整体构造 演化具有重要意义.野外地质调查资料(山西省地 质调查院,2003.1:25万岢岚县幅区域地质调查报 告)和部分学者(米广尧等, 2018;何晴州, 2019)曾 将云中山地体的变质表壳岩划分为南北两部分,南 边主体为界河口群,北边由五台岩群组成.王惠初 等(2020)在传承早期地调资料的基础上,对云中山 地体南部开展了新的填图工作,将其中的变质表壳 岩(原界河口群)进一步划分为新太古代和古元古 代两部分,其中新太古代部分与五台岩群可比,而 古元古代(三交组)部分则与吕梁地体的野鸡山群 相似.此外,在五台-恒山地体常见的新太古代TTG 片麻岩和花岗片麻岩也广泛分布于云中山地体,但 并未出露在吕梁地体.由此可见,云中山地体的岩 石-地层组成似乎与五台-恒山地体更加相近.本文 在云中山石榴斜长角闪岩中获得的变质 P-T轨 迹和峰期温压条件接近于五台-恒山地体的递增 变质序列(图9),进一步支持了两者的相似性. 结合变质锆石年龄和锆石 Ti 温度计算结果,推

测云中山地体与五台-恒山地体共同记录了古元 古代晚期~1.95 Ga的碰撞造山事件,峰期变质后 发生了加厚地壳的快速抬升与缓慢冷却(1.93~ 1.81 Ga).但岩相学观察和相平衡模拟均未在云 中山石榴斜长角闪岩中识别出更晚期 (~1.85 Ga)的剪切变质记录,可能与本文的采样 位置位于刚性地体内部有关(Qian *et al.*, 2021).

吕梁地体的变质岩石虽与云中山石榴斜长 角闪岩的峰期温度相似,但它们的峰期压力都 明显更低.这一表观现象可能直接指示云中山 地体在碰撞造山-地壳加厚过程中的埋深(地壳 层次)大于吕梁地体,且两者具有不同的视地热 梯度.但从大的构造尺度上分析,云中山地体、 吕梁地体以及五台-恒山地体都属于同一个造 山带系统(中部造山带),理论上应具有类似的 地热梯度环境(Brown, 2007),因此还有可能是 早前的相关工作在一定程度上低估了吕梁地体 的峰期压力,这需要后期的工作深入验证.

6 结论

(1) 云中山石榴斜长角闪岩具有顺时针 P-T-t轨迹,变质峰期位于金红石稳定域,峰期温压条件 为 0.96±0.11 GPa/720±8.0 ℃(L1903)和 1.26± 0.08 GPa/756±14.0 ℃(L1906),接近五台-恒山地 体的递增变质系列;峰期后发生降压,以金红石转 变为钛铁矿、石榴石的冠状边结构、普通角闪石生 长镁铁闪石边为特征,温压条件为0.55~0.77 GPa/ 635~688 ℃(L1903)和 0.80~1.04 GPa/775~825 ℃ (L1906);晚期冷却阶段以局部绿泥石交代为特征.

(2)石榴斜长角闪岩的部分熔融能力受全 岩成分影响,具体表现为岩石贫硅和钠而富铁镁钛时,难熔;反之,则易熔.

(3) 云中山石榴斜长角闪岩的变质锆石 U-Pb 年龄为1928~1806 Ma,代表退变冷却时 代.吕梁-云中山-五台-恒山地区的整体地质 特征对比表明,云中山地体的岩石-地层组成 和变质作用演化与五台-恒山地体非常相似, 记录了古元古代晚期的碰撞造山事件.

致谢:两位匿名审稿人和魏春景教授仔细审阅 了本文,并提出了若干建设性修改意见,特表谢忱. 感谢吴尚京和林浩在野外工作中的帮助;感谢夏燕 飞和张艳灵协助开展矿物的化学成分分析;感谢夏 璿砚和李旺超在成文过程中的讨论与建议!

References

- Brown, M., 2007. Metamorphic Conditions in Orogenic Belts: A Record of Secular Change. *International Geolo*gy Review, 49(3): 193-234. https://doi.org/10.2747/ 0020-6814.49.3.193
- Diener, J. F. A., Powell, R., 2012. Revised Activity -Composition Models for Clinopyroxene and Amphibole. *Journal of Metamorphic Geology*, 30(2): 131-142. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00959.x
- Faure, M., Trap, P., Lin, W., et al., 2007. Polyorogenic Evolution of the Paleo-Proterozoic Trans-North China Belt: New Insights from the Lüliangshan-Hengshan-Wutaishan and Fuping Massifs. *Episodes*, 30(2): 96– 107. https://doi.org/10.18814/epiiugs/2007/v30i2/004
- Ferry, J. M., Waston, E. B., 2007. New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154: 429-437. https://doi.org/ 10.1007/s00410-007-0201-0
- Geng, Y.S., Yang, C.H., Wan, Y.S., 2006. Paleoproterozoic Granitic Magmatism in the Lüliang Area, North China Craton: Constraint from Isotopic Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 305-314 (in Chinese with English abstract).
- Green, E.C.R., White, R.W., Diener, J.F.A., et al., 2016. Activity - Composition Relations for the Calculation of Partial Melting Equilibria in Metabasic Rocks. *Journal* of Metamorphic Geology, 34(9): 845-869. https://doi. org/10.1111/jmg.12211
- Guiraud, M., Powell, R., Rebay, G., 2001. H₂O in Metamorphism and Unexpected Behaviour in the Preservation of Metamorphic Mineral Assemblages. *Journal of Metamorphic Geology*, 19(4): 445-454. https://doi.org/ 10.1046/j.0263-4929.2001.00320.x
- He, Q.C., 2019. Geological Evolution of Early Precambrian in Yunzhongshan Area: Studies of Petrography, Chronology and Geochemistry (Dissertation). Taiyuan University of Technology, Taiyuan (in Chinese with English abstract).
- Holland, T.J.B., Powell, R., 1998. An Internally Consistent Thermodynamic Data Set for Phases of Petrological Interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309– 343. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x
- Holland, T.J.B., Powell, R., 2003. Activity-Composition Relations for Phases in Petrological Calculations: An Asymmetric Multicomponent Formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145(4): 492-501. https://doi.org/10.1007/s00410-003-0464-z
- Holland, T.J.B., Powell, R., 2011. An Improved and Ex-

tended Internally-Consistent Thermodynamic Dataset for Phases of Petrological Interest, Involving a New Equation of State for Solids. *Journal of Metamorphic Geolo*gy, 29(3): 333-383. https://doi.org/10.1111/ j.1525-1314.2010.00923.x

- Kang, J.L., Wang, H.C., Xiao, Z.B., et al., 2017. Neoarchean Crustal Accretion of the North China Craton: Evidence from the TTG Gneisses and Monzogranitic Gneisses in Yunzhong Mountain Area, Shanxi. Acta Petrologica Sinica, 33(9): 2881-2898 (in Chinese with English abstract).
- Korhonen, F.J., Powell, R., Stout, J.H., 2012. Stability of Sapphirine+Quartz in the Oxidised Rocks of the Wilson Lake Terrane, Labrador: Calculated Equilibria in NCKF-MASHTO. Journal of Metamorphic Geology, 30(1): 21-36. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2011.00954.x
- Kröner, A., Wilde, S.A., Zhao, G.C., et al., 2006. Zircon Geochronology and Metamorphic Evolution of Mafic Dykes in the Hengshan Complex of Northern China: Evidence for Late Palaeoproterozoic Extension and Subsequent High-Pressure Metamorphism in the North China Craton. *Precambrian Research*, 146(1): 45–67. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.008
- Kusky, T.M., 2011. Geophysical and Geological Tests of Tectonic Models of the North China Craton. Gondwana Research, 20(1): 26-35. https://doi.org/10.1016/j. gr.2011.01.004
- 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. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219–246. https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.405.13
- Liao, Y., Wei, C.J., 2019. Ultrahigh Temperature Mafic Granulite in the Huai'an Complex, North China Craton: Evidence from Phase Equilibria Modelling and Amphibole Thermometers. *Gondwana Research*, 76: 62-76. https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.05.010
- Liu, C.H., Zhao, G.C., Liu, F.L., et al., 2020. Tectonic Switching of the Trans-North China Orogen in the Middle Paleoproterozoic: Insights from Mafic Magmatism in the Lüliang Complex. *Tectonics*, 39(11): 1-27. https:// doi.org/10.1029/2020TC006253
- Liu, P. H., Tian, Z. H., Wen, F., et al., 2020. Multiple High - Grade Metamorphic Events of the Jiaobei Terrane, North China Craton: New Evidences from Zircon U-Pb Ages and Trace Elements Compositions of Garnet Amphilbote and Granitic Leucosomes. *Earth Science*, 45 (9): 3196-3216 (in Chinese with English abstract).

- Liu, S.W., Li, Q.G., Zhang, L., 2009. Geology, Geochemistry of Metamorphic Volcanic Rock Suite in Precambrian Yejishan Group, Lüliang Mountains and Its Tectonic Implications. Acta Petrologica Sinica, 25(3): 547-560 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S.W., Zhang, L.F., Li, Q.G., et al., 2012. Geochemistry and U-Pb Zircon Ages of Metamorphic Volcanic Rocks of the Paleoproterozoic Lüliang Complex and Constraints on the Evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton. *Precambrian Research*, 222–223: 173– 190. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.07.006
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51: 537-571. https:// doi.org/10.1093/petrology/egp082
- Ludwig, K.R., 2012. Isoplot/Ex Version 4.15: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Mi, G.Y., Mi, R., Mao, Y.D., 2018. The Age and Significance of Single-Grain Zircons in Jiehekou Gr. in the Yunzhong Mountain Area. *Acta Mineralogica Sinica*, 38(2): 176-184 (in Chinese with English abstract).
- Qian, J.H., Wei, C.J., 2016. P-T-t Evolution of Garnet Amphibolites in the Wutai- Hengshan Area, North China Craton: Insights from Phase Equilibria and Geochronology. Journal of Metamorphic Geology, 34(5): 423-446. https://doi.org/10.1111/jmg.12186
- Qian, J.H., Wei, C.J., Clarke, L.G., et al., 2015. Metamorphic Evolution and Zircon Ages of Garnet Orthoamphibole Rocks in Southern Hengshan, North China Craton: Insights into the Regional Paleoproterozo-ic P-T-t History. Precambrian Research, 256: 223-240. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.013
- Qian, J.H., Wei, C.J., Yin, C.Q., 2017. Paleoproterozoic P-T-t Evolution in the Hengshan-Wutai-Fuping Area, North China Craton: Evidence from Petrological and Geochronological Data. Precambrian Research, 303: 91– 104. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.02.016
- Qian, J.H., Wei, C.J., Zhou, X.W., et al., 2013. Metamorphic P-T Paths and New Zircon U-Pb Age Data for Garnet-Mica Schist from the Wutai Group, North China Craton. *Precambrian Research*, 233: 282-296. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.05.012
- Qian, J.H., Yin, C.Q., Li, S., et al., 2021. Metamorphic *P*-*T*-*t* Evolution of Amphibolite in the North Hengshan Terrane, North China Craton: Insights into the Late Pa-

leoproterozoic Tectonic Processes from Initial Collision to Final Exhumation. *Geological Society of America Bulletin*. https://doi.org/10.1130/B35810.1

- Qian, J.H., Yin, C.Q., Wei, C.J., et al., 2019. Two Phases of Paleoproterozoic Metamorphism in the Zhujiafang Ductile Shear Zone of the Hengshan Complex: Insights into the Tectonic Evolution of the North China Craton. *Lithos*, 330-331: 35-54. https://doi.org/10.1016/j. lithos.2019.02.001
- Qian, J.H., Yin, C.Q., Zhang, J., et al., 2018. High-Pressure Granulites in the Fuping Complex of the Central North China Craton: Metamorphic P-T-t Evolution and Tectonic Implications. Journal of Asian Earth Sciences, 154: 255– 270. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.12.027
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *The Geological Society*, 42(1): 313-345. https://doi.org/10.1144/GSL. SP.1989.042.01.19
- Wan, Y.S., Song, B., Liu, D.Y., 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of Palaeoproterozoic Metasedimentary Rocks in the North China Craton: Evidence for a Major Late Palaeoproterozoic Tectonothermal Event. *Precambrian Research*, 149: 249-271. https://doi.org/ 10.1016/j.precamres.2006.06.006
- Wang, H.C., Kang, J.L., Xiao, Z.B., et al., 2018. Neoarchean Subduction in North China Craton: New Evidence from the Metamorphic High-Mg Igneous Assemblage in Yunzhongshan Area, Shanxi Province. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 1099-1118 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.C., Miao, P.S., Kang, J.L., et al., 2020. New Evidence for the Formation Age of the Lüliang Group. Acta Petrologica Sinica, 36(8): 2313-2330 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.Z., Zhang, H.F., Zhai, M.G., et al., 2016. Granulite Facies Metamorphism and Crust Melting in the Huai' an Terrane at ~1.95 Ga, North China Craton: New Constraints from Geology, Zircon U-Pb, Lu-Hf Isotope and Metamorphic Conditions of Granulites. Precambrian Research, 286: 126–151. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.09.012
- Wang, X., Zheng, Y.F., Zhu, W.B., 2019. Geochemical Evidence for Reworking of the Juvenile Crust in the Neoarchean for Felsic Magmatism in the Yunzhongshan Area, the North China Craton. *Precambrian Research*, 335: 105493. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105493.

Wang, X., Zhu, W.B., Liu, Y., et al., 2017. Revisiting the

Yejishan Group of the Lüliang Complex, North China: Implications for a Paleoproterozoic Active Continental Marginal Basin in the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 292: 93–114. https://doi.org/ 10.1016/j.precamres.2017.02.002

- Wei, C.J., 2016. Granulite Facies Metamorphism and Petrogenesis of Granite (II): Quantitative Modeling of the HT-UHT Phase Equilibria for Metapelites and the Petrogenesis of S-Type Granite. Acta Petrologica Sinica, 32(6): 1625-1643 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C.J., 2018. Paleoproterozoic Metamorphism and Tectonic Evolution in Wutai - Hengshan Region, Trans -North China Orogen. *Earth Science*, 43(1): 24-43 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C.J., Duan, Z.Z., 2018. Phase Relations in Metabasic Rocks: Constraints from the Results of Experiments, Phase Modelling and ACF Analysis. Geological Society, London, Special Publications, 474: 25-45. https://doi.org/10.1144/SP474.10
- Wei, C.J., Guan, X., Dong, J., 2017. HT-UHT Metamorphism of Metabasites and the Petrogenesis of TTGs. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1381-1404 (in Chinese with English abstract).
- Wei, C.J., Qian, J.H., Zhou, X.W., 2014. Paleoproterozoic Crustal Evolution of the Hengshan-Wutai-Fuping Region, North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 5(4): 485-497. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.008
- White, R.W., Powell, R., Clarke, G.L., 2002. The Interpretation of Reaction Textures in Fe-Rich Metapelitic Granulites of the Musgrave Block, Central Australia: Constraints from Mineral Equilibria Calculations in the System K₂O-FeO-MgO -Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(1): 41-55. https://doi.org/10.1046/j.0263-4929.2001.00349.x
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., 2007. Progress Relating to Calculation of Partial Melting Equilibria for Metapelites. *Journal of Metamorphic Geolo*gy, 25(5): 511-527. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00711.x
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., et al., 2000. The Effect of TiO₂ and Fe₂O₃ on Metapelitic Assemblages at Greenschist and Amphibolite Facies Conditions: Mineral Equilibria Calculations in the System K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O-TiO₂-Fe₂O₃. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(5): 497-511. https://doi. org/10.1046/j.1525-1314.2000.00269.x
- White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., et al., 2014. New Mineral Activity-Composition Relations for Ther-

modynamic Calculations in Metapelitic Systems. *Journal* of Metamorphic Geology, 32(3): 261-286. https://doi. org/10.1111/jmg.12071

- Wu, C.M., 2018. Current Problems in Metamorphic Geology. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 873-894 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.L., Zhang, H.F., Zhai, M.G., et al., 2017. Paleoproterozoic High - Pressure - High - Temperature Pelitic Granulites from Datong in the North China Craton and Their Geological Implications: Constraints from Petrology and Phase Equilibrium Modeling. *Precambrian Research*, 303: 727-748. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.011
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Mineralogical Studies of Zircon Origin and Constraints on the Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese).
- Xiao, L.L., Clarke, G., Liu, F.L., et al., 2017. Discovery of Mafic Granulite in the Guandishan Area of the Lüliang Complex, North China Craton: Age and Metamorphic Evolution. *Precambrian Research*, 303: 604-625. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.08.020
- Xiao, L.L., Clarke, G., Liu, F.L., et al., 2019. Metamorphic Records in the Lüliang Metapelites of the Jiehekou Group: Implications for the Tectonic Evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton. Precambrian Research, 332. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105415
- Yang, C.H., Du, L.L., Song, H.X., et al., 2018. Stratigraphic Division and Correlation of the Paleoproterozoic Strata in the North China Craton: A Review. Acta Petrologica Sinica, 34(4): 1019-1057 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J.H., Wang, D.Z., Wang, C.Y., et al., 2004. Paleoproterozoic Granitic Magmatism and Metamorphism in Middle Part of Lüliang Range, Shanxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 10(4): 500-513 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M.G., Santosh, M., 2011. The Early Precambrian Odyssey of North China Craton: A Synoptic Overview. Gondwana Research, 20(1): 6-25. https://doi.org/ 10.1016/j.gr.2011.02.005
- Zhang, H.F., Wang, H.Z., Santosh, M., et al., 2016. Zircon U-Pb Ages of Paleoproterozoic Mafic Granulites from the Huai'an Terrane, North China Craton (NCC): Implications for Timing of Cratonization and Crustal Evolution History. *Precambrian Research*, 272: 244–263. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.11.004.
- Zhang, Y.H., Wei, C.J., Lu, M.J., et al., 2018. P-T-t Evolu-

tion of the High-Pressure Mafic Granulites from Northern Hengshan, North China Craton: Insights from Phase Equilibria and Geochronology. *Precambrian Research*, 312: 1–15. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.04.022

- Zhang, Y.H., Wei, C.J., Tian, W., et al., 2013. Reinterpretation of Metamorphic Age of the Hengshan Complex, North China Craton. *Chinese Science Bulletin*, 58 (34): 4300-4307.
- Zhao, G.C., Cawood, P.A., Li, S.Z., et al., 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key Issues and Discussion. *Precambrian Research*, 222: 55-76. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2012.09.016
- Zhao, G. C., Kröner, A., Wilde, S. A., et al., 2007. Lithotectonic Elements and Geological Events in the Hengshan-Wutai-Fuping Belt: A Synthesis and Implications for the Evolution of the Trans-North China Orogen. *Geological Magazine*, 144(5): 753-775. https:// doi.org/10.1017/S0016756807003561
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136: 177-202. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Sun, M., et al., 2008. SHRIMP U-Pb Zircon Ages of Granitoid Rocks in the Lüliang Complex: Implications for the Accretion and Evolution of the Trans - North China Orogen. *Precambrian Research*, 160: 213-226. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.07.004
- Zhao, G.C., Yin, C.Q., Guo, J.H., et al., 2010. Metamorphism of the Lüliang Amphibolite: Implications for the Tectonic Evolution of the North China Craton. American Journal of Science, 310(10): 1480-1502. https:// doi.org/10.2475/10.2010.10
- Zhao, J., Gou, L.L., Zhang, C.L., et al., 2017. P-T-t Path and Tectonic Significance of Pelitic Migmatites from the Lüliang Complex in Xiyupi Area of Trans-North China Orogen, North China Craton. Precambrian Research, 303: 573– 589. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.010
- Zhao, J., Zhang, C.L., Liu, X.Y., et al. 2020. Middle Paleoproterozoic Tectonic Evolution of the Trans – North China Orogen, North China Craton: Constraint from the Intermediate-Acid Magmatism in the Lüliang Area. *Lithos*, 378–379: 105804. https://doi. org/ 10.1016/j.lithos.2020.105804S
- Zhu, H.Z., Tian, Z.H., Wang, Z.L., et al., 2020. (Garnet Bearing) Plagioclase Amphibolite *P*-*T* Evolution Path and Its Geological Implications in Rushan Region, Sulu Tec-

tonic Complex: Constraints by Petrology, Mineral Chemistry and Phase Equilibria Modeling. *Earth Science*, 45 (9): 3420-3435 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 耿元生,杨崇辉,万渝生,2006.吕梁地区古元古代花岗岩 浆作用——来自同位素年代学的证据.岩石学报,22 (2):305-314.
- 何晴州,2019. 云中山地区早前寒武纪地质演化——岩相 学、年代学及地球化学研究(硕士学位论文). 太原:太 原理工大学.
- 康健丽,王惠初,肖志斌,等,2017.华北克拉通新太古代地 壳增生:来自山西云中山地区 TTG 片麻岩和二长花岗 片麻岩的证据.岩石学报,33(9):2881-2898.
- 刘平华,田忠华,文飞,等,2020.华北克拉通胶北地体多期 高级变质事件:来自石榴斜长角闪岩与花岗质浅色体 锆石U-Pb定年与稀土元素的新证据.地球科学,45 (9):3196-3216.
- 刘树文,李秋根,张立,2009. 吕梁山前寒武纪野鸡山群火 山岩的地质学、地球化学及其构造意义. 岩石学报,25 (3):547-560.
- 米广尧,米然,毛永栋,2018.云中山区界河口岩群单颗粒 锆石年龄及地质意义.矿物学报,38(2):176-184.
- 王惠初,康健丽,肖志斌,等,2018. 华北克拉通新太古代板 块俯冲作用:来自山西云中山地区变质高镁火成岩组 合的证据.岩石学报,34(4):1099-1118.
- 王惠初, 苗培森, 康健丽, 等, 2020. 吕梁群时代归属新证据. 岩石学报, 36(8): 2313-2330.
- 魏春景,2016.麻粒岩相变质作用与花岗岩成因Ⅱ:变质泥质 岩高温-超高温变质相平衡与S型花岗岩成因的定量模 拟.岩石学报,32(6):1625-1643.
- 魏春景,2018.华北中部造山带五台-恒山地区古元古代变 质作用与构造演化.地球科学,43(1):24-43.
- 魏春景,关晓,董杰,2017.基性岩高温一超高温变质作用 与TTG质岩成因.岩石学报,33(5):1381-1404.
- 吴春明,2018. 变质地质学研究中的一些困难问题. 岩石学 报,34(4):873-894.
- 吴元保,郑永飞,2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb年 龄解释的制约. 科学通报,49(16):1589-1604.
- 杨崇辉, 杜利林, 宋会侠, 等, 2018. 华北克拉通古元古代地 层划分与对比. 岩石学报, 34(4): 1019-1057.
- 于津海,王德滋,王赐银,等,2004.山西吕梁山中段元古代 花岗质岩浆活动和变质作用.高校地质学报,10(4): 500-513.
- 朱浩忠,田忠华,王泽利,等,2020.苏鲁构造杂岩带乳山地 区(石榴)斜长角闪岩 P-T演化轨迹及其地质意义—— 来自岩石学、矿物化学及相平衡模拟的约束.地球科 学,45(9):3420-3435.