

DOI: 10.12401/j.nwg.2023162

冀西北宣化盆地侏罗纪九龙山组凝灰岩形成时代、 构造环境及地质意义

杨济远¹, 李杰^{1,*}, 白春东¹, 张家辉^{2,3}, 胡新茁⁴, 田颖¹, 刘蓓蓓¹, 许凡¹, 齐朋超⁵

(1. 河北省区域地质调查院, 河北省地学旅游研究中心, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 3. 中国地质调查局前寒武纪地质研究中心, 天津 300170; 4. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000; 5. 河北省地矿局第六地质大队, 河北 石家庄 050000)

摘要:冀西北宣化盆地九龙山组陆相沉积地层发育, 但地层的时代归属缺少化石和同位素测年资料佐证。研究区杨家营-响水铺一带九龙山组中下部发育流纹质凝灰岩夹层, 为准确确定宣化盆地九龙山组的时代和形成环境, 笔者对流纹质凝灰岩采集了锆石 U-Pb 同位素测年样品和岩石地球化学分析样品, 获得了 $(161.9 \pm 0.8) \text{Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值 (LA-ICP-MS 法), 为晚侏罗世早期。岩石化学特征表明, 流纹质凝灰岩属高 Si、高 K 钙碱性过铝质岩石; 稀土元素配分模式曲线为右倾型, 轻稀土强烈富集, 负 Eu 异常不明显; 富集大离子亲石元素 (Rb、K、Th、U), 亏损 Sr 和高场强元素 (Nb、Ti)。岩石地球化学特征显示其形成于挤压构造背景。锆石 Hf 同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-33.79 \sim -2.71$, 二阶段亏损模式年龄 (t_{DM2}) 为 $1179 \sim 3323 \text{Ma}$, 表明流纹质凝灰岩岩浆多为古元古代—中元古代加厚的下地壳熔融形成。综合分析认为, 宣化盆地九龙山组形成于中侏罗世晚期—晚侏罗世早期的挤压构造背景, 该研究成果为研究九龙山组的时代归属、形成环境提供了新资料。

关键词: 九龙山组; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 宣化盆地

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)06-0314-15

Formation Age, Tectonic Setting and Geological Significance of The Jurassic Jiulongshan Formation Tuff in Xuanhua Basin, Northwest Hebei

YANG Jiyuan¹, LI Jie^{1,*}, BAI Chungong¹, ZHANG Jiahui^{2,3}, HU Xinzhao⁴,
TIAN Ying¹, LIU Beibei¹, XU Fan¹, QI Pengchao⁵

(1. Hebei Institute of Regional Geological Survey, Geotourism Research Center of Hebei Province, Langfang 065000, Hebei, China;
2. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Precambrian Geological Research Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 4. Langfang Natural Resources Integrated Survey Center, China Geological Survey, Langfang 065000, Hebei, China; 5. The Sixth Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: The continental sedimentary strata of the Jiulongshan Formation in the Xuanhua basin in Northwest

收稿日期: 2022-06-05; 修回日期: 2023-07-23; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 河北省自然资源厅项目“河北省沙岭子、宣化县、深井镇、涿鹿县 1:5 万区域地质调查”(4540401JBND1G1)。

作者简介: 杨济远 (1990-), 男, 工程师, 从事矿产地质与区域地质调查工作。E-mail: yangjiyuanda@163.com。

* 通讯作者: 李杰 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事矿产地质与区域地质调查工作。E-mail: yinhelijie@163.com。

Hebei are well developed, but the age of the strata is lacking in evidence from fossils and isotope dating data. In the Yangjiaying–Xiangshui area of the study area, rhyolitic tuff interlayers develop in the middle and lower parts of the Jiulongshan Formation. In order to accurately determine the age and formation environment of the Jiulongshan Formation in the Xuanhua Basin, the author collected zircon U–Pb isotope dating samples from the rhyolitic tuff and rock geochemical analysis samples. The $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted average age (LA–ICP–MS method) of (161.9 ± 0.8) Ma was obtained, which is the early Late Jurassic. The petrochemical characteristics show that the rhyolitic tuff is a high–silicon, high–potassium calc–alkaline peraluminous rock; the distribution pattern curve of rare earth elements is right–dipping, with strong enrichment of light rare earths and no obvious negative Eu anomaly; the enrichment of large ions is lithophilic elements (Rb, K, Th, U), depleted Sr and high field strength elements (Nb, Ti). The geochemical characteristics of the rocks show that it was formed in a compressional tectonic setting. The zircon Hf isotope $\varepsilon\text{Hf}(t)$ value is between $-33.79\sim -2.71$, and the second–stage depletion model age (t_{DM2}) is between $1\ 179\sim 3\ 323$ Ma, indicating that the rhyolitic tuff magma is mostly Paleoproterozoic–Mesoproterozoic thickened lower crust Melted to form. According to comprehensive analysis, the Jiulongshan Formation in Xuanhua basin was formed in the late Middle Jurassic–early Late Jurassic compressional structural setting. The research results provide new data for the study of the age attribution and formation environment of the Jiulongshan Formation.

Keywords: Jiulongshan formation; LA–ICP–MS zircon U–Pb dating; Hf isotope; Xuanhua basin

宣化盆地位于华北板块北部, 20世纪20年代以来, 针对宣化盆地侏罗纪地层, 建立了比较完整的年代地层和岩石地层格架, 自下而上发育南大岭组、下花园组、九龙山组、髻髻山组和土城子组(张晔卿等, 2017)。九龙山组以碎屑沉积岩为主, 化石较少。长期以来, 许多学者重点对其开展了岩石地层、沉积环境和古生物学研究(武法东等, 2004; 柳永清等, 2006), 但缺少精确的同位素年龄资料, 其形成时代一直存在较大争议。近年来开展的区调、综合研究项目(李声之等, 1996; 朱更新等, 2000; 刘晓文等, 2005; 郭金城等, 2008; 林成发, 2019)主要根据地层叠置关系将九龙山组时代厘定为中侏罗世。季强等(2004)、张路锁等(2016)主要根据热河生物群种属将九龙山组时代置于中—晚侏罗世。陈海燕等(2014)对承德盆地九龙山组凝灰岩进行了锆石 U–Pb 定年, 获得了 (163.4 ± 1.1) Ma 的年龄数据, 并结合区域资料将九龙山组时代限定于中侏罗世晚期—晚侏罗世早期。笔者在冀西北宣化盆地及周缘开展 1:50 000 区域地质调查时, 于九龙山组中下部识别出 3 层流纹质凝灰岩, 呈夹层状产出。笔者通过岩石学、岩石地球化学及锆石 U–Pb 同位素定年研究, 确定该套流纹质凝灰岩形成于晚侏罗世早期 (161.9 ± 0.8) Ma 挤压构造背景, 为冀西北侏罗纪地层研究提供了新的资料。

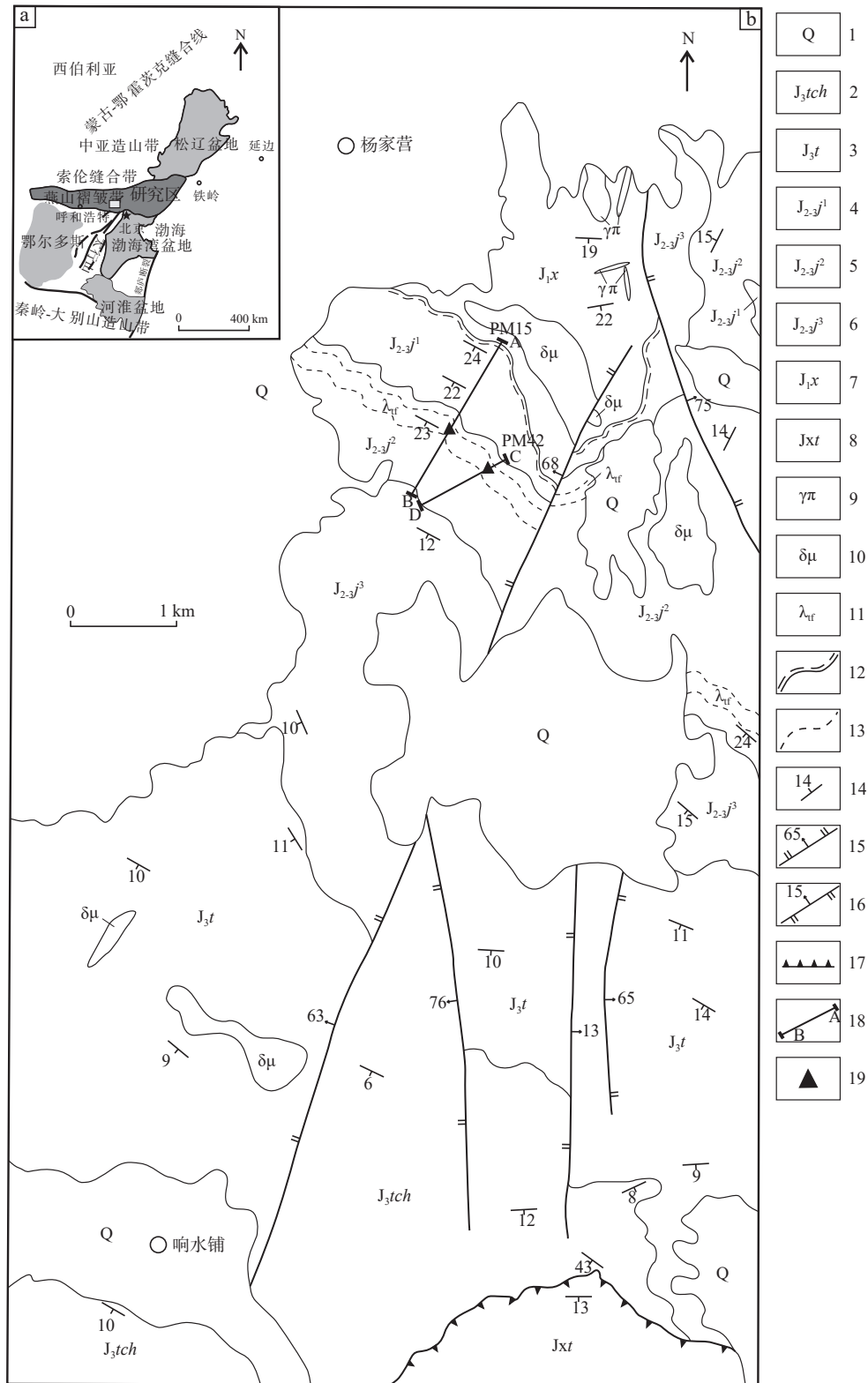
1 区域地质背景

研究区位于宣化区北东杨家营—响水铺村一带, 中生代时期的区域大地构造位置属于燕山褶皱带(图 1a), 区内褶皱、断裂和逆冲推覆构造发育, 构造线以 EW 向和 NE 向为主, 近 SN 向次之(张长厚等, 2011; Liu et al., 2013; Zhang et al., 2014)。

研究区东南角少量出露中元古代铁岭组海相碳酸盐岩沉积地层。区内中生代沉积—火山地层发育, 自下而上划分为下花园组、九龙山组、髻髻山组和土城子组(图 1b)。

下花园组为一套以河湖相细砂岩、粉砂岩及碳质粉砂岩为主的岩性组合, 产丰富的银杏类、真蕨类、苏铁纲等植物化石, 根据化石组合、种属, 确定其为早侏罗世沉积。髻髻山组总体为一套中性、中碱性火山岩夹凝灰质砂、砾岩, 底部发育不稳定的基性火山岩, 整合于九龙山组之上。土城子组主要由厚层含砾砂岩、砂质砾岩、泥质粉砂岩和泥岩等组成, 顶部夹流纹质凝灰岩、沉凝灰岩(孙立新等, 2007), 整合于髻髻山组之上, 形成时代为晚侏罗世(Davis et al., 2001, 2005; Liu et al., 2015)。

区域上, 九龙山组以河流相杂色粗细碎屑岩沉积为主, 偶夹火山碎屑岩, 厚为 55~1 520 m(朱更新等, 2000; 郭金城等, 2008; 张晔卿等, 2017)。在宣化区北



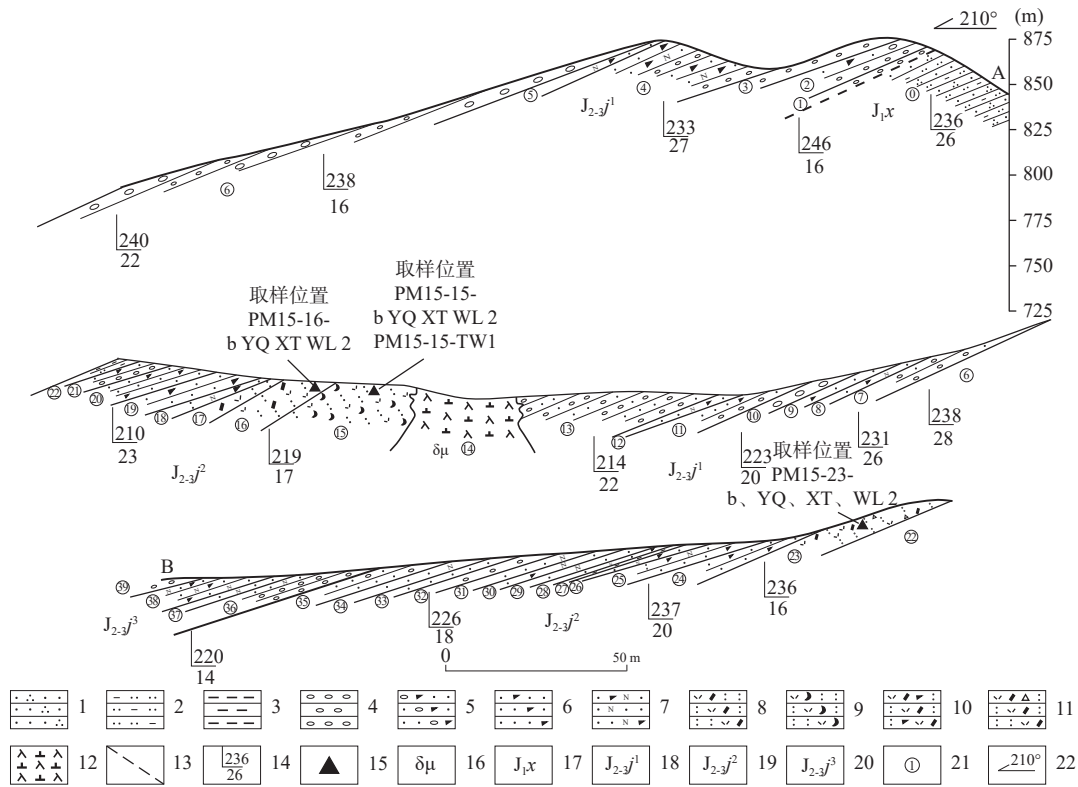
1.第四系; 2.土城子组; 3.髫髻山组; 4.九龙山组一段; 5.九龙山组二段; 6.九龙山组三段; 7.下花园组; 8.铁岭组; 9.花岗岩斑岩; 10.闪长玢岩; 11.流纹质凝灰岩夹层; 12.平行不整合界线; 13.岩性界线; 14.地层产状; 15.正断层及倾角; 16.逆断层及倾角; 17.逆冲推覆断层; 18.实测剖面位置; 19.取样位置

图1 冀西北宣化盆地一带地质简图(a 据郑亚东等, 2000 修改; b 据白春东等, 2022 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of Xuanhua Basin in Northwest Hebei

东杨家营-响水铺村一带九龙山组为一套以杂色砾岩、岩屑粗砂岩、细砂岩为主的河流相碎屑岩组合,中下部夹流纹质凝灰岩夹层,总厚度约为 790.7 m。与下伏

下花园组呈平行不整合接触,与上覆髻髻山组为整合接触关系(图 2、图 3)。根据其岩性组合特征,将其划分为 3 个段。



1.石英砂岩; 2.泥质粉砂岩; 3.泥岩; 4.砾岩; 5.砾质岩屑砂岩; 6.岩屑砂岩; 7.岩屑长石砂岩; 8.流纹质晶屑凝灰岩; 9.流纹质玻屑凝灰岩; 10.流纹质岩屑晶屑凝灰岩; 11.流纹质含角砾晶屑凝灰岩; 12.闪长玢岩; 13.平行不整合界线; 14.地层产状; 15.取样位置; 16.闪长玢岩; 17.下花园组; 18.九龙山组一段; 19.九龙山组二段; 20.九龙山组三段; 21.分层号; 22.剖面总体方位

图 2 宣化盆地杨家营-响水铺一带九龙山组实测剖面图(PM15)

Fig. 2 The measured profile of the Jiulongshan Formation in the Yangjiaying-Xiangshuipu area of the Xuanhua basin (PM15)

一段:为灰绿色、灰黄色薄层-块状层复成分砾岩,灰黄色、灰色、灰黄色中层砂质砾岩,灰白色、灰黄色中层砾质岩屑砂岩及灰白色、灰黄色、浅灰绿色中层粗粒岩屑砂岩。厚为 282.8 m。

二段:底部为灰白色流纹质含角砾晶屑凝灰岩,上部为灰黄色、灰色、青灰色薄-中层粗粒岩屑砂岩,灰白色、深灰色长石砂岩,灰白色、灰绿色、褐黄色薄-中层砾岩,深灰色、灰黄色含砾砂岩夹深灰绿色薄层泥质粉砂岩与灰绿色、砖红色薄层泥岩。厚为 245.3 m。

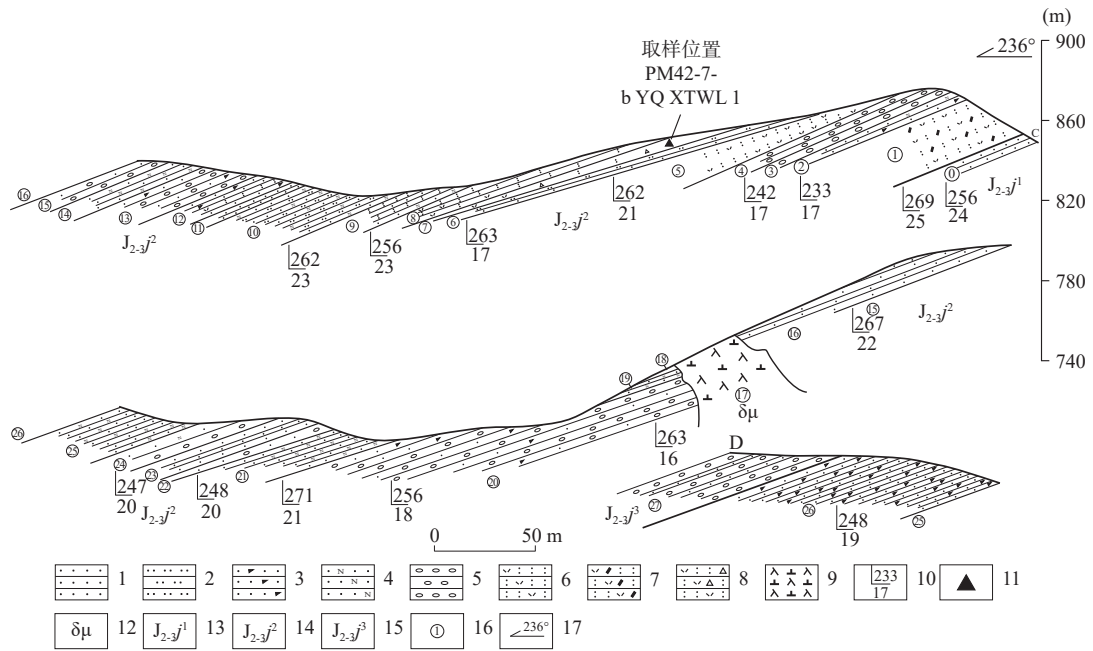
三段:为灰绿色中-厚层复成分砾岩、灰白色、紫红色薄层-厚层含砾粗粒岩屑砂岩、灰绿色、紫红色中层岩屑砂岩、灰绿色紫红色薄层泥岩及灰绿色薄层长石砂岩。厚为 262.6 m。

笔者重点对九龙山组中部流纹质凝灰岩开展同位素年代学和岩石地球化学特征、形成环境等研究。

2 地质特征及岩石学特征

研究区内九龙山组流纹质含角砾晶屑凝灰岩主要发育于九龙山组二段中下部,呈夹层状产出,共包括 3 个夹层,单层厚度为 4~16 m,横向延伸不稳定。笔者在流纹质凝灰岩夹层共采集 4 件样品:PM15-15-b2(N 40°34'54", E 115°12'57"), PM15-16-b2(N 40°34'54", E 115°12'57"), PM15-23-b2(N 40°34'54", E 115°12'57")以及 PM42-7-b1(N 40°34'38", E 115°13'07")(图 4a、图 4b)。

蚀变流纹质玻屑凝灰岩(样品 PM15-15-b2):风化面呈灰色-灰白色,新鲜面呈浅褐灰色,凝灰结构,块状构造。由火山角砾岩屑(5%±),晶屑(20%±),岩屑(15%±),玻屑、火山尘(60%±)组成,以小于 2 mm 的



1.砂岩; 2.粉砂岩; 3.岩屑砂岩; 4.长石砂岩; 5.砾岩; 6.流纹质凝灰岩; 7.流纹质晶屑凝灰岩; 8.流纹质含角砾凝灰岩; 9.闪长玢岩; 10.地层产状; 11.取样位置; 12.闪长玢岩; 13.九龙山组一段; 14.九龙山组二段; 15.九龙山组三段; 16.分层号; 17.剖面总体方位

图3 宣化盆地杨营-响水铺一带九龙山组实测剖面图(PM42)

Fig. 3 The measured profile of the Jiulongshan Formation in the Yangjiaying-Xiangshuipu area of the Xuanhua basin (PM42)

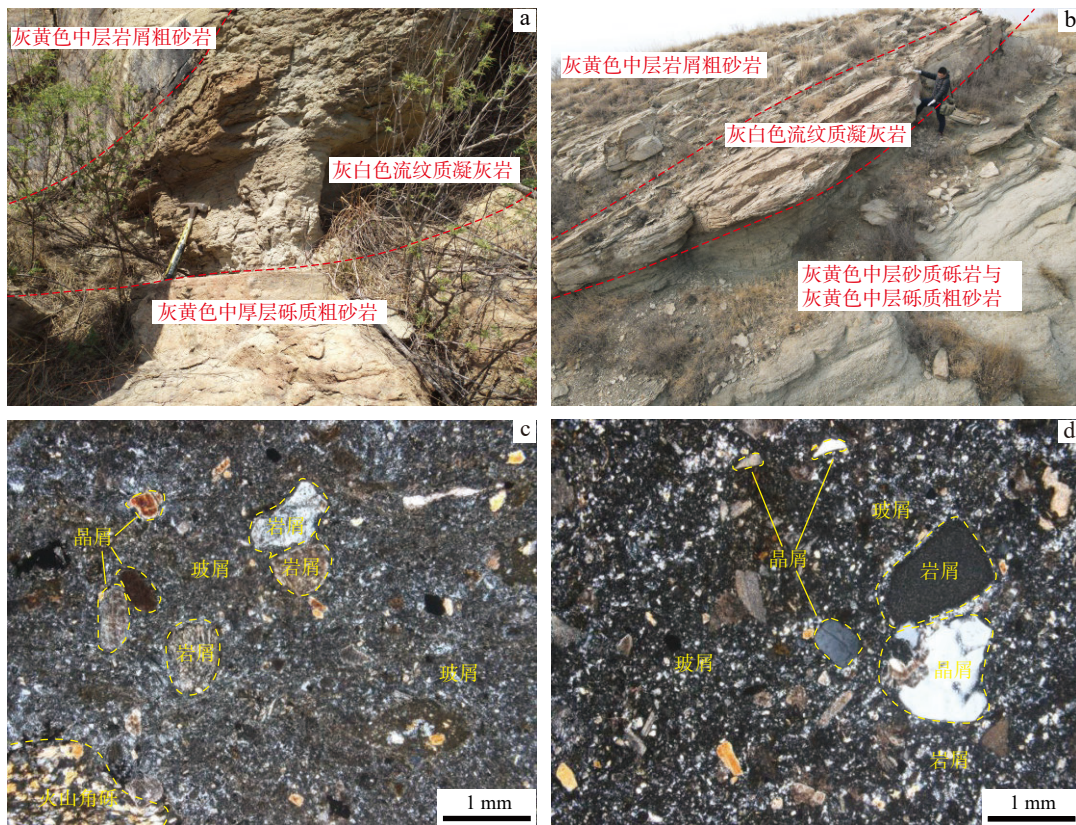


图4 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩野外露头 and 显微镜下图

Fig. 4 Microscopic characteristics of the Jiulongshan Formation tuff in Xuanhua area

凝灰物为主,大于2 mm的火山角砾次之。晶屑:主要由石英、长石组成,粒径一般为0.1~2 mm,星散状分布。石英呈他形粒状,粒内可见轻波状消光。长石包括钾长石、斜长石,表面高岭土化、碳酸盐化发育,斜长石粒内可见较模糊聚片双晶残留。岩屑:以刚性岩屑为主,少见塑性岩屑,主要为<2 mm的凝灰物,个别为>2 mm的火山角砾。刚性岩屑主呈团块状、不规则状等,星散状定向分布,成分主要为粗面岩、细砂岩等。玻屑外形已完全消失,与火山尘一起脱玻化为隐微晶状长英质等,杂乱状分布,稍显定向特征(图4c、图4d)。

3 岩石地球化学特征

样品岩石地球化学分析测试由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。主量元素采用碱烧法制备样品,使用Axios^{max}X射线荧光光谱仪完成分析测试。烧失量、H₂O⁺和H₂O⁻采用P1245电子分析天平完成测试。微量元素和稀土元素采用酸溶法制备样品,使用X Serise2等离子体质谱仪完成测试(高剑峰等,2003),测试结果见表1。

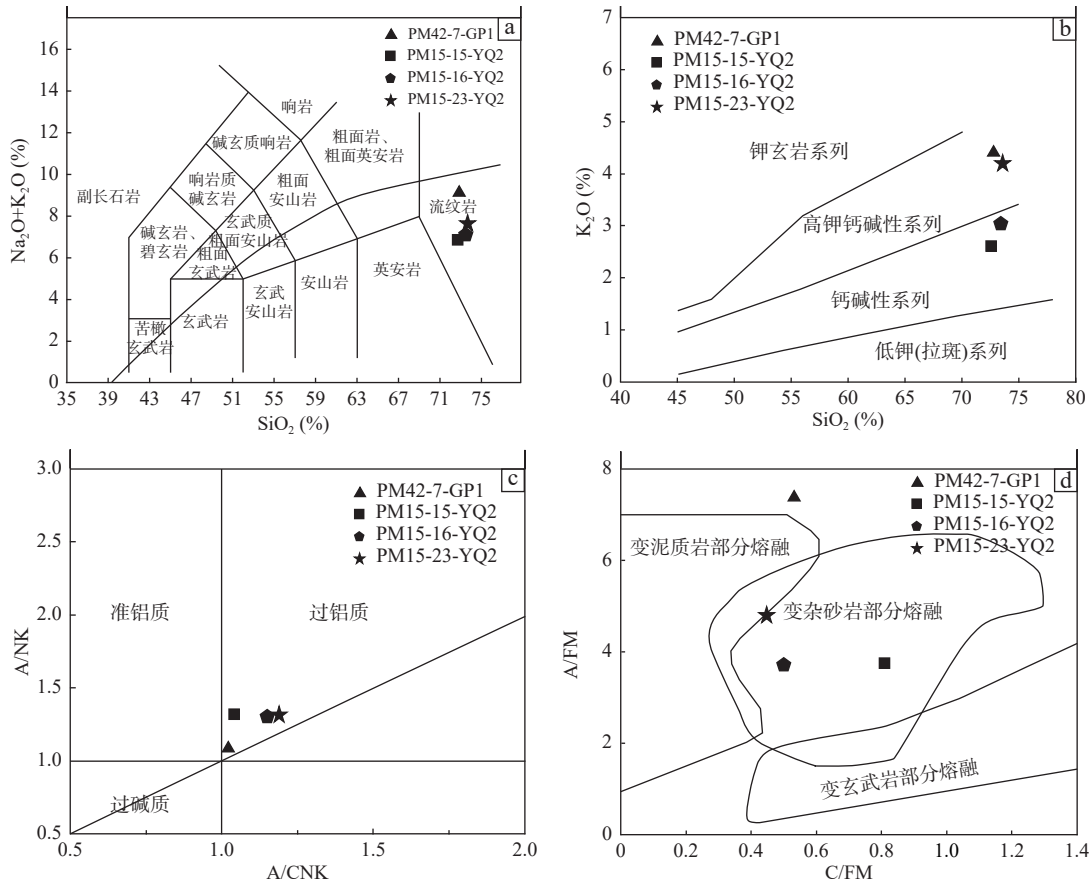
表1 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩主量元素(%)、微量元素(10⁻⁶)测试分析结果表

Tab. 1 Analysis results of major elements (%) and trace elements (10⁻⁶) of rhyolite tuff in Jiulongshan Formation in the Xuanhua Basin

样品号	PM15-15YQ2	PM15-16YQ2	PM15-23YQ2	PM42-7GP1	样品号	PM15-15YQ2	PM15-16YQ2	PM15-23YQ2	PM42-7GP1
SiO ₂	72.59	73.43	73.57	72.81	In	0.03	0.03	0.03	0.03
TiO ₂	0.25	0.29	0.24	0.15	W	0.90	1.01	0.70	0.65
Al ₂ O ₃	13.28	13.25	13.49	13.91	Bi	0.13	0.13	0.13	0.21
Fe ₂ O ₃	1.26	1.87	1.66	1.01	Cs	1.26	1.29	1.71	1.23
FeO	0.75	0.30	0.27	1.05	Ba	672.04	762.17	732.98	1 166.14
MnO	0.08	0.08	0.05	0.07	La	31.74	35.65	34.34	49.38
MgO	0.87	0.82	0.58	0.23	Ce	60.14	68.20	64.50	85.29
CaO	1.58	0.97	0.68	0.55	Pr	6.57	7.53	7.00	8.09
Na ₂ O	4.34	4.10	3.48	4.79	Nd	22.27	25.82	22.94	27.74
K ₂ O	2.69	3.04	4.21	4.42	Sm	3.60	4.02	3.52	3.67
P ₂ O ₅	0.07	0.09	0.06	0.04	Eu	0.83	0.98	0.80	1.14
灼失量	1.99	1.55	1.51	0.68	Gd	3.32	3.73	3.12	3.39
Total	99.84	99.83	99.85	99.83	Tb	0.48	0.48	0.43	0.42
A/NK	1.32	1.32	1.31	1.10	Dy	2.53	2.64	2.24	2.12
A/CNK	1.04	1.15	1.19	1.02	Ho	0.46	0.48	0.42	0.41
Li	21.48	25.58	17.01	17.42	Er	1.45	1.42	1.36	1.25
Be	1.48	1.61	1.97	1.91	Tm	0.24	0.24	0.24	0.22
Sc	5.83	6.11	7.60	2.60	Yb	1.35	1.36	1.38	1.42
V	27.04	29.43	25.94	18.54	Lu	0.28	0.26	0.27	0.23
Cr	10.11	13.12	7.24	5.15	Tl	0.36	0.41	0.56	0.93
Co	3.81	3.89	3.25	2.00	Pb	14.78	12.42	12.33	22.48
Ni	3.55	4.29	4.52	4.00	Th	6.52	6.49	7.18	11.59
Cu	6.54	7.86	7.11	8.51	U	1.46	1.47	1.97	2.40
Zn	43.23	49.33	42.18	34.56	Zr	116.03	128.87	125.81	138.01
Ga	14.87	14.66	15.79	13.35	Hf	2.98	3.03	2.86	4.27
Rb	71.20	77.36	107.06	117.92	∑REE	135.25	152.82	142.55	184.76
Sr	333.33	336.03	341.94	177.91	LREE	125.14	142.20	133.09	175.31
Y	116.03	128.87	125.81	138.01	HREE	10.10	10.62	9.46	9.45
Nb	16.99	17.02	15.85	11.80	LREE/HREE	12.39	13.39	14.07	18.54
Ta	15.73	16.19	18.47	13.58	La/Yb	16.85	18.77	17.80	25.01
Mo	0.88	0.81	0.94	1.16	δEu	0.73	0.77	0.74	0.98
Cd	0.40	0.55	0.62	0.51	δCe	1.02	1.02	1.02	1.05

4件流纹质凝灰岩样品 SiO_2 为 72.59%~73.57%，平均为 73.10%；分异指数 DI 为 86.92~93.73，显示岩浆经历了中等-较强的分异演化作用； $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 7.03%~9.22%，全碱含量较高； $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.62%~1.21%，平均为 0.87%；里特曼指数 σ 为 1.66~2.84，平均为 2.02。在 TAS 分类图解中(图 5a)，4件样品全部

落在流纹岩区域内；在 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 图解中(图 5b)显示为钙碱性-高钾钙碱性系列； Al_2O_3 含量为 13.25%~13.91%，铝饱和指数 A/CNK 为 1.02~1.19，属于过铝质系列(图 5c)。上述特征表明，九龙山组流纹质凝灰岩属于高 Si、高 K 钙碱性过铝质岩石(邓晋福等, 2015)(表 1)。



a. TAS 图解(据 Middlemost et al., 1994)；b. $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(据 Peccerillo et al., 1976；Middlemost et al., 1985)；
c. $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解(据 Maniar et al., 1989)；d. $\text{C}/\text{FM}-\text{A}/\text{FM}$ 图解(据 Alther et al., 2000)

图 5 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩岩石学、岩石地球化学图

Fig. 5 Petrology and petrogeochemistry diagrams of rhyolite tuff in Jiulongshan Formation in the Xuanhua basin

在微量元素蛛网图上(表 1, 图 6a)，流纹质凝灰岩富集 Ba、Th、U 等元素，亏损 Rr、Sr、P、Nb、Ti 等元素。 $\sum\text{REE}=135.25\times 10^{-6}\sim 184.76\times 10^{-6}$ ，稀土元素总量较低， $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}=12.39\sim 18.54$ ， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=16.24\sim 25.01$ ，总体显示岩石具富集轻稀土元素特征，同时，具强烈的轻、重稀土分馏特征；具弱负 Eu 异常特征($\delta\text{Eu}=0.73\sim 0.98$)。稀土配分模式为右倾型平缓-低“V”曲线(表 1, 图 6b)。地球化学特征显示，九龙山组流纹质凝灰岩与岛弧火山岩特征相近，根据其产出于华北地台板内造山带的事实，说明其形成于挤压构造环境。

4 锆石 U-Pb 和 Hf 同位素测试分析

4.1 测试分析方法

河北省区域地质矿产调查研究所实验室负责九龙山组流纹质凝灰岩样品粉碎及锆石挑选。采用重矿物分离方法分选锆石，在双目镜下人工挑选，将挑选好的锆石制成样品靶，在阴极发光上进行锆石显微照相。北京锆年领航科技有限公司使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)完成同位素测试及定年工作。激光剥蚀平台及质谱仪型号详见文

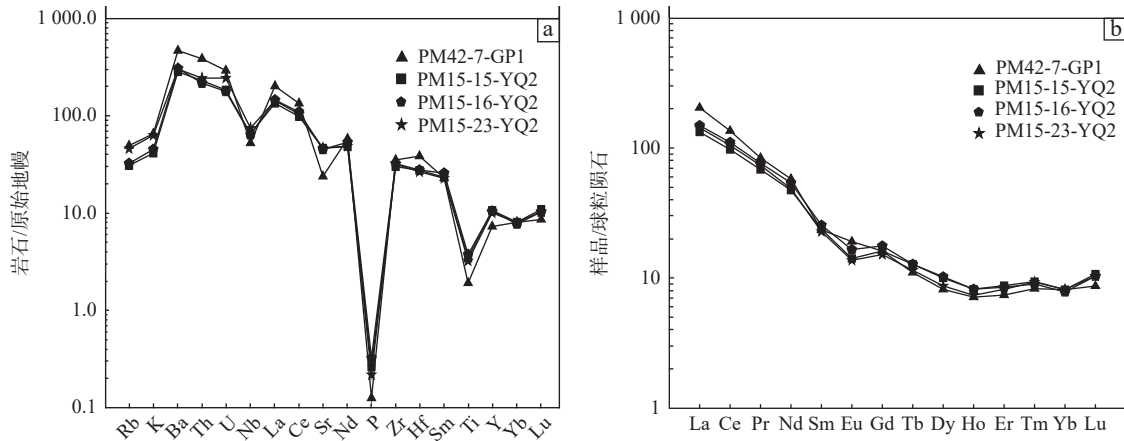


图 6 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)
(标准化值据 Sun et al., 1989; b 标准化值据 Boynton et al., 1984)

Fig. 6 (a) The normalized trace element spider web diagram of the original mantle of the rhyolitic tuff in the Jiulongshan Formation in the Xuanhua Basin and (b) the normalized rare earth element distribution map of the chondrites

献 Thompson 等(2018)。此外, 数据处理及分馏校正等过程详见文献吴福元等(2007)、Paton 等(2010)和李艳广等(2023)。

九龙山组流纹质凝灰岩锆石原位 Hf 同位素测试分析在中国地质调查局天津地质调查中心完成, 所用仪器系统、型号、条件及分析方法详见文献吴福元等(2007)、耿建珍等(2011)。其中, ^{176}Lu 衰变常数为 $\lambda=1.865\times 10^{-11}/\text{y}$ (Scherer et al., 2001), 球粒陨石的($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_{CHUR} 和 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$)_{CHUR} 分别为 0.033 2 和 0.282 772 (Blichert et al., 1997), 现今亏损地幔的 ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_{DM} 和 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$)_{DM} 值分别为 0.283 25 和 0.038 4(Nowell et al., 1998), 用于计算地壳模式年龄

($t_{\text{DM}2}$) 的大陆地壳平均值为 $0.015(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{cc}})$ (Griffin et al., 2000)。

4.2 分析结果

九龙山组流纹质凝灰岩锆石 CL 图像显示锆石具清晰震荡环带, Th/U 值为 0.45~0.84, 平均值为 0.62, 属岩浆成因锆石。对 20 粒锆石的 U-Th-Pb 原位区开展了同位素测定, 测得的 12 个数据的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 同位素结果近于一致, 其变化范围为 160.3~163.4 Ma(表 2, 图 7), 加权平均值为 (161.9±0.8)Ma(置信度 95%, MSWD=1.03, n=12)(图 8), 该年龄代表流纹质凝灰岩的形成时代, 为晚侏罗世早期。

锆石原位 Hf 同位素测试分析结果见表 3。11 颗

表 2 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年测试结果表

Tab. 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results of the rhyolite tuff in the Jiulongshan Formation in the Xuanhua basin

样号	Pb(10^{-6})	U(10^{-6})	Th(10^{-6})	Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
					$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
					比值	2 σ	比值	2 σ	比值	2 σ	比值	2 σ	比值	2 σ	比值	2 σ
1	15.9	428.0	510.0	0.84	0.174 0	0.010 0	0.025 7	0.000 7	0.050 5	0.002 7	163.4	4.2	162.6	8.6	200.0	120.0
2	8.3	172.5	260.7	0.66	0.172 0	0.011 0	0.025 5	0.000 4	0.048 5	0.003 2	162	2.7	160.2	9.6	110.0	140.0
3	8.6	126.8	280.0	0.45	0.176 0	0.013 0	0.025 4	0.000 5	0.049 9	0.003 7	162	3.1	164.0	11.0	130.0	150.0
4	5.5	117.6	177.0	0.66	0.181 0	0.011 0	0.025 5	0.000 5	0.051 5	0.003 0	162.3	3	169.5	9.7	220.0	120.0
5	10.0	167.9	336.2	0.50	0.177 4	0.008 2	0.025 7	0.000 4	0.050 2	0.002 4	163.4	2.2	165.1	7.0	162.0	100.0
6	3.4	77.7	107.8	0.72	0.173 0	0.014 0	0.025 5	0.000 5	0.049 6	0.004 1	162.5	3	161.0	12.0	80.0	160.0
7	14.7	269.5	483.6	0.56	0.170 2	0.007 2	0.025 2	0.000 3	0.048 7	0.002 2	160.3	2.1	159.2	6.3	109.0	93.0
8	13.7	337.0	455.4	0.74	0.171 9	0.008 8	0.025 2	0.000 5	0.050 6	0.002 7	160.8	2.7	160.7	7.6	190.0	110.0
9	16.4	282.5	558.0	0.51	0.176 9	0.007 6	0.025 3	0.000 5	0.051 0	0.002 1	161.1	3.2	164.8	6.5	210.0	89.0
10	16.8	319.7	542.7	0.59	0.174 7	0.006 0	0.025 5	0.000 3	0.049 6	0.001 8	162.5	2.1	163.1	5.2	153.0	74.0
11	13.2	329.6	452.7	0.73	0.167 1	0.009 0	0.025 2	0.000 5	0.049 5	0.002 8	160.6	3.2	156.6	7.9	150.0	120.0
12	9.2	155.9	305.9	0.51	0.183 0	0.016 0	0.025 6	0.000 6	0.051 7	0.004 5	163.1	3.4	170.0	13.0	230.0	180.0

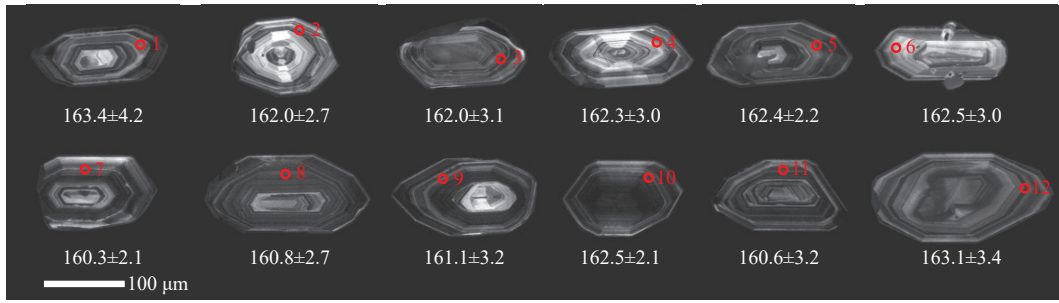


图7 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩锆石阴极发光图

Fig. 7 Zircon cathodoluminescence images of zircons from the rhyolite tuff of the Jiulongshan Formation in the Xuanhua Basin

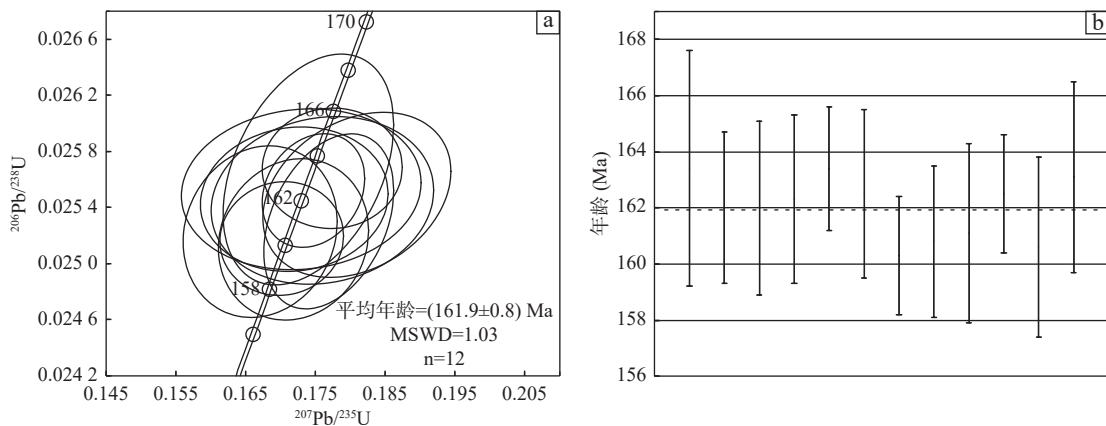


图8 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 8 Zircon U-Pb age harmony diagram of the rhyolite tuff in the Jiulongshan Formation in the Xuanhua basin

表3 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩锆石 Hf 同位素测试分析结果表

Tab. 3 Zircon Hf isotope analysis results of the rhyolitic tuff in the Jiulongshan Formation in the Xuanhua Basin

测点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f\text{Lu}/\text{Hf}$
1	163.4	0.037 086	0.001 460	0.282 453	0.907 103	-7.84	0.91	1 143	1 703	-0.96
2	162.0	0.021 016	0.000 875	0.282 506	0.871 696	-5.94	0.87	1 051	1 582	-0.97
3	162.0	0.027 908	0.001 202	0.282 496	0.903 081	-6.32	0.90	1 074	1 606	-0.96
4	162.3	0.041 201	0.001 614	0.282 494	0.988 113	-6.45	0.99	1 090	1 614	-0.95
5	163.4	0.041 546	0.001 632	0.282 529	0.768 552	-5.20	0.77	1 041	1 536	-0.95
6	162.5	0.038 554	0.001 474	0.281 720	0.962 652	-33.79	0.96	2 174	3 323	-0.96
7	160.3	0.021 689	0.000 839	0.282 494	0.914 987	-6.40	0.92	1 067	1 610	-0.97
8	160.8	0.023 269	0.000 906	0.282 437	0.952 907	-8.40	0.95	1 148	1 736	-0.97
9	161.1	0.031 761	0.001 333	0.282 532	0.848 201	-5.11	0.85	1 028	1 529	-0.96
10	160.6	0.020 550	0.000 812	0.282 465	0.770 649	-7.41	0.77	1 107	1 674	-0.98
11	163.1	0.057 856	0.002 243	0.282 601	1.036 609	-2.71	1.04	953	1 379	-0.93

岩浆成因锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.281 720~0.282 601, 平均为 0.282 43; $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-33.79\sim-2.71$, 平均为 -8.69, 二阶段亏损模式年龄(t_{DM2})主要为 1 379~1 736 Ma。

4.3 九龙山组形成时限

区域上, 九龙山组自建组以来, 其时代的厘定, 大

多依据其组内发育的古生物化石及其上覆的髫髻山组火山岩年龄推断而成(Davis et al., 2001; 李伍平等, 2001; Cope, 2003; 季强等, 2004; 袁洪林等, 2005; 刘健等, 2006), 缺少精确的年代学数据支持。在古生物学方面, 宣化盆地九龙山组陆相沉积地层中化石稀少,

区域上该组中产 *Coniopters—Pnoenicopsis* 植物群化石,为中侏罗世植物群特征(米家榕, 1996)。在同位素年代学方面,刘健等(2006)依据上覆髫髻山组底部粗安岩锆石 U-Pb 年龄和下部的崖门子花岗闪长岩(九龙山组角度不整合于该岩体之上)侵位年龄,将九龙山组时代暂定为 158~161 Ma,属晚侏罗世早期。陈海燕等(2014)在承德盆地九龙山组下部凝灰岩中获得了(163.4±1.1) Ma 的锆石 U-Pb 年龄数据。王卫国等(2017)在宣化盆地九龙山组二段火山岩标志层中获得了 167.0 Ma 的锆石 U-Pb 年龄。本次工作在九龙山

组中下部的流纹质凝灰岩获得了(161.9±0.8) Ma 的锆石 U-Pb 年龄,但由于取样位置并非九龙山组底部(图 1b、图 2、图 3),说明九龙山组形成的下限年龄要大于 161.9 Ma。九龙山组上限年龄可参考上覆髫髻山组火山岩底界年龄确定为 156.6~161.1 Ma(表 4),同时该年龄也代表了九龙山组上限年龄值。按照国际地层委员会(ICS)中侏罗世和晚侏罗世界限(163.5±1.0) Ma,文中结合王卫国等(2017)在宣化盆地九龙山组火山岩获得 167.0 Ma 的锆石 U-Pb 年龄,认为九龙山组形成时代为中侏罗世晚期—晚侏罗世早期较为合理。

表 4 宣化盆地附近地区中晚侏罗世九龙山—髫髻山期同位素年龄数据表

Tab. 4 Middle and Late Jurassic Jiulongshan-Tiaojishan period isotopic age data in the area near the Xuanhua basin

序号	层位	采样地点	测试对象	年龄(Ma)	测试方法	资料来源
1	髫髻山组(下部)	北京十三陵	安山岩	161.1±1.9	Ar-Ar(plateau)	Davis et al., 2001
2	髫髻山组(底部)	北京十三陵	凝灰岩	157.2±1.2	U-Pb(LA-ICP-MS)	于海飞等, 2016
3	髫髻山组(底部)	北京西山	粗安岩	156.6±3.1	U-Pb(SHRIMP)	赵越等, 2004
4	髫髻山组(底部)	承德盆地	凝灰岩	160.7±0.8	Ar-Ar(plateau)	Davis et al., 2001
5	髫髻山组(底部)	承德盆地	凝灰岩	160.7±0.8	Ar-Ar(plateau)	Davis et al., 2001
6	髫髻山组(底部)	承德盆地	安山岩	159.7±1.3	Ar-Ar(plateau)	Cope, 2003
7	九龙山组(下部)	承德盆地	凝灰岩	163.4±1.1	U-Pb(LA-ICP-MS)	陈海燕等, 2014
8	九龙山组(下部)	宣化盆地	粗面岩	167.0	U-Pb(LA-ICP-MS)	王卫国等, 2017
9	九龙山组(下部)	宣化盆地	凝灰岩	161.9±0.8	U-Pb(LA-ICP-MS)	本文

5 岩石成因及形成环境

5.1 岩石成因

九龙山组流纹质凝灰岩夹层富集 Ba、Th、U 元素,亏损 Rr、Sr、P、Nb、Ti 等元素;岩石具富集轻稀土元素特征,同时具强烈的轻、重稀土分馏特征,以及具弱负 Eu 异常等特征。稀土配分模式为右倾型,总体特征与岛弧火山岩特征相近,根据其产出于华北地台板内造山带的事实,确定其形成于板内挤压构造环境。

Rb/Sr=0.21~0.66,平均为 0.35,接近于地壳平均值(0.32)(Taylor et al., 1985); Zr/Hf=32.30~43.94,平均为 39.44,接近于地壳平均值(33.33)(Taylor et al., 1985);副矿物中发育石榴子石。说明九龙山组流纹质凝灰岩岩浆主要来源于地壳,为壳熔型富铝的岩浆源区。Sr/Y=15.1~21.6,可能暗示岩浆源于一个加厚陆壳的底部(Deng et al., 1998)。在 C/FM-A/FM 图中落入变杂砂岩部分熔融区和变质泥岩部分熔融区附近

(图 5d),表明其为地壳部分熔融而成。

由于锆石原位 Lu-Hf 同位素能更好地收集岩浆混合、分异等阶段的同位素组成变化,所以其能有效判断地幔岩浆端元(Li et al., 2007; 吴福元等, 2007)。Hf 同位素研究表明, $\epsilon_{\text{Hf}}(t) < 0$ 的岩石为地壳物质部分熔融的产物(Vervoort et al., 2000; Griffin et al., 2004)。研究区九龙山组流纹质凝灰岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -33.79 \sim -2.71$,大多为 $-8.40 \sim -2.71$, $f\text{Lu}/\text{Hf}$ 值为 $-0.93 \sim -0.98$,平均为 -0.96 ,明显小于镁铁质地壳的 $f\text{Lu}/\text{Hf}$ 值(-0.34)(Amelin et al., 2000),接近硅铝质地壳的 $f\text{Lu}/\text{Hf}$ 值(-0.72),说明其为地壳物质部分熔融的产物。九龙山组流纹质凝灰岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.281720 \sim 0.282601$,比值很接近,指示其物源比较单一。在 Hf 同位素相关图解中(图 9)样品分析结果落入 1.8 Ga 地壳与球粒陨石演化线之间,说明成岩物质来源于下地壳接近亏损地幔一侧,因此其物源多为古元古代—中元古代加厚的下地壳。

综上所述,九龙山组流纹质凝灰岩岩浆源于古元古代—中元古代加厚的下地壳熔融。

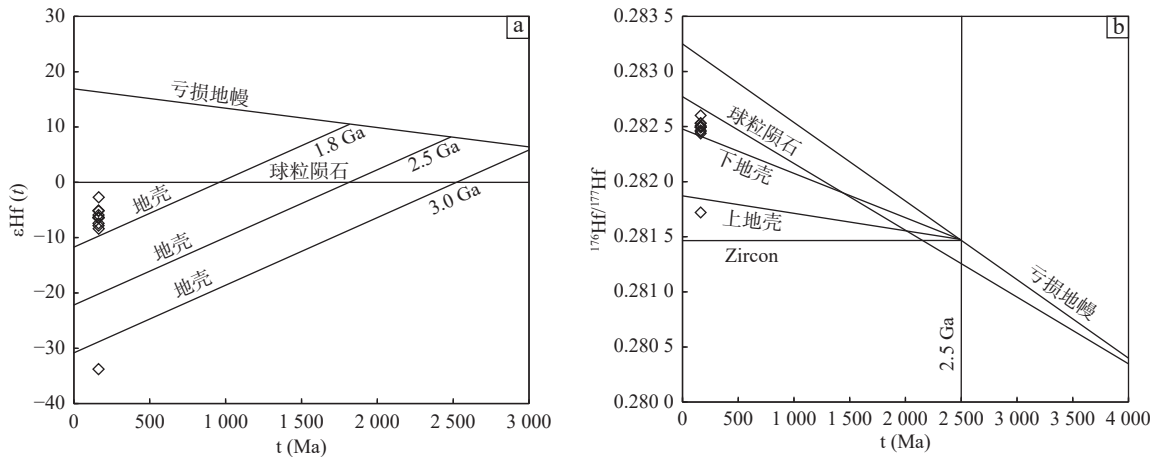


图9 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩锆石 Hf 同位素特征图(a 据 Yang et al., 2006; b 据吴福元等, 2007)

Fig. 9 Zircon Hf isotope characteristics of the rhyolite tuff in the Jiulongshan Formation in the Xuanhua Basin

5.2 构造环境讨论

董树文等(2008, 2019)研究认为, 在 175~136 Ma 期间中国东部为强挤压造山期, 具体表现为幕式挤压变形, 对应燕山地区早期强挤压变形期(髫髻山组底部不整合事件 170~160 Ma 及晚期张家口组底部不整合事件 150~135 Ma)。

研究区九龙山组底部总体为一套陆相块状复成分砾岩和夹含砾粗砂岩沉积岩层, 可能发育于冲积扇扇根亚相泥石流沉积微相, 基本层序不发育。复成分砾岩中砾石成分有白云岩、火山岩、花岗岩及沉积砂砾岩, 层理不发育, 混杂堆积, 分选性较差, 大小不一排列无序, 砂泥质充填, 与下伏下花园组接触面凹凸不平, 推测为山脉受强烈挤压剥蚀而在山前或山间坳陷中快速堆积而致(图 10a), 表明九龙山早期盆地构造活动非常剧烈。在 Pearce 等(1984)定义的花岗岩构造环境判别图(图 11a、图 11b)中, 流纹质凝灰岩样

品投点均落在火山弧和同碰撞造山区域, 结合其产出于华北地台板内的事实, 说明其形成于板内挤压构造背景。众多学者(刘少峰等, 2004; Dong et al., 2013; Li et al., 2018)认为, 早侏罗世下花园组煤系地层之上的九龙山组砾石层、张家口组火山岩之下发育的土城子组砾岩及具有埃达克质的髫髻山组基性火山岩(图 10b)及 170~140 Ma 的逆冲推覆构造(刘少峰等, 2018)等, 均为挤压变形的标志。研究区九龙山组下部砾岩为快速堆积的产物, 之上的髫髻山组下部发育具有埃达克质的基性火山岩; 张家口组下部土城子组复成分砾岩十分发育; 晚侏罗世晚期, 区内至少发生两次逆冲推覆事件, 形成逆冲推覆构造和高角度逆冲断层系, 说明从中侏罗世—晚侏罗世, 研究区区域大地构造背景为挤压环境。

综上所述, 宣化盆地九龙山组形成于挤压坳陷盆地环境, 与最新的研究成果不谋而合。

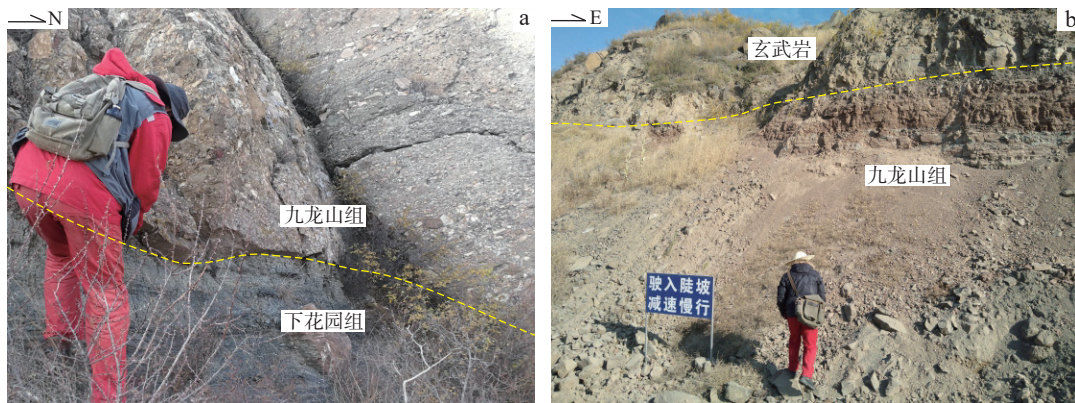


图 10 宣化盆地九龙山组底部砾岩与上部玄武岩接触宏观面貌图

Fig. 10 Macroscopic appearance of conglomerate at the bottom of Jiulongshan Formation in Xuanhua Basin in contact with basalt at the upper part

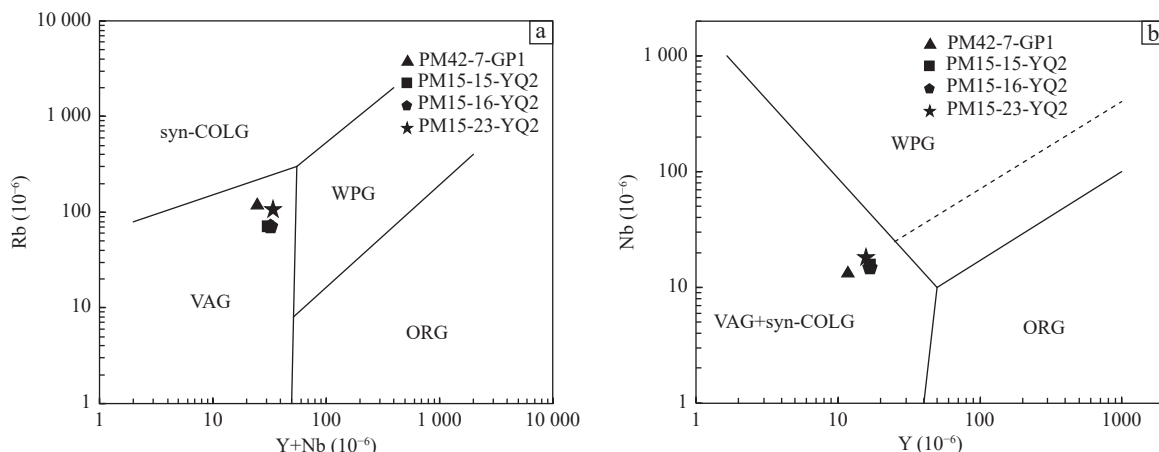


图 11 宣化盆地九龙山组流纹质凝灰岩(Y+Nb)-Rb 判别图解和 Y-Nb 判别图(据 Pearce et al., 1984)

Fig. 11 (Y+Nb)-Rb discriminant diagram and Y-Nb discriminant diagram of rhyolite tuff in Jiulongshan Formation in the Xuanhua Basin

6 结论

(1)本次工作在宣化盆地九龙山组偏下部流纹质凝灰岩中获得了(161.9±0.8)Ma 的锆石 U-Pb 年龄,结合前人资料,确定宣化盆地九龙山组形成于中侏罗世晚期—晚侏罗世早期。

(2)九龙山组流纹质凝灰岩 Rb/Sr 值平均为 0.35, Zr/Hf 值平均为 39.44, 副矿物中发育石榴子石。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大多为 -8.40~-2.71, $f\text{Lu}/\text{Hf}$ 值平均为 -0.96, 说明其为地壳物质部分熔融的产物。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.281\ 720\sim 0.282\ 601$, 指示其物源比较单一。结合相关图解判别, 确定其物源为古元古代—中元古代加厚的下地壳。

(3)九龙山组流纹质凝灰岩富集 Ba、Th、U, 亏损 Rr、Sr、P、Nb、Ti, 稀土配分模式为右倾型, 结合图解判别及其产出于华北地台板内造山带的事实, 确定其形成于板内挤压构造环境。

(4)宣化盆地九龙山组下部发育快速堆积的砾岩, 之上的髻髻山组下部发育具有埃达克质的基性火山岩; 区内张家口组下部发育土城子组复成分砾岩; 晚侏罗世晚期, 区内至少发生了两次逆冲推覆事件。这说明从中侏罗世—晚侏罗世, 研究区区域大地构造背景为挤压环境。由此判断, 宣化盆地九龙山组形成于挤压拗陷盆地环境。

致谢: 本文是以“河北省沙岭子、宣化县、深井镇、涿鹿县 1:5 万区域地质调查”项目为依托, 文中所用的原始数据是项目组成员在极为恶劣的工

作生活条件下取得的, 在此对项目组人员表示感谢, 并衷心的感谢审稿人对本文提出的宝贵意见和建议。

参考文献(References):

- 白春东, 李金和, 李杰, 等. 河北省沙岭子、宣化县、深井镇、涿鹿县 1:5 万区域地质调查[R]. 廊坊: 河北省区域地质调查院, 2022, 1-424.
- 陈海燕, 张运强, 张计东, 等. 冀北承德盆地侏罗系九龙山组凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. 地质通报, 2014, 33(7): 966-973.
- CHEN Haiyan, ZHANG Yunqiang, ZHANG Jidong, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of tuff of Jiulongshan Formation from Chengde Basin, Northern Hebei[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(7): 966-973.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 等. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议[J]. 地质论评, 2015, 61(4): 717-734.
- DENG Jinfu, LIU Cui, FENG Yanfang, et al. On the Correct Application in the Common Igneous Petrological Diagrams: Discussion and Suggestion[J]. Geological Review, 2015, 61(4): 717-734.
- 董树文, 张岳桥, 陈宣华, 等. 晚侏罗世东亚多向汇聚构造体系的形成与变形特征[J]. 地球学报, 2008, 29(3): 306-317.
- DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, CHEN Xuanhua, et al. The Formation and Deformational Characteristics of East Asia Multi-Direction Convergent Tectonic System in Late Jurassic[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 29(3): 306-317.
- 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90 周年[J]. 中国科学辑 D 辑: 地球科学, 2019, 49(6): 913-938.

- DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LI Hailong, et al. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multiplate convergence in East Asia—Commemorating 90th years of the “Yanshan Orogeny” [J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2019, 49(6): 913–938.
- 高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 等. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(6): 844–850.
- GAO Jianfeng, LU Jianjun, LAI Mingyuan, et al. Analysis of Trace Elements in Rock Samples Using HR-ICP-MS[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2003, 39(6): 844–850.
- 郭金城, 张振利, 张计东, 等. 1:250 000 张家口市幅区域地质调查报告[R]. 廊坊: 河北省地质调查院, 2008, 1–365.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. *地质通报*, 2011, 30(10): 1508–1513.
- GENG Jianzhen, LI Huaikun, ZHANG Jian, et al. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10): 1508–1513.
- 张晔卿, 张振利, 刘增校, 等. 中国区域地质志·河北志[M]. 北京: 地质出版社, 2017, 1–1272.
- ZHANG Yeqing, ZHANG Zhenli, LIU Zengxiao, et al. Regional Geology of China·Hebei Chronicles [M]. Beijing: Geological Press, 2017, 1–1272.
- 季强, 陈文, 王五力, 等. 中国辽西中生代热河生物群[M]. 北京: 地质出版社, 2004, 1–375.
- JI Qiang, CHEN Wen, WANG Wuli, et al. Mesozoic Jehol Biota in Western Liaoning, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004, 1–375.
- 李声之, 王继兴, 王喜富, 等. 河北省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996, 1–146.
- LI Shengzhi, WANG Jixing, WANG Xifu, et al. Rock Formations in Hebei Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996, 1–146.
- 李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 274–282.
- LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274–282.
- 李伍平, 章大港, 路凤香, 等. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(2): 123–133.
- LI Wuping, ZHANG Dagang, LU Fengxiang, et al. Geochemical Features and Origin of Volcanic Rocks of Tiaojishan Formation in Western Hills of Beijing[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2001, 20(2): 123–133.
- 林成发. 华北燕山褶皱-逆冲带西段侏罗纪沉积盆地演化及区域构造意义[D]. 北京: 中国地质大学, 2019, 1–203.
- LIN Chengfa. Jurassic tectono-sedimentary evolution history of the Western Yanshan fold-thrust Belt, North China, and its tectonic implication[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019, 1–203.
- 柳永清, 刘燕学, 姬书安, 等. 内蒙古宁城和辽西凌源热水汤地区道虎沟生物群与相关地层 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及有关问题的讨论[J]. *科学通报*, 2006, 51(19): 2273–2282.
- LIU Yongqing, LIU Yanxue, JI Shuan, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of Daohugou biota and related strata in Ningcheng, Inner Mongolia, and Rehuitang, Lingyuan, Western Liaoning and related issues[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(19): 2273–2282.
- 刘晓文, 胡健民, 赵越, 等. 冀北地区早、中侏罗世地层划分及其区域对比[J]. *地质通报*, 2005, 24(9): 872–878.
- LIU Xiaowen, HU Jianmin, ZHAO Yue, et al. Stratigraphic division and correlation of the Early-Middle Jurassic in Northern Hebei China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(9): 872–878.
- 刘少峰, 李忠, 张金芳. 燕山地区中生代盆地演化及构造体制[J]. *中国科学辑 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(S1): 19–31.
- LIU Shaofeng, LI Zhong, ZHANG Jinfang. Mesozoic Basin Evolution and Tectonic System in Yanshan Area[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2004, 34(S1): 19–31.
- 刘少峰, 林成发, 刘晓波, 等. 冀北张家口地区同构造沉积过程及其与褶皱-逆冲作用耦合[J]. *中国科学辑 D 辑: 地球科学*, 2018, 48(6): 705–731.
- LIU Shaofeng, LIN Chengfa, LIU Xiaobo, et al. Syn-tectonic sedimentation and its linkage to fold-thrusting in the region of Zhangjiakou, North Hebei, China[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2018, 48(6): 705–731.
- 刘健, 赵越, 柳小明. 冀北承德盆地髻髻山组火山岩的时代[J]. *岩石学报*, 2006, 22(11): 2617–2630.
- LIU Jian, ZHAO Yue, LIU Xiaoming. Age of the Tiaojishan Formation volcanics in the Chengde Basin, Northern Hebei Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(11): 2617–2630.
- 米家榕. 冀北辽西早、中侏罗世植物古生态学及聚煤环境[M]. 北京: 地质出版社, 1996, 1–169.
- MI Jiarong. Early and Middle Jurassic Plant Paleocology and Coal Accumulation Environment in Northern Hebei and Western Liaoning[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 1–169.
- 孙立新, 赵凤清, 王惠初, 等. 燕山地区土城子组划分、时代与盆地性质探讨[J]. *地质学报*, 2007, 81(4): 445–453.
- SUN Lixin, ZHAO Fengqing, WANG Huichu, et al. Correlation of Tuchengzi Formation and Implications of the Basin Tectonic Evolution in the Intracontinental Yanshan Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 445–453.
- 王卫国, 郝连成, 韩明洋, 等. 河北省西洋河幅等 5 幅 1:5 万区域地质调查[R]. 廊坊: 中国人民武装警察部队黄金第七支队, 2017, 1–457.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用

- [J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185–220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220.
- 武法东, 陈永进, 侯宇安, 等. 滦平盆地沉积—构造演化及高精度层序地层特征[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2004, 29(5): 625–630.
- WU Fadong, CHEN Yongjin, HOU Yuan, et al. Characteristics of Sedimentary-Tectonic Evolution and High-Resolution Sequence Stratigraphy in Luanping Basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(5): 625–630.
- 于海飞, 张志诚, 帅歌伟, 等. 北京十三陵—西山髻髻山组火山岩年龄及其地质意义[J]. *地质论评*, 2016, 62(4): 807–826.
- YU Haifei, ZHANG Zhicheng, SHUAI Gewei, et al. SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb Ages and Geological Significance of the Volcanic Rocks in the Tiaojishan Formation in Ming Tombs Area-Western Hills, Beijing[J]. *Geological Review*, 2016, 62(4): 807–826.
- 袁洪林, 柳小明, 刘勇胜, 等. 北京西山晚中生代火山岩 U-Pb 锆石年代学及地球化学研究[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(9): 821–836.
- YUAN Honglin, LIU Xiaoming, LIU Yongsheng, et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Late Mesozoic volcanic rocks in Western Hills, Beijing[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2005, 35(9): 821–836.
- 赵越, 张拴宏, 徐刚, 等. 燕山板内变形带侏罗纪主要构造事件[J]. *地质通报*, 2004, 23(9): 854–863.
- ZHAO Yue, ZHANG Shuanhong, XU Gang, et al. The Jurassic major tectonic events of the Yanshan intraplate deformation Belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9): 854–863.
- 朱更新, 孙立新, 杨有世, 等. 1:250 000 承德市幅区域地质调查报告[R]. 廊坊: 河北省地质调查院, 2000, 1-469.
- 张路锁, 杨森丛, 范和平, 等. 冀北侏罗纪地层划分与《中国地层表》的对应关系[J]. *地质论评*, 2016, 62(4): 840–848.
- ZHANG Lusuo, YANG Sencong, FAN Heping, et al. The Corresponding Relation Between Jurassic Stratigraphic Classification of North Hebei and the Stratigraphic Chart of China[J]. *Geological Review*, 2016, 62(4): 840–848.
- 张长厚, 李程明, 邓洪菱, 等. 燕山-太行山北段中生代收缩变形与华北克拉通破坏[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2011, 41(5): 593–617.
- ZHANG Changhou, LI Chengming, DENG Hongling, et al. Mesozoic contraction deformation in the Yanshan and Northern Taihang mountains and its implications to the destruction of the North China[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2011, 41(5): 593–617.
- 郑亚东, G A Davis, 王琮, 等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. *地质学报*, 2000, 74(4): 289–302.
- ZHENG Yadong, G A Davis, WANG Cong, et al. Major Mesozoic tectonic events in the Yanshan Belt and the Plate Tectonic Setting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(4): 289–302.
- Alther R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 2000, 50(1–3): 51–73.
- Amelin Y, Halliday AN, Lee DC. Early-middle archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(24): 4205–4225.
- Blichert-Toft J, Albarède F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1–2): 243–258.
- Boynton W V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [M]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 63–114.
- Cope T C. Sedimentary evolution of the Yanshan fold-thrust belt, northeast China[D]. California: Stanford University, 2003, 1–230.
- Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China[J]. *Memoir of the Geological Society of America*, 2001, 194: 171–197.
- Davis G A. The Late Jurassic “Tuchengzi/Houcheng” Formation of the Yanshan fold-thrust Belt: an analysis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 331–345.
- Deng J F, Luo Z H, Zhao H L, et al. Trachyte and syenite: Petrogenesis constrained by the petrological phase equilibrium[M]. *Collected works of international symposium on geological science by department of geology, Peking University*, 1998, 745–757.
- Dong S W, Gao R, Yin A, et al. What drove continued continent-continent convergence after ocean closure? Insights from high-resolution seismic-reflection profiling across the Daba Shan in central China[J]. *Geology*, 2013, 41(6): 671–674.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U–Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 2004, 131(3–4): 231–282.
- Li J H, Dong S W, Cawood P A, et al. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 490: 170–179.
- Li X H, Li Z X, Li W X, et al. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-

- Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I-type and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. *Lithos*, 2007, 96(1-2): 186-204.
- Liu S F, Su S, Zhang G W. Early Mesozoic basin development in North China: Indications of cratonic deformation [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2013, 62: 221-236.
- Liu J, Zhao Y, Liu A K, et al. Late Jurassic to Early Cretaceous sedimentary-tectonic development in the Chengde Basin, Yanshan fold-thrust belt, North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2015, 114(Part 4): 611-622.
- Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- Middlemost E A K. *Magmas and Magmatic Rocks* [M]. London: Longman, 1985, 1-266.
- Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 37(3-4): 215-224.
- Nowell G M, Kempton P D, Noble S R, et al. High precision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionisation mass spectrometry: insights into the depleted mantle [J]. *Chemical Geology*, 1998, 149(3-4): 211-233.
- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, et al. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2010, 11(3): Q0AA06.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey, Contrib [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63-81.
- Scherer E, Munker C, Mezger K. Calibration of the lutetium-hafnium clock [J]. *Science*, 2001, 293(5530): 683-687.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of ocean basalts: Implications for mantle composition and processes, in *Magmatism in the Ocean Basins* [J]. Geological Society London Special Publications, 1989, 423: 13-345.
- Taylor S R, Mclennan S M. *The continental Crust: Its composition and evolution* [M]. Blackwell: Oxford Press, 1985, 1-312.
- Thompson J M, Meffre S, Danyushevsky L. Impact of air, laser pulse width and fluence on U-Pb dating of zircons by LA-ICP MS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2018, 33(2): 221-230.
- Vervoort J D, Patchett P J, Albarede F, et al. Hf-Nd isotopic evolution of the lower crust [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 181(1/2): 115-129.
- Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 246(3-4): 336-352.
- Zhang S H, Zhao Y, Davis G A., et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 131: 49-87.