

西准噶尔白碱滩红山梁组硅质岩的地球化学特征、成因及形成构造环境

王 韬¹, 李永军², 李 海³, 付 浩², 郑孟林¹, 黄家瑄², 韩 杨¹, 徐 森⁴

(1. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 3. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 4. 河北省煤田地质局第二地质队, 河北 邢台 054500)

摘要: 红色硅质岩是西准噶尔包古图构造带晚泥盆世红山梁组的主要岩石类型, 约占地层总厚的 80%, 研究其岩石地球化学特征, 可揭示岩石成因、指示形成的构造环境, 为区内晚泥盆世构造古地理演化研究提供新的沉积学信息。红山梁组上部硅质岩以红色-红褐色为主, 层理不发育, 多呈团块状、条带状, 与火山熔岩共生或见于火山岩夹层中, 未见海绵骨针; 中部硅质岩为红色, 薄层状构造, 层理发育, 多见沉积纹层, 海绵骨针丰富, 与凝灰质粉砂岩、凝灰质泥质粉砂岩呈互层; 下部硅质岩见红色、灰色, 岩相学与岩性介于上述两类, 显示过渡性。上部与下部硅质岩相对低 SiO_2 (71.90%、87.48%)、 CaO (1.45%、1.28%)、 P_2O_5 (0.09%、0.06%) 和 δEu , 高 TiO_2 (0.57%、0.2%)、 Al_2O_3 (13.47%、5.54%)、 MgO (1.80%、0.94%)、 Na_2O (3.93%、0.64%)、 K_2O (2.05%、1.14%)、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (1.35、0.40)、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ (0.74、0.71) 和 Sc 、 V 、 Cr 、 Cu 、 Zn 、 Sr 、 Y 、 Zr 、 La 、 Ce 、 Nd 、 Yb 、 Lu 、 ΣREE 、 Th/Sc 、 Th/U 值; 中部硅质岩主量元素的含量及对应比值与之刚好相反, 高 SiO_2 (91%)、 CaO (2.14%)、 P_2O_5 (0.48%), 低 TiO_2 (0.07%)、 Al_2O_3 (1.05%)、 MgO (0.32%)、 Na_2O (0.14%)、 K_2O (0.14%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ (0.37), 显著贫在岩浆作用中相对富集的 Sc 、 V 、 Cr 等元素。相关比值及图解分析表明, 本组火山作用由下到上经历了强→弱→强的变化过程。上部与下部硅质岩以火山成因硅为主, 形成于靠近弧火山的弧后盆缘区, 而中部硅质岩以生物成因为主, 形成于火山休眠期的弧后盆地环境。

关键词: 硅质岩; 地球化学; 岩石成因; 构造环境; 红山梁组; 西准噶尔

中图分类号: P581; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)03-0573-14

Geochemical characteristics, genesis and tectonic setting of the siliceous rocks from Hongshanliang Formation in Baijiantan, Western Junggar

WANG Tao¹, LI Yong-jun², LI Hai³, FU Hao², ZHENG Meng-lin¹, HUANG Jia-xuan², HAN Yang¹
and XU Miao⁴

(1. Exploration and Development Institute, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China; 2. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 4. Hebei Coalfield Geology Bureau Second Geological Team, Xingtai 054500, China)

Abstract: The red siliceous rocks of the Late Devonian Hongshanliang Formation in the Baogutu tectonic belt, Western Junggar, are extensively developed, comprising approximately 80% of the total stratigraphic thickness. Studying its geochemical characteristics can reveal the genesis of the rock and indicate the tectonic environment,

收稿日期: 2024-10-28; 接受日期: 2025-04-03; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05008-006-003-001); 国家重点研发计划(2018YFC060400)

作者简介: 王 韬(1990-), 男, 工程师, 硕士, 油气综合地质, E-mail: wang-t@petrochina.com.cn; 通讯作者: 李永军(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事区域地质、构造地质学调查研究与教学, E-mail: Yongjunl@chd.edu.cn。

and provide new sedimentary information for the study of the Late Devonian tectonic paleogeographic evolution in the area. The upper siliceous rocks are predominantly red to reddish-brown, with poorly developed bedding, and mainly occur in massive or banded forms. They are often associated with volcanic lava or within volcanic rock interlayers, but no sponge spicules have been observed. The middle siliceous rocks are red, display thin-bedded structures with well-developed stratification, and frequently exhibit sedimentary lamination with abundant sponge spicules. These rocks are interbedded with tuffaceous siltstone and tuffaceous argillaceous siltstone. The lower siliceous rocks, which are red or gray, show transitional lithological and petrographic features between the two aforementioned types. The upper and lower siliceous rocks are relatively low in SiO_2 (71.90%, 87.48%), CaO (1.45%, 1.28%), P_2O_5 (0.09%, 0.06%) and δEu , and high in TiO_2 (0.57%, 0.2%), Al_2O_3 (13.47%, 5.54%), MgO (1.80%, 0.94%), Na_2O (3.93%, 0.64%), K_2O (2.05%, 1.14%), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (1.35, 0.40), $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + ^\text{T}\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (0.74, 0.71) and Sc , V , Cr , Cu , Zn , Sr , Y , Zr , La , Ce , Nd , Yb , Lu , ΣREE , Th/Sc , Th/U . The content and corresponding ratio of the major elements in the siliceous rocks in the middle are just the opposite, with high SiO_2 (91%), CaO (2.14%), P_2O_5 (0.48%), low TiO_2 (0.07%), Al_2O_3 (1.05%), MgO (0.32%), Na_2O (0.14%), K_2O (0.14%), $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + ^\text{T}\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (0.37), and significantly depleted in Sc , V , Cr and other elements that are relatively enriched in magmatism. The correlation ratios and graphic analysis show that the volcanism in Hongshanliang Formation had experienced a strong $\rightarrow$ weak $\rightarrow$ strong changing process from bottom to top. The upper and lower siliceous rocks are mainly volcanogenic silicon, which are formed in the back-arc basin margin area near the arc volcano, while the middle siliceous rocks are mainly biogenic, which are formed in the back-arc basin environment during the volcanic dormancy period.

Key words: siliceous rock; geochemistry; petrogenesis; tectonic setting; Hongshanliang Formation; Western Junggar
Fund support: The National Science and Technology Major Project (2017ZX05008-006-003-001); The National Key Research and Development Program of China (2018YFC060400)

作为中亚造山带的重要组成部分,西准噶尔构造带的沉积史和构造演化史备受瞩目 (Sengör *et al.*, 1993; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2008, 2015, 2019; 李永军等, 2021, 2024a; Duan *et al.*, 2023), 而位于西准噶尔构造带最南缘的包古图构造带是其焦点。遗憾的是,迄今有关包古图构造带古生代的沉积史主要来自石炭纪的沉积记录 (Geng *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2019, 2022; Li *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2023; Yin *et al.*, 2024), 但对前石炭纪因缺乏早石炭世之前的沉积记录而无从可知。

晚泥盆世红山梁组是包古图构造带上新发现的一套最老的史密斯地层,这为前石炭世的沉积记录与相关研究提供了难得的研究对象。李永军等 (2024a) 就红山梁组的建组剖面、空间分布、地层层序、岩石组合及地质时代等进行了研究报道,并就该组基性火山岩的地球化学特征、岩石成因及其构造背景进行了讨论 (李永军等, 2024c), 本文就该组中极为发育且作为建组剖面上最具典型性特征的红色硅质岩,开展了岩石地球化学研究,讨论其成因与形

成的构造环境,为区内晚泥盆世构造古地理演化研究提供新的沉积学信息。

1 区域地质概况

位于中亚造山带西南缘的西准噶尔构造带,总体构造格架为走向 NE-SW 向,发育了达尔布特等多条泥盆纪蛇绿岩带、石炭纪弧-盆建造、晚石炭世赞岐岩带,并受到二叠纪以来左行走滑断裂和中生代以来右行走滑断裂的改造 (Xiao *et al.*, 2008, 2009a, 2009b; Xiao and Santosh, 2014; Tang *et al.*, 2017, 2019; 肖文交等, 2019; 李永军等, 2021; Duan *et al.*, 2022; 支倩等, 2024)。哈拉阿拉特山 (简称哈山)-乌尔禾一带位处中亚造山带巴尔喀什-西准噶尔增生造山带南缘的包古图构造带,区内海相地层由下到上依次为下石炭统包古图组 $\rightarrow$ 希贝库拉斯组,上石炭统成吉思汗山组 $\rightarrow$ 哈拉阿拉特组 $\rightarrow$ 阿腊德依克赛组。进入早二叠世,区内经重大的海陆转换 (李永军等, 2024b) 后进入了陆相演化阶段,形成了下二叠统佳木河组陆相磨拉石建造及三叠系

以来的河湖相沉积。区内的岩浆作用以晚石炭世大规模的火山作用为代表,晚石炭世-早二叠世也有大量壳源花岗岩类侵位。三叠纪以来,罕有岩浆作用发生。

包古图构造带位于西准噶尔构造带南缘,发育达尔布特等多条泥盆纪蛇绿岩带(杨高学, 2016)、石炭纪弧-盆建造、晚石炭世赞岐岩(李甘雨等, 2017; 李永军等, 2021),并受到二叠纪以来左行走滑断裂和中生代以来右行走滑断裂的改造。期间,发生了从石炭纪弧-盆构造体系向二叠纪陆内构造

演化的洋-陆转换过程,形成了石炭系海相陆源碎屑岩-火山岩沉积组合向二叠系陆相磨拉石-滞后弧火山岩转变的记录(李永军等, 2024b)。

包古图构造带最为发育的地层为石炭系海相碎屑岩-火山岩建造,另有数条晚泥盆世蛇绿构造混杂岩等[图1,图中奥陶系-志留系原属玛依勒山小区地层(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993, 1999)],因区域性走滑断裂向东推挤而进入包古图地层小区)。至早二叠世,区内已转化为陆相磨拉石建造(李永军等, 2016)及其后的湖盆相沉积。

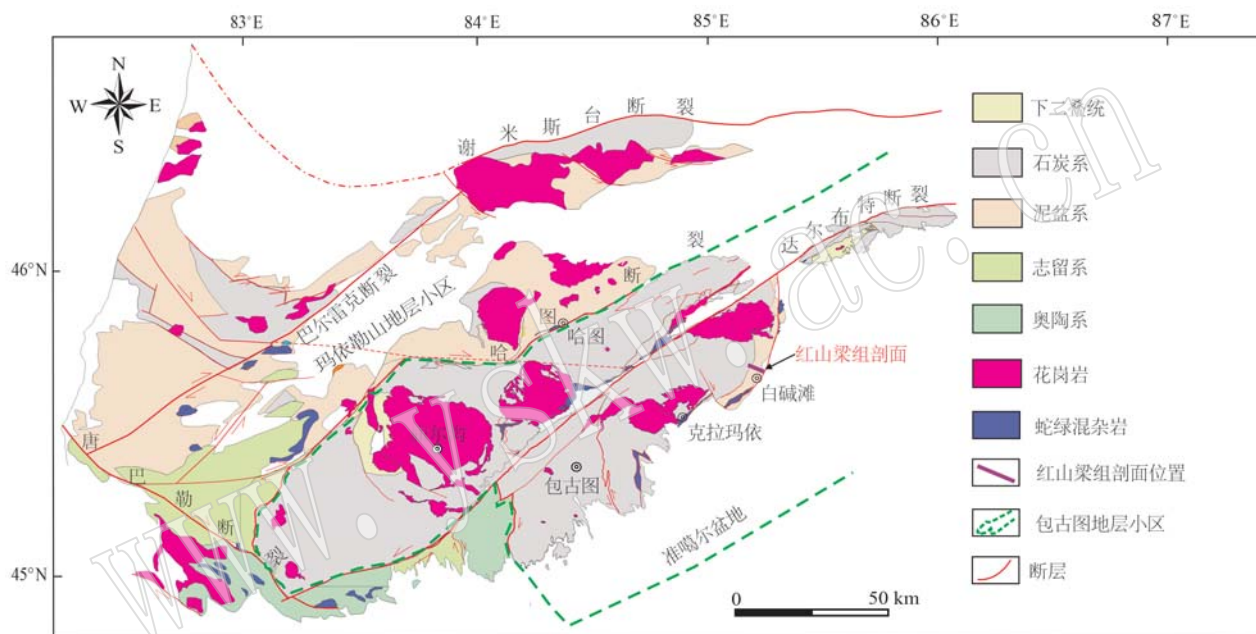


图1 西准噶尔包古图构造带地质简图(据李永军等, 2021 修改)

Fig. 1 Geological map of the Baogutu tectonic zone in Western Junggar (modified after Li Yongjun *et al.*, 2021)

红山梁组为一套晚泥盆世红色“硅质岩、粉砂质硅质岩、凝灰质硅质岩,间夹枕状玄武岩、杏仁状玄武岩、玄武安山岩及少量中基性火山碎屑岩”的海相沉积组合,与上覆包古图组深灰色-灰黑色含碳粉砂岩呈整合接触,该组的火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 365.9~374.6 Ma(李永军等, 2024a),下部层位的硅质岩中还见有较丰富的海绵骨针化石。

2 红山梁组硅质岩地质特征

红山梁组中硅质岩以鲜红色为主(表1,图2),局部夹褐红色、杂灰色、灰绿色和暗红色层。多呈层状、条带状、透镜状产出,部分层位见沉积纹层等。

受后期构造作用改造,部分硅质岩中发育褶皱变形、透镜化、碎裂岩化、石香肠化及网状裂隙等变形构造。本组硅质岩间夹数层枕状玄武岩、安山岩等。硅质岩多与凝灰质粉砂岩呈互层产出,火山喷发作用一定程度上为硅质岩的形成提供了物源。在岩相学、产出与分布上,本组自下而上总体可划分出区分性明显的3个大层序。

代表性硅质岩岩石薄片镜下观察与统计显示,主要由隐晶质硅质(45%~90%,体积分数)、少量黏土矿物(<5%)和暗色矿物组成。其中隐晶质硅质多呈隐晶状、球粒状集合体产出,黏土矿物呈细小片状分布,暗色矿物多呈细粒状、浸染状分布(图3a~f)。部分样品含有0.1%~10%的海绵骨针化石,个体直径0.08~0.7 mm,形态以二轴四射针为主,另有少量

表 1 红山梁组硅质岩主、微量测试样品对应地层的岩相学及矿相学特征

Table 1 Corresponding petrographic and mineralogical characteristics of major and trace elements testing samples of siliceous rocks in the Hongshanliang Formation

层号	样号	岩石名称	岩相学及矿相学特征	产出与分布特征	成因类型
23-24	14	红色、红褐色含铁硅质岩	隐晶结构、条带状-块状构造, 偶见红褐色硅质岩层理, 层系厚约为 6~8 cm	硅质岩红色-红褐色为主, 总体层理不发育, 团块状、条带状, 铁质高, 与火山熔岩共生或见于火山岩夹层中, 未见海绵骨针, 变形后多为透镜状、石香肠化	火山质为主
	13	红色透镜状、条带状硅质岩	局地呈团块状, 隐晶结构、块状构造, 呈近圆状, 大小 0.1~0.3 mm		
	12	红-灰白色硅质岩互层	隐晶结构、块状构造、红色硅质岩与灰白色呈互层, 层系 1~3 cm; 隐晶硅质组成, >65%		
	11	红色硅质岩	隐晶结构、块状构造, 几乎全由隐晶硅质组成, 含少量泥质和见海绵骨针碎片		
	10	灰色硅质岩	灰色条带状, 局部可见清晰层理, 层系厚度 1~2 cm, 隐晶结构、块状构造, 几乎全由隐晶硅质组成		
3-23	9	红色含铁硅质岩	隐晶结构, 薄层状构造。见海绵骨针碎片, 硅质呈隐晶状集合体, 成层分布; 泥质由<0.004 mm 土状的黏土矿物组成, 成厚度不等的微层平行分布于硅质之间, 互层分布	红色为主, 层理发育, 薄层状为主, 多见沉积纹层, 铁质含量较低, 局部层位海绵骨针丰富, 与凝灰质粉砂岩、泥质粉砂岩互层或成分过渡, 褶皱后多为等厚弯曲变形	生物成因为主
	8	红色硅质岩	隐晶结构, 薄-中层状构造, 层厚 2~8 cm (与粉砂岩 2:3 互层; 夹红褐色灰岩透镜体), 微层理清晰, 见海绵骨针		
	7	红色硅质岩	薄层状构造、不等粒结构, 石英: 75%, <0.05 mm; 黏土矿物: 7%, <0.005 mm; 不透明矿物: 3%, 0.005~0.05 mm, 见铁氧化物和炭质。偶见海绵骨针碎片		
	6	红色含海绵骨针硅质岩	隐晶结构、薄-纹层状构造, 该样品由球粒状-隐晶质硅质和泥质组成, 见海绵骨针碎片		
	5	含海绵骨针红色硅质泥岩	隐晶-泥质结构、薄层状构造。该样品由隐晶硅质(45%)和泥质(54%)混合构成, 见海绵骨针碎片		
	4	红色硅质岩	薄层状构造、隐晶结构, 石英: 90%, <0.005 mm; 黏土矿物: 3%, <0.005 mm; 不透明矿物: 7%, 偶见海绵骨针		
	3	红色海绵骨针硅质岩	薄层状构造、隐晶结构, 石英: 78%, <0.001 mm; 海绵骨针碎片: 7%, 0.05~0.1 mm; 黏土矿物: 3%, <0.005 mm; 不透明矿物: 10%, 海绵骨针丰富		
1-2	2	红色硅质岩	薄-中层状构造、隐晶结构, 石英: 75~100%, <0.001 mm; 海绵骨针碎片: 10%, 0.02~0.05 mm; 黏土矿物: 3%, <0.005 mm; 不透明矿物: 7%, 0.005~0.1 mm, 偶见海绵骨针碎片	红色、灰色, 总体特征介于上述两类, 显示过渡性	过渡类型
	1	红色间夹灰色硅质岩	薄-中层状构造, 互层状构造, 隐晶结构, 石英: 85%, <0.001 mm		

T 形针和三轴五射针(图 3g、3h)。

3 样品分析方法

首先将野外经过挑选并且已经预先处理的样品表面通过清洗、切割以及削皮等步骤, 去除了样品表面附着的杂质, 再将岩石样品粉碎至 200 目。岩石主量、微量及稀土元素地球化学分析均在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。主量元素测试仪器为日本岛津 XRF-1800 型波长色散 X 射线荧光光谱仪, 微量元素分析采用 X 系列 ICP-MS 及 Thermo-X7 电感耦合等离子体质谱仪, 分析精度优于 5%。

4 红山梁组硅质岩地球化学特征及岩石成因

4.1 主、微量元素的差异与变化规律

红山梁组硅质岩 14 个样品主、微量及稀土元素含量见表 2~4。相对敏感的微量元素在三大层位中的平均值统计见表 5。

由表 2 看出, 下部层位高 MnO、MgO, 中高 SiO₂、TiO₂、Na₂O、K₂O、Al₂O₃、Al₂O₃/(Al₂O₃+^TFe₂O₃), 低 CaO、Na₂O/K₂O、P₂O₅; 中部层位高 SiO₂、P₂O₅、CaO, 低 Al₂O₃、TiO₂、MnO、MgO、Na₂O、K₂O、Al₂O₃/(Al₂O₃+

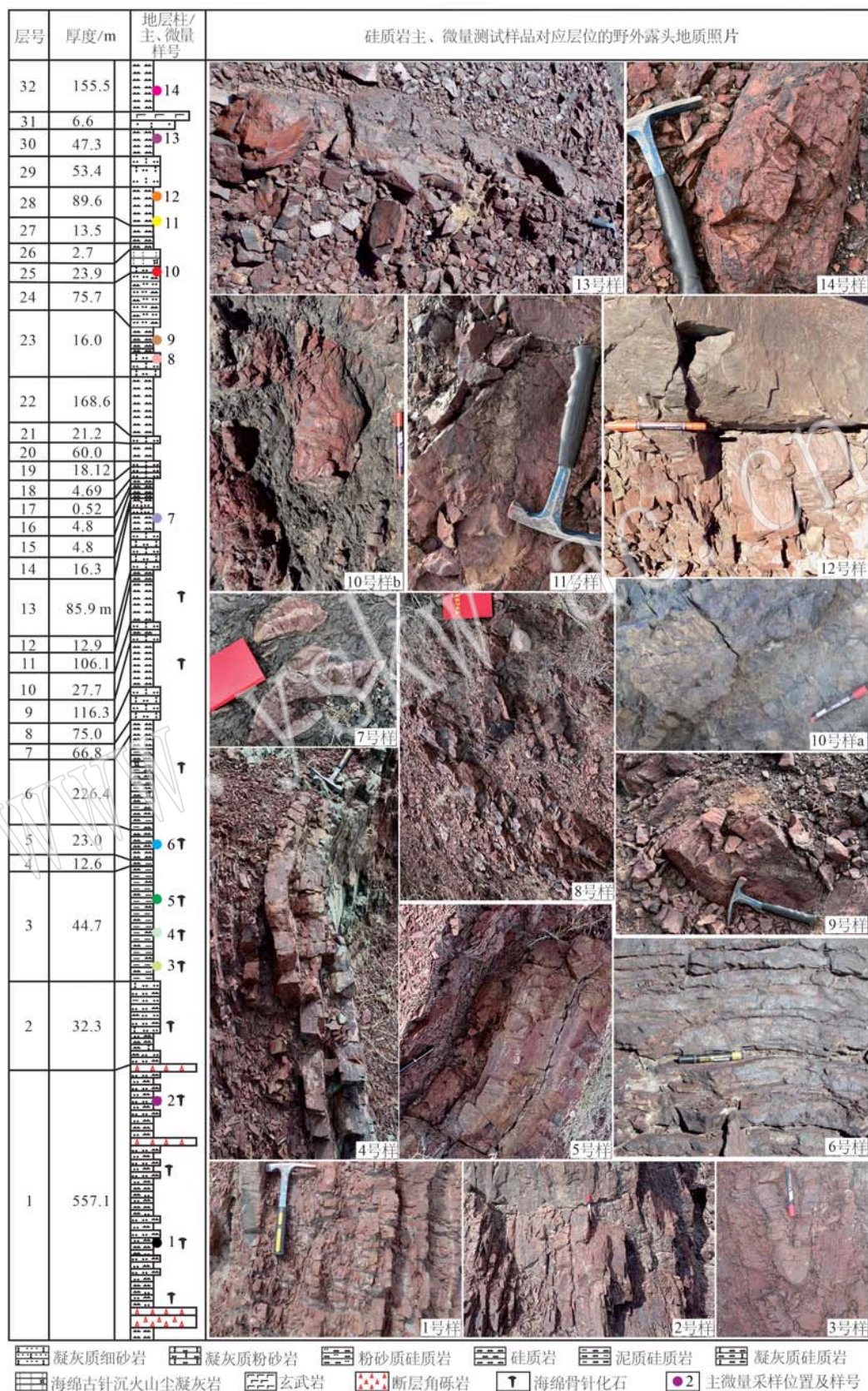


图2 红山梁组柱状图及硅质岩主、微量测试样品对应层位的露头地质照片与采样位置

Fig. 2 Stratigraphic column of the Hongshanliang Formation and the corresponding outcrop geological photos and sampling locations of the main and trace elements testing samples of siliceous rocks

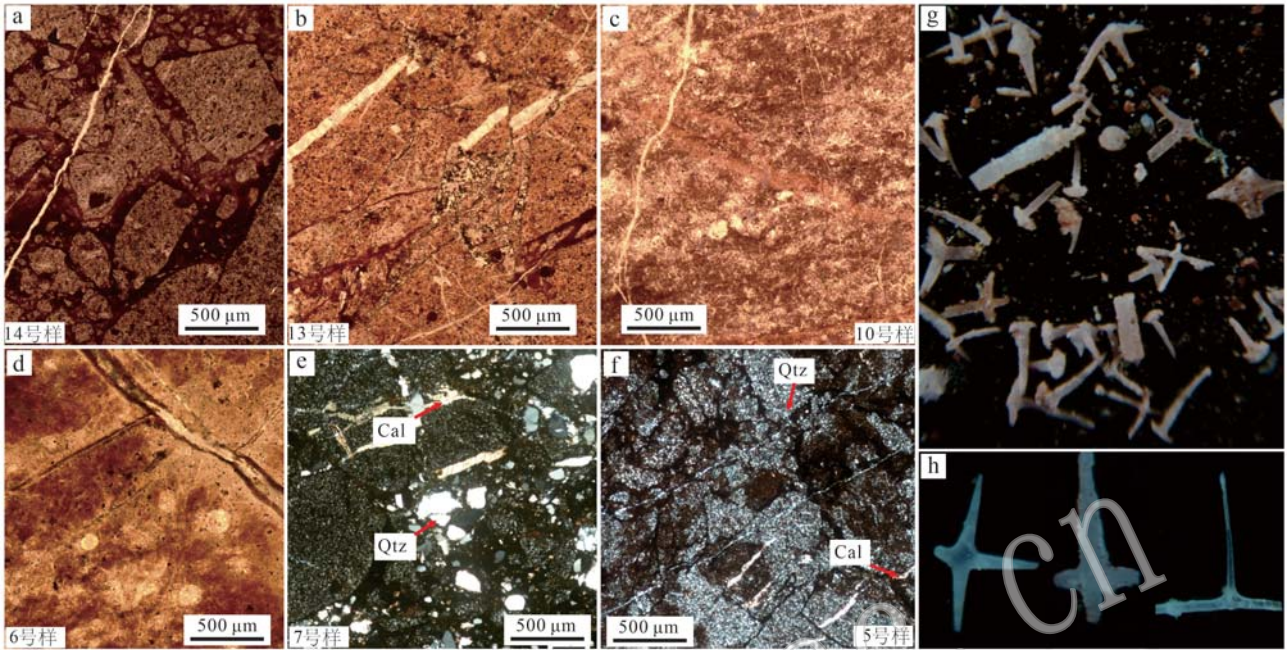


图 3 部分主、微量测试样品镜下特征及海绵骨针化石

Fig. 3 Microscopic characteristics of some major and trace elements testing samples and sponge spicule fossils
a~f—主、微量样品对应薄片正交偏光镜下照片; g~h—海绵骨针化石; Qtz—石英; Cal—方解石
a~f—the samples of major and trace elements testing correspond to the microscopic photos of the slices; g~h—sponge spicule fossils; Qtz—quartz;
Cal—calcite

表 2 红山梁组硅质岩主量元素含量 ($w_B/\%$) 及参数

Table 2 Contents ($w_B/\%$) and parameters of major elements in siliceous rocks of the Hongshanliang Formation

序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	^T Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Total	Na ₂ O/ K ₂ O	Al ₂ O ₃ /(Al ₂ O ₃ + ^T Fe ₂ O ₃)	Al/(Al+ Fe+Ti)	硅质岩 成因
1	84.30	0.33	7.26	2.59	0.60	1.20	0.76	1.24	1.63	0.07	99.98	0.76	0.74	0.63	过渡 类型
2	90.66	0.06	3.82	1.74	0.55	0.67	1.79	0.03	0.64	0.04	100.04	0.05	0.69	0.55	
平均	87.48	0.20	5.54	2.17	0.58	0.94	1.28	0.64	1.14	0.06	100.01	0.40	0.71	0.59	
3	84.21	0.01	0.44	7.55	0.13	0.29	4.66	0.01	0.01	2.69	100.36	1.00	0.06	0.04	
4	90.05	0.03	0.59	8.25	0.03	0.38	0.55	0.01	0.02	0.08	100.22	0.50	0.07	0.05	生物成 因硅
5	83.79	0.02	0.81	8.75	0.30	0.55	5.58	0.01	0.06	0.11	100.49	0.17	0.08	0.06	
6	94.76	0.19	2.10	0.82	0.09	0.19	0.82	0.68	0.25	0.10	100.13	2.72	0.72	0.63	
7	96.34	0.09	1.55	0.28	0.09	0.29	0.81	0.14	0.32	0.08	100.15	0.44	0.85	0.75	
8	91.16	0.02	0.36	5.73	0.07	0.30	2.04	0.01	0.05	0.28	99.53	0.20	0.06	0.04	
9	96.66	0.13	1.50	0.43	0.10	0.24	0.53	0.11	0.25	0.04	99.81	0.44	0.78	0.68	
平均	91.00	0.07	1.05	4.54	0.12	0.32	2.14	0.14	0.14	0.48	100.10	0.78	0.37	0.32	
10	72.90	0.50	13.05	4.06	0.11	1.39	1.26	6.34	0.30	0.09	100.16	21.13	0.76	0.70	火山质 为主
11	71.35	0.63	13.41	5.28	0.15	2.01	1.51	3.28	2.28	0.11	99.68	1.44	0.72	0.65	
12	70.49	0.56	14.70	4.32	0.14	1.80	1.53	3.79	2.58	0.08	100.38	1.47	0.77	0.71	
13	72.24	0.55	13.06	5.23	0.16	2.12	1.33	2.51	2.72	0.08	99.42	0.92	0.71	0.64	
14	72.52	0.61	13.11	4.23	0.09	1.66	1.62	3.71	2.35	0.10	100.12	1.58	0.76	0.69	
平均	71.90	0.57	13.47	4.62	0.13	1.80	1.45	3.93	2.05	0.09	99.95	1.35	0.74	0.68	

* 表中平均值指本次依据分析数据初选的具有区分成因类型的分析值或计算参数; 下部层位为 2 样平均值, 中部层位为 7 样平均值, 上部层位为 5 样平均值。

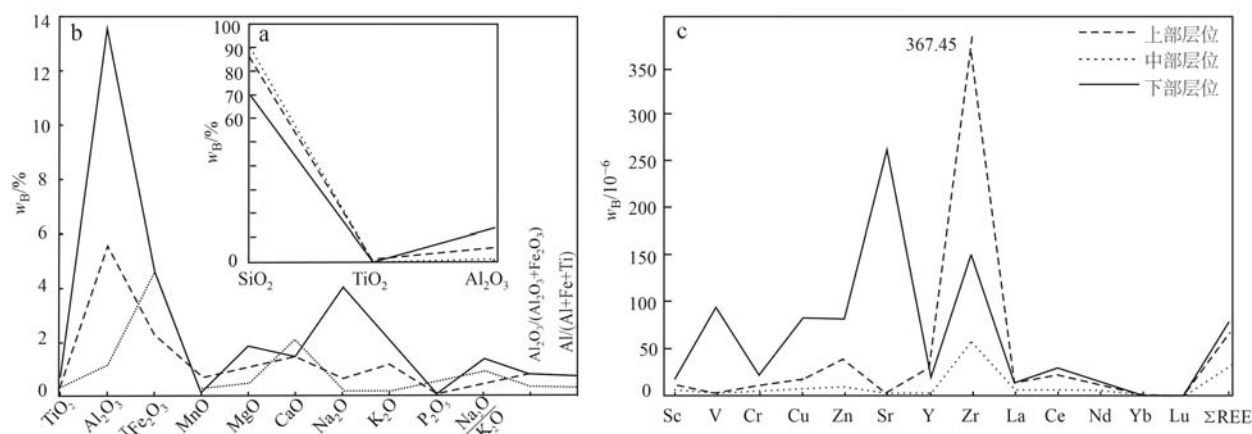


图4 硅质岩主量(a、b)、微量与稀土元素(c)含量与变化图

Fig. 4 Diagrams of contents and variations of major (a, b), trace and rare earth elements in siliceous rocks

$^T\text{Fe}_2\text{O}_3$); 上部层位高 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + ^T\text{Fe}_2\text{O}_3)$, 低 SiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 。3组样品总体显示出清晰的区分性(图4a、4b)。

同主量元素的变化特征一样,大量的微量、稀土元素在红山梁组硅质岩三大层中多显示出显著的差异性。其中,Sc、V、Cr、Cu、Zn、Sr、Y、Zr、La、Ce、Nd、Yb、Lu 和 ΣREE 在上部层位显著高于中部层位,而下部层位中这些元素的均值介于上部与下部层位之间(表5、图4c)。

红山梁组硅质岩样品稀土元素在球粒陨石标准化(Sun and McDonough, 1989)与北美页岩(NASC)标准化(Gromet *et al.*, 1984)后,稀土配分曲线均表现为较好的谐和性(图5)。

4.2 硅质岩成因的地球化学信息

硅质岩不同的硅质来源决定了其各具不同的硅质成因,判别硅质岩的成因一定程度上就是判别硅质岩中的硅质来源。反之也意味着不同成因类型的硅质岩在硅质来源、成岩环境等方面都会存在着明显差异,在地球化学特征方面应该也会存在明显不同,进而可进行成因及其沉积环境等判别。

Murray 等(1994)指出尽管硅质岩因其成因而导致二氧化硅含量出现不同,但是其余例如Al、Fe、Ti、Mn等主量元素因受岩石后期成岩作用的影响较小,是区分硅质岩成因的重要的地球化学证据。硅质岩中如有陆缘物质的影响,其岩石中的Ti和Al含量就会相对富集,对于热水成因的硅质岩来说则有Mn、Fe的相对富集。Ti很难被生物体吸收,则生物成因的硅质岩中的 TiO_2 含量就较低(张丽敏等,2016)。

所以生物成因硅质岩往往就会显示高 SiO_2 、 Fe_2O_3 , 低 Al_2O_3 、 TiO_2 、 FeO 、 MgO 、 K_2O 和 Na_2O 的特征(杨建民等,1999)。

红山梁组硅质岩的地球化学特征上明显存在3种成因类型,中部总体显示生物成因特征,上部显示火山硅成因特征,下部层位则具有过渡类型(图6)。

利用岩石地球化学主要成因图解进行判别分析,红山梁组14个硅质岩主量元素可清晰分成生物成因、火山质成因和过渡类型3个投点集中群,其中10~14号(剖面上部层位)与3~9样品(剖面中部层位)在各图中均投点较为集中,分属火山成因与生物成因,而1、2号样品在各图中多位于火山成因与生物成因的过渡区,2号样品相对偏向生物成因而1号样品倾向于火山成因,表明1号样品中有较强的火山成因化学元素的混入。

Al_2O_3 在陆源碎屑岩或火山质岩石中属于较为富集的元素,单靠该值是难以区分高 Al_2O_3 的硅质岩究竟是源于陆源碎屑岩还是火山质岩石,但从红山梁组剖面岩石沉积序列与岩石组合来看,本组总体属深海相沉积组合,缺少陆源碎屑岩沉积(仅见有少量),硅质岩多与火山岩、火山碎屑岩互层共生产出。因此,可以认定高 Al_2O_3 的硅质岩与火山作用有关。

Sugitani 等(1996)认为,沉积母岩中生物成因硅质岩总体是低 Al_2O_3 、 TiO_2 ,当有大量中酸性火山质或火山碎屑加入时,会导致 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值增加,其中过多的偏基性火山碎屑物质加入,导致岩石中 TiO_2 含量增加,故 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值减小(图6d)。红山梁组中部层位火山硅质岩样品投点都位于生物成因硅质

表 3 红山梁组硅质岩微量元素含量 ($w_B/10^{-6}$) 及参数
Table 3 Content ($w_B/10^{-6}$) and parameters of trace elements in siliceous rocks of Hongshanliang Formation

样号	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cd	Hf	Ta	Pb	Th	U
1	6.48	0.98	26.20	35.10	33.70	18.90	57.90	26.10	83.20	12.30	40.90	16.60	18.10	0.11	2.37	0.34	18.80	3.43	0.36
2	16.10	0.65	1.84	16.80	25.20	6.57	14.80	68.90	22.20	4.30	15.00	74.90	12.90	0.08	0.64	0.09	18.90	1.05	0.42
3	4.38	0.44	0.94	12.90	25.70	8.88	8.81	57.90	12.30	1.19	0.46	96.10	40.70	0.24	0.08	0.02	15.30	0.14	0.90
4	28.60	0.16	1.06	46.10	10.20	1.35	4.53	31.00	8.60	1.46	0.66	9.43	4.81	0.02	0.40	0.03	5.36	0.46	0.15
5	7.75	0.30	0.60	89.10	15.10	5.16	11.20	45.80	17.00	1.34	1.64	23.40	5.08	0.03	0.23	0.02	6.58	0.21	0.38
6	4.16	0.28	3.59	9.94	9.61	3.80	11.70	17.60	18.30	2.31	8.46	57.70	10.80	0.03	1.30	0.37	5.97	1.06	0.30
7	5.35	0.25	2.60	7.04	5.11	1.79	6.18	14.00	10.30	2.41	9.28	34.30	13.30	0.02	0.34	0.12	2.34	0.58	0.28
8	3.52	0.12	0.75	29.50	7.27	4.78	14.20	2.14	8.29	0.87	1.87	36.90	7.82	0.02	0.13	0.02	2.10	0.21	0.20
9	5.27	0.24	3.77	8.22	6.98	5.79	8.61	23.30	22.20	2.43	7.03	168.00	5.18	0.15	1.03	0.23	2.35	0.58	0.17
10	15.30	77.30	19.10	9.29	9.39	41.70	72.00	13.20	0.88	239.00	16.90	154.00	4.92	0.20	4.54	0.35	11.90	4.62	1.46
11	14.70	93.00	17.00	8.83	11.10	49.00	82.80	17.20	52.00	284.00	22.80	137.00	5.68	0.17	3.36	0.38	13.80	5.54	1.71
12	16.30	98.60	20.70	10.90	23.70	74.50	85.00	16.00	49.40	288.00	27.70	178.00	6.95	0.19	4.27	0.45	16.10	6.18	1.49
13	15.60	107.00	21.50	10.60	15.10	90.60	92.40	17.40	70.10	165.00	18.80	127.00	5.44	0.14	3.04	0.35	17.30	5.27	1.36
14	14.90	102.00	24.20	10.20	18.40	154.00	83.90	14.30	44.10	328.00	25.30	167.00	6.68	0.20	3.91	0.43	15.60	6.24	1.83

表 4 红山梁组硅质岩稀土元素含量 ($w_B/10^{-6}$) 及参数
Table 4 Content ($w_B/10^{-6}$) and parameters of rare earth elements in siliceous rocks of the Hongshanliang Formation

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	δEu
1	20.46	32.00	5.36	19.83	4.93	8.39	4.97	0.71	3.52	0.74	2.01	0.32	2.25	0.36	105.83	1.86
2	7.46	14.47	1.67	6.72	1.51	0.53	1.61	0.24	1.24	0.27	0.73	0.11	0.69	0.10	37.37	0.49
3	37.33	16.80	6.42	23.95	4.29	1.18	5.22	0.75	3.96	0.94	2.46	0.33	1.83	0.25	105.71	1.08
4	4.80	3.03	1.48	5.75	1.19	0.25	1.13	0.18	1.02	0.20	0.63	0.10	0.69	0.10	20.56	0.95
5	3.77	3.36	1.07	4.36	0.97	0.25	1.07	0.16	0.87	0.17	0.46	0.06	0.36	0.05	16.97	1.07
6	7.14	13.01	2.07	8.55	2.09	0.57	2.31	0.34	1.93	0.37	1.08	0.15	1.07	0.16	40.84	1.13
7	5.39	6.85	1.35	5.80	1.41	0.38	1.58	0.25	1.33	0.31	0.83	0.12	0.78	0.12	26.50	1.11
8	3.32	2.04	0.79	3.30	0.71	0.37	0.78	0.12	0.65	0.16	0.45	0.07	0.46	0.08	13.29	2.17
9	4.16	5.78	1.07	4.50	1.13	2.15	2.02	0.17	0.97	0.19	0.54	0.08	0.52	0.08	23.35	5.91
10	11.02	22.51	2.96	12.12	2.98	0.75	3.39	0.51	3.11	0.64	2.02	0.31	2.24	0.31	64.86	1.03
11	15.46	36.71	4.32	17.54	3.99	1.08	4.05	0.64	3.45	0.77	2.19	0.35	2.30	0.35	93.19	1.18
12	12.07	36.02	3.69	15.53	3.79	1.09	4.03	0.67	3.70	0.86	2.46	0.38	2.52	0.39	87.21	1.22
13	12.66	23.99	3.36	13.65	3.39	0.97	3.34	0.54	2.87	0.64	1.79	0.28	1.90	0.29	69.68	1.26
14	13.88	34.99	5.05	19.61	4.59	1.11	4.47	0.72	3.80	0.86	2.38	0.38	2.53	0.38	94.74	1.08

表 5 红山梁组三大层硅质岩敏感性微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 及参数平均值统计表

Table 5 Statistical table of sensitivity trace elements ($w_B/10^{-6}$) and parameter average values of the three layers of siliceous rocks in the Hongshanliang Formation

层位	下	中	上
Sc	11.29	8.43	15.36
V	0.82	0.26	95.58
Cr	14.02	1.9	20.5
Cu	12.74	4.51	81.96
Zn	36.35	9.32	83.22
Sr	8.3	1.72	260.8
Y	27.95	4.2	22.3
Zr	867.5	60.83	152.6
La	13.96	9.42	13.02
Ce	23.24	7.27	30.84
Nd	13.28	8.03	15.69
Yb	1.47	0.82	2.3
Lu	0.23	0.12	0.34
ΣREE	71.6	35.32	81.94
δEu	1.17	1.92	1.15
Th/Sc	0.3	0.09	1.57
Th/U	6.01	1.98	17.84
La _N /Ce _N	0.96	0.64	0.55

* 下部层位为 2 样平均值,中部层位为 7 样平均值,上部层位为 5 样平均值。

岩区域,其余样品显示受到基性或酸性火山碎屑物的影响,且总体位于酸性火山物质增加趋势方向一侧。

综合分析,凡是图解中位于生物成因的硅质岩样品,总是高 SiO₂、低 Al₂O₃、TiO₂、MgO 等,野外见发育的沉积纹层,且有较多海绵骨针化石,表明岩石地球化学在判别红山梁组硅质岩成因是有效的。

5 红山梁组硅质岩成因和响应的构造环境

大量国内外不同地质时代的放射虫硅质岩研究表明,其地球化学特征是判别其构造背景的良好标志。硅质岩形成环境一般被分为活动边缘(中酸性火山岩作用参与) 远洋盆地(化学硅质岩)和洋中脊(玄武质岩浆参与)三类(Murray *et al.*, 1994; Girty *et al.*, 1996)。

众多学者对现代海洋沉积物研究后发现,Al/(Al+Fe+Mn) 值不仅可以用于鉴别硅质岩中岩浆热液组分参与的程度,也可反应硅质岩形成的构造环境,其 Al/(Al+Fe+Mn) 值的总体表现为活动边缘>洋中脊>深海盆地(Boström and Peterson, 1969; Adachi *et al.*,

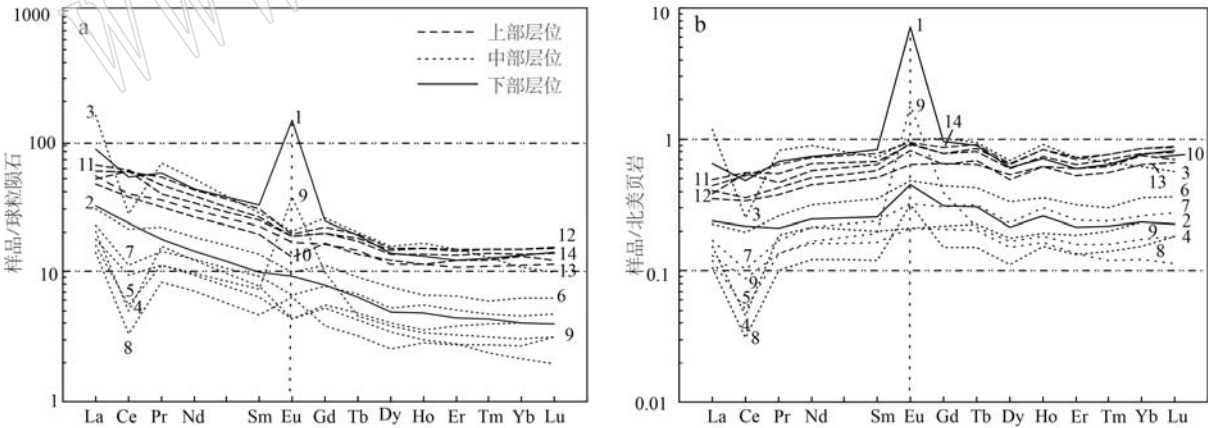


图 5 红山梁组硅质岩球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和北美页岩标准化稀土元素配分图(b)(球粒陨石标准值据 Sun and McDonough, 1989; 北美页岩标准值据 Gromet *et al.*, 1984)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and North American shale-normalized REE patterns (b) for Hongshanliang Formation siliceous rock (chondrite values are from Sun and McDonough, 1989; NASC data are from Gromet *et al.*, 1984)

1986),而红山梁组上、中、下层位硅质岩中火山成因硅、过渡类型和生物成因硅质岩的 Al/(Al+Fe+Mn) 平均值分别为 0.68、0.59、0.32,显示出生物成因硅质岩形成于火山作用相对较弱的构造环境,而火山

硅质岩则记录了较强的火山作用信息,其 Al/(Al+Fe+Mn) 平均值为 0.68,与国外活动陆缘硅质岩的 0.619 极为接近。

红山梁组硅质岩在相关判别图解中,中部层位

总体投于远洋或化学沉积硅质岩区,上部层位集中于活动陆缘区及其附近,下部层位硅质岩因有一定

火山硅成分的混入,在相关图解中总体靠近活动陆缘区(图7)。

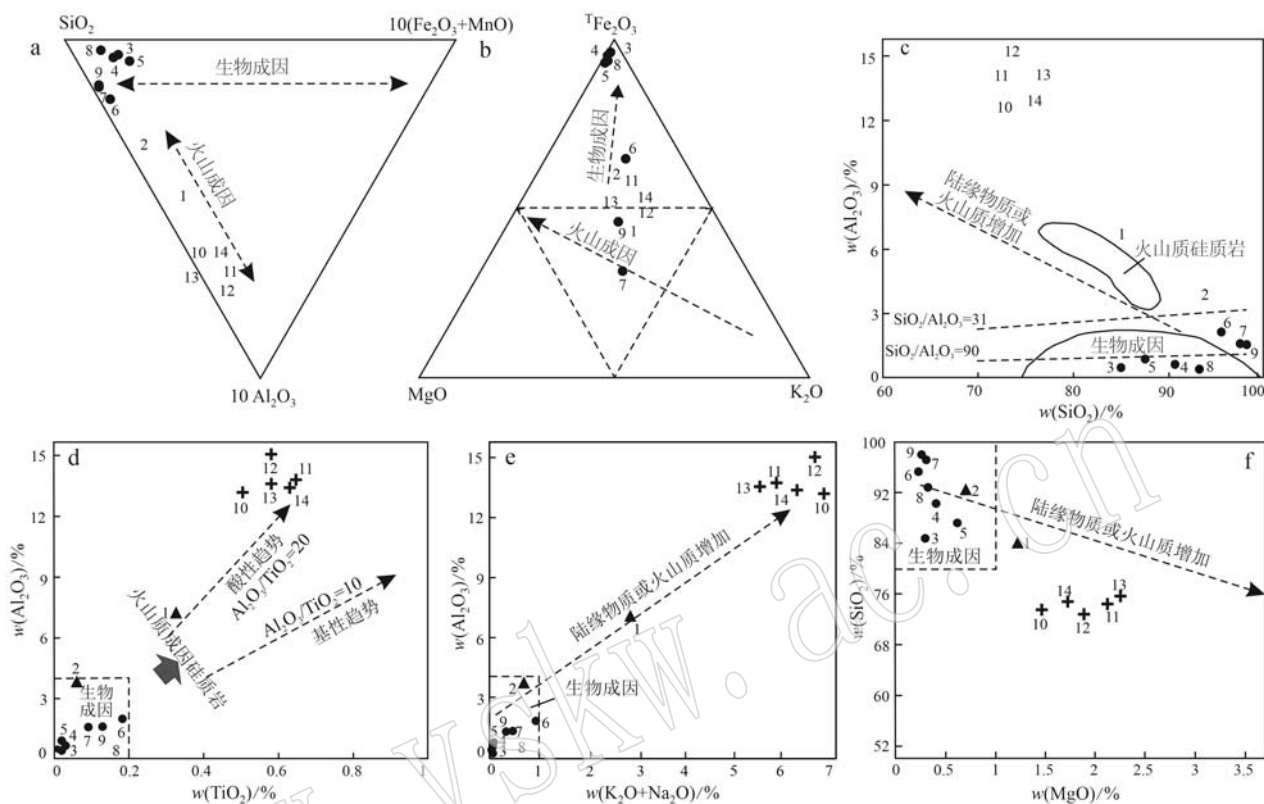


图6 红山梁组硅质岩 $10\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-}10(\text{Fe}_2\text{O}_3\text{+MnO})$ 、 $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-MgO-K}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-(K}_2\text{O+Na}_2\text{O)}$ 和 $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ 成因判别图解(图a~b底图据 Hein *et al.*, 1983; 图c~f底图据杨建民等, 1999)

Fig. 6 Diagram for distinguishing the genesis of $10\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-}10(\text{Fe}_2\text{O}_3\text{+MnO})$, $^{\text{T}}\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-MgO-K}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-(K}_2\text{O+Na}_2\text{O)}$ and $\text{SiO}_2\text{-MgO}$ for siliceous rocks in the Hongshanliang Formation (a~b after Hein *et al.*, 1983; c~f after Yang Jianmin *et al.*, 1999)

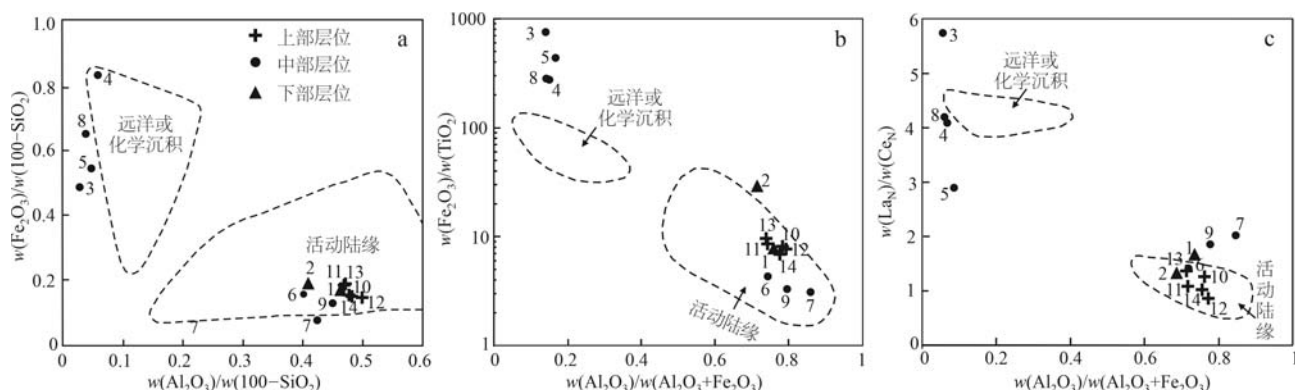


图7 红山梁组硅质岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100\text{-SiO}_2)\text{-Al}_2\text{O}_3/(100\text{-SiO}_2)$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3\text{+Fe}_2\text{O}_3)$ 和 $\text{La}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}\text{-Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3\text{+Fe}_2\text{O}_3)$ 构造环境判别图解(a~c底图据 Murray, 1994)

Fig. 7 Diagrams for distinguishing the tectonic setting of $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100\text{-SiO}_2)\text{-Al}_2\text{O}_3/(100\text{-SiO}_2)$, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3\text{+Fe}_2\text{O}_3)$ and $\text{La}_\text{N}/\text{Ce}_\text{N}\text{-Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3\text{+Fe}_2\text{O}_3)$ for Hongshanliang Formation siliceous rocks (a~c after Murray, 1994)

REE 元素在硅质岩的成岩过程中,几乎不受化学分馏作用,故常用于硅质岩的沉积环境分析。如用北美页岩平均值标准化的硅质岩,其 La_N/Ce_N 值可以有效地判别硅质岩的形成环境,洋中脊附近约为 3.5,大洋盆地约为 1.0~2.5,活动陆缘约为 0.5~1.5(Murray and Jones, 1992)。红山梁组硅质岩的 La_N/Ce_N 值上部层位 0.55,中部层位 0.64,下部层位 0.96,总体接近于 Murray 等(1992)的活动陆缘 La_N/Ce_N 值; δEu 值总体表现为弱的正 δEu 异常,但上、下层位的 δEu 值极为接近,分别为 1.15、1.17,明显低于中部层位生物成因硅质岩 δEu 值(1.95),表明火山成因的硅质岩突显的活动陆缘地球化学特征。

活动陆缘有关的硅质岩 Th/Sc 值高,变化大($<0.01 \sim 1$), Th/U 值较高(一般大于 3.8),而远洋硅质岩的 Th/Sc 值和 Th/U 值均较低,分别为 0.01~0.30 和 0.6~5.0(Girty *et al.*, 1996)。

红山梁组上部与下部层位硅质岩与火山成因有关,其 Th/Sc 值分别为 1.57 和 0.3, Th/U 值分别为 17.84 和 6.01,而中部生物成因硅质岩的 Th/Sc 值仅为 0.09, Th/U 值为 1.98;相差悬殊,也基本符合 Girty 等(1996)总结的活动陆缘与远洋硅质岩的相应比值。

另外,与硅质岩共生的玄武岩为红山梁组的构造环境信息提供了重要佐证。建组剖面区的玄武岩属拉斑玄武岩类, Nb/Y (0.03~0.20) 和 Zr/Y (0.93~4.24) 较低,并呈现出较高的 Zr/Nb (7.73~48.62),表明其来自亏损地幔的部分熔融。在 Zr/Y - Zr 图解中(图 8a),样品投点主要聚集在岛弧玄武岩的区内;在 Th/Yb - Nb/Yb 构造判别图解中(图 8b),样品整体上落在弧后盆地区域内;在 $2Nb$ - $Zr/4$ - Y 图解中(图 8c),样品分布于火山弧玄武岩区内,这些特征表明玄武岩总体属弧后盆地玄武岩类(李永军等, 2024c)。

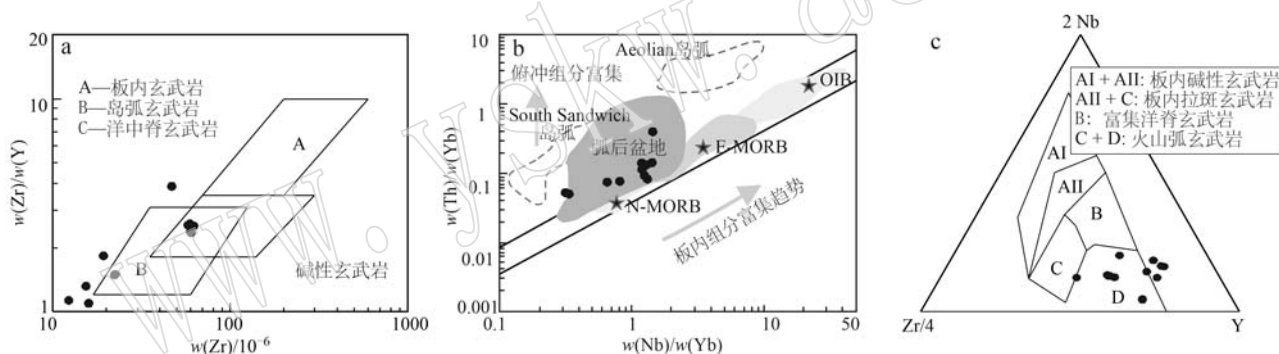


图 8 白碱滩北部红山梁组玄武岩 Zr/Y - Zr (a, 底图据 Pearce and Norry, 1979)、 Th/Yb - Nb/Yb (b, 底图据 Pearce *et al.*, 2005) 和 $2Nb$ - $Zr/4$ - Y (c, 底图据 Meschede, 1986) 构造环境判别图解

Fig. 8 Discrimination diagrams of the tectonic environment of Zr/Y - Zr (a, Pearce *et al.*, 1996), Th/Yb - Nb/Yb (b, Pearce *et al.*, 2005) and $2Nb$ - $Zr/4$ - Y (c, Meschede, 1986) for Hongshanliang Formation basalt in the northern part of Baijiantan

综上所述,红山梁组硅质岩的岩石地球化学特征、相关比值及图解,显示出上、中、下 3 个大层序间显著的差异性,其上部与下部层位与火山成因密切相关,形成于活动陆缘火山作用较为强烈的构造环境,而中部层位的硅质岩主体属生物成因;形成于火山休眠期的远洋深海环境,由下到上经历了火山作用强→弱→强的变化过程。结合该组剖面区发育的拉斑玄武岩总体显示弧后盆地这一构造环境信息,推测剖面上部与下部硅质岩有大量弧火山质成分加入,而中部硅质岩形成于火山休眠期的弧后盆地环境。

6 结论

(1) 红山梁组上部硅质岩红色-红褐色为主,层理不发育,多呈团块状、条带状,与火山熔岩共生或见于火山岩夹层中,未见海绵骨针;中部硅质岩红色为主,层理发育,薄层状为主,多见沉积纹层,海绵骨针丰富,与凝灰质粉砂岩、凝灰质泥质粉砂岩呈互层;下部硅质岩见红色、灰色,岩相学与岩性介于上述两类,显示过渡性。

(2) 上部硅质岩以火山质成因为主,中部生物

成因为主,下部兼有生物成因但有火山质混入的特征。上部与下部硅质岩高 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + ^\text{T}\text{Fe}_2\text{O}_3)$, 低 SiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 、 δEu 。高 Sc 、 V 、 Cr 、 Cu 、 Zn 、 Sr 、 Y 、 Zr 、 La 、 Ce 、 Nd 、 Yb 、 Lu 、 ΣREE 、 Th/Sc 、 Th/U , 而中部硅质岩的含量及相关比值与之刚好相反,且有较多海绵骨针化石,佐证了其生物成因,并确认了岩石地球化学在判别红山梁组硅质岩的岩石成因上的有效性。

(3) 红山梁组上部与下部硅质岩总体显示活动陆缘构造环境,而中部以生物成因为主的硅质岩形成于火山休眠期的远洋深海环境。结合硅质岩共生的拉斑玄武岩总体显示弧后盆地这一构造环境信息,推测上部与下部硅质岩有大量弧火山质成分加入,形成于靠近弧火山的弧后盆缘区,而中部硅质岩形成于火山休眠期的弧后盆地环境。

(4) 红山梁组硅质岩及其共生的岩石组合的发现,从时间演化序列上将区内盆地的沉积史和演化史由原早石炭世向前延伸到晚泥盆世;从盆地构造属性上确立晚泥盆世区内为一弧后盆地,这为探究包古图构造带前石炭纪的盆地属性及准噶尔洋盆的构造演化提供了新的研究素材。

References

- Adachi M, Yamamoto K and Sugisaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific: Their geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. *Sedimentary Geology*, 47(1~2): 125~148.
- Boström K and Peterson M N A. 1969. The origin of aluminum-poor ferromanganese sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise[J]. *Marine Geology*, 7(5): 427~447.
- Chen Y C, Liu J H, Zhou R J, *et al.* 2023. Extensional magmatism caused by strain partitioning: Insights from the mafic dikes hosted in Biesituobie batholith in West Junggar, CAOB[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 112(1): 33~49.
- Duan F H, Li Y J and Zhi Q. 2022. Late Paleozoic multi-stage subduction accretion of the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Insights from the Late Carboniferous-Early Permian granites in the southern West Junggar, NW China. *International Geology Review*, 64(14): 2 051~2 073.
- Duan F H, Zhi Q, Xiao W J, *et al.* 2023. Late Palaeozoic final subduction records of the southwestern Paleo-Asian Ocean revealed by ca. 286~283 Ma basaltic rocks in the West Junggar, NW China[J]. *International Geology Review*, 65(20): 3 128~3 145.
- Geng H Y, Sun M, Yuan C, *et al.* 2011. Geochemical and geochronological study of early Carboniferous volcanic rocks from the West Junggar: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 854~866.
- Geological Mineral Resources Office in Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~841 (in Chinese with English abstract).
- Geological Mineral Resources Office in Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1999. *Rock Stratigraphy of Xinjiang Uygur Autonomous Region* [M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1~430 (in Chinese with English abstract).
- Girty G H, Ridge D L, Knaack C, *et al.* 1996. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 107~118.
- Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, *et al.* 1984. The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12): 2 469~2 482.
- Hein J R, Kuijpers E P, Denyer P, *et al.* 1983. Petrology and Geochemistry of Cretaceous and Paleogene cherts from Western Costa Rica [M]. *Developments in Sedimentology*, Elsevier, 36: 143~174.
- Li Ganyu, Li Yongjun, Wang Ran, *et al.* 2017. The discovery and significance of Late Carboniferous sanukitoids in Hala'altai Mountain, West Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(1): 16~30 (in Chinese with English abstract).
- Li H, Li Y J, Yang G X, *et al.* 2020. Geochronology, geochemistry, and Hf isotopes of mafic rocks from Dalabute ophiolitic mélange in West Junggar, Xinjiang (NW China): Implications for the magmatic source and tectonic setting[J]. *Geological Journal*, 55(3): 2 342~2 362.
- Li Yongjun, Fu Hao, Zhu Zhao, *et al.* 2024c. Late Devonian magmatism and tectonic significance in the northwestern of the Junggar basin: Insights from basalt geochemical analyses of the Hongshanliang Formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(12): 3 490~3 504 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Huang Jiaxuan, Zhu Zhao, *et al.* 2024a. Establishment of upper Devonian Hongshanliang Formation and its geological significance in Baogutu stratigraphic minor-region, West Junggar tectonic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(4): 1 025~1 036 (in Chinese

- with English abstract).
- Li Yongjun, Li Weidong, Yang Gaoxue, *et al.* 2021. Section Construction and Regional Correlation of the Devonian-Carboniferous in East and West Junggar, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~383 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Xu Qian, Yang Gaoxue, *et al.* 2016. Intracontinental "lagged arc volcanic rocks" and its geological significance: Evidence from early Permian lagged arc magmatism in northern Urho area of Western Junggar[J]. *Earth Science Frontier*, 23(4): 190~199 (in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Zhang Jianye, Wang Xulong, *et al.* 2024b. Ocean-continent transition process in the West Junggar tectonic belt: Constraints from the basalts of the Baiyanghe Formation [J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(10): 3 031~3 046 (in Chinese with English abstract).
- Murray R W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and application [J]. *Sedimentary Geology*, 90(3~4): 213~232.
- Murray R W and Jones D L. 1992. Diagenetic formation of bedded chert: Evidence from chemistry of the chert-shale couple [J]. *Geology*, 20(3): 271~274.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chemical Geology*, 56: 207~218.
- Pearce J A and Norry M J. 1979. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in Volcanic Rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69: 33~47.
- Pearce J A, Stern R J, Bloomer S H, *et al.* 2005. Geochemical mapping of the Mariana archbasin system: Implications for the nature and distribution of subduction components [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystem*, 6(7).
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman U S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 364: 209~304.
- Sugitani K, Horiuchi Y, Adachi M, *et al.* 1996. Anomously low Al_2O_3/TiO_2 values for Archean cherts from the Pilbara Block, Western Australia-possible evidence for extensive chemical weathering on the early earth [J]. *Precambrian Research*, 80(1): 49~76.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2012. Late Carboniferous high $\varepsilon Nd(t)$ - $\varepsilon Hf(t)$ granitoids, enclaves and dikes in western Junggar, NW China: Ridge-subduction-related magmatism and crustal growth [J]. *Lithos*, 140(5): 86~102.
- Tang G J, Chung S L, Hawkesworth C J, *et al.* 2017. Short episodes of crust generation during protracted accretionary processes: Evidence from Central Asian Orogenic Belt, NW China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 464: 142~154.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, *et al.* 2019. Crustal maturation through chemical weathering and crustal recycling revealed by Hf-O-B isotopes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 524: 115~709.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2~4): 102~117.
- Xiao W J, Kroner A and Windley B F. 2009a. Geodynamic evolution of Central Asia in the Paleozoic and Mesozoic [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98: 1 185~1 188.
- Xiao W J and Santosh M. 2014. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth [J]. *Gondwana Research*, 25(4): 1 429~1 444.
- Xiao W J, Song D F, Han C M, *et al.* 2019. Deep structure and metallogenic processes of the Altai-Junggar-Tianshan Collage in Southern Altaids [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 93(SSI): 1 163~1 168.
- Xiao Wenjiao, Song Dongfang, Windley B F, *et al.* 2019. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Science China Earth Sciences*, 49(10): 1 512~1 545 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, *et al.* 2009b. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: Implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. *International Journal of Earth Science*, 98: 1 189~1 217.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, *et al.* 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 477~507.
- Yang G X, Chen W, Tong L L, *et al.* 2022. Seamount subduction and accretion in West Junggar, NW China: A review [J]. *Geosystems*

- and Geoenvironment, 3(2): 100074.
- Yang G X, Li Y J, Tong L L, *et al.* 2019. An overview of oceanic island basalts in accretionary complexes and seamounts accretion in the western Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 179: 385~398.
- Yang Gaoxue. 2016. Genesis of oceanic island basalt in ophiolitic mélangé from corearea of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 61(34): 3 684~3 697 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jianmin, Wang Denghong, Mao Jinwen, *et al.* 1999. The petrochemical research method for silicalite and its application to the “Jingtieshan Type” iron deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (2): 13~25 (in Chinese with English abstract).
- Yin J Y, Xiao W J, Wang T, *et al.* 2024. Maturation from oceanic arcs to continental crust: Insights from Paleozoic magmatism in West Junggar, NW China[J]. *Earth-Science Reviews*, 253: 104795.
- Zhang Limin, Li Yongjun, Xiang Kunpeng, *et al.* 2016. Geochemical characteristics and depositional environment of the silicalite from the Darbut Phiolitic Mélangé Zone in North Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 49(2): 70~83 (in Chinese with English abstract).
- Zhi Qian, Ren Rui, Duan Fenghao, *et al.* 2024. Genetic mechanism of Late Carboniferous intermediate-acid volcanic rocks in southern West Junggar and its constraints on the closure of the Junggar Ocean[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 40~58 (in Chinese with English abstract).
- 李永军, 付 浩, 朱 钊, 等. 2024c. 准噶尔盆地西北缘晚泥盆世的岩浆作用及构造意义: 来自红山梁组玄武岩的岩石地球化学证据[J]. *地质学报*, 98(12): 3 490~3 502.
- 李永军, 黄家瑄, 朱 钊, 等. 2024a. 西准噶尔构造带包古图地层小区上泥盆统红山梁组的建立及地质意义[J]. *地质学报*, 98(4): 1 025~1 036.
- 李永军, 李卫东, 杨高学, 等. 2021. 新疆东西准噶尔泥盆系-石炭系建组剖面及区域对比[M]. 北京: 地质出版社, 1~383.
- 李永军, 徐 倩, 杨高学, 等. 2016. 陆内“滞后”弧岩浆岩及其地质意义——来自西准噶尔乌尔禾北早二叠世岩浆作用的证据[J]. *地质前缘*, 23(4): 190~199.
- 李永军, 张坚焯, 王绪龙, 等. 2024b. 西准噶尔构造带洋-陆转换过程: 来自白杨河组玄武岩的制约[J]. *地质学报*, 98(10): 3 031~3 046.
- 肖文交, 宋东方, Windley B F, 等. 2019. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(10): 1 512~1 545.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~841.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1999. 新疆维吾尔自治区岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1~430.
- 杨高学. 2016. 中亚造山带核心区蛇绿混杂岩中洋岛玄武岩成因探讨[J]. *科学通报*, 61(34): 3 684~3 697.
- 杨建民, 王登红, 毛景文, 等. 1999. 硅质岩岩石化学研究方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用[J]. *岩石矿物学杂志*, 18(2): 13~25.
- 张丽敏, 李永军, 向坤鹏, 等. 2016. 新疆达尔布特蛇绿混杂岩带硅质岩地球化学及沉积环境[J]. *西北地质*, 49(2): 70~83.
- 支 倩, 任 蕊, 段丰浩, 等. 2024. 西准噶尔南部晚石炭世中-酸性火山岩成因机制及其对准噶尔洋闭合时限的约束[J]. *地质前缘*, 21(2): 40~58.

附中文参考文献

- 李甘雨, 李永军, 王 冉, 等. 2017. 西准噶尔哈拉阿拉特山一带晚石炭世赞岐岩的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 33(1): 16~30.