



移动阅读

曾孝文, 张予杰, 王冬兵, 等, 2024. 西藏阿索蛇绿混杂岩中硅质岩地球化学特征: 对狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带构造属性的启示[J]. 沉积与特提斯地质, 44(4): 871-882. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.11004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.11004)  
ZENG X W, ZHANG Y J, WANG D B, et al., 2024. Tectonic attribute of the Shiquanhe-Namco ophiolitic belt: Insights from geochemical characteristics of siliceous rocks in the Asa mélangé zone, central Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(4): 871-882. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.11004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2024.11004)

## 西藏阿索蛇绿混杂岩中硅质岩地球化学特征: 对狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带构造属性的启示

曾孝文<sup>1,2</sup>, 张予杰<sup>1</sup>, 王冬兵<sup>1</sup>, 王明<sup>2</sup>, 申迪<sup>2</sup>, 余长胜<sup>2</sup>, 韩明明<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218; 2. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061)

**摘要:** 班公湖-怒江缝合带和狮泉河-纳木错蛇绿岩带中与蛇绿岩伴生的中生代硅质岩出露广泛, 对于探讨中特提斯洋中生代大洋演化和狮泉河-纳木错蛇绿岩带构造属性都具有重要意义。本文对狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带中段阿索蛇绿混杂岩带内的硅质岩岩块的野外地质特征、岩石学特征及全岩主、微量元素地球化学特征开展了详细研究, 讨论了硅质岩的岩石成因及沉积环境。阿索蛇绿混杂岩中, 硅质岩有紫红色硅质岩和黑色硅质岩两种类型, 以岩块形式出露于混杂岩带中。紫红色硅质岩 SiO<sub>2</sub> 含量低于纯硅质岩, 相对较为富 Al, 稀土元素北美页岩标准化后表现出微弱的 Ce 负异常, 属于正常沉积成因的硅质岩, 成岩过程中有陆源物质加入。黑色硅质岩富集 Fe、Mn, 北美页岩标准化后表现出强烈的 Ce 负异常, 属于热液成因, 其成岩过程中有基性火山碎屑物质加入。两类硅质岩均沉积在靠近大陆边缘的洋盆环境中。班公湖-怒江缝合带和狮泉河-纳木错蛇绿岩中的硅质岩地球化学数据分析显示, 狮泉河-纳木错蛇绿岩带中, 硅质岩主要沉积于靠近大陆边缘的有限洋盆环境中, 而班公湖-怒江缝合带中的硅质岩既有大陆边缘环境下产出的硅质岩, 也包含了远洋盆地环境中的硅质岩。因此, 两者之间硅质岩沉积环境的差异可能暗示了狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带并非班公湖-怒江缝合带的构造推覆体, 而是一条代表了有限洋盆遗迹的原位蛇绿混杂岩带。

**关键词:** 硅质岩; 沉积环境; 中特提斯; 地球化学

中图分类号: P548

文献标识码: A

## Tectonic attribute of the Shiquanhe-Namco ophiolitic belt: Insights from geochemical characteristics of siliceous rocks in the Asa mélangé zone, central Tibet

ZENG Xiaowen<sup>1,2</sup>, ZHANG Yujie<sup>1</sup>, WANG Dongbing<sup>1</sup>, WANG Ming<sup>2</sup>, SHEN Di<sup>2</sup>,  
YU Changsheng<sup>2</sup>, HAN Mingming<sup>1</sup>

(1. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China; 2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China)

**Abstract:** Mesozoic siliceous outcrops with ophiolite were found in Shiquanhe-Namco Ophiolitic Mélangé Zone (SNMZ) and

收稿日期: 2023-04-24; 改回日期: 2024-01-14; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 万友利

作者简介: 曾孝文(1995—), 男, 博士, 工程师, 从事青藏高原区域地质调查与大地构造研究。E-mail: [zengxwjl@126.com](mailto:zengxwjl@126.com)

资助项目: 中国地质调查局区域地质调查项目(DD20240026); 第二次青藏高原综合考察项目(2019QZKK0706); 成都地质调查中心“刘宝珺院士基金”

Bangong-Nujiang suture zone (BNSZ), which can reveal the sedimentary environment Bangong-Nujiang Ocean and relationship between BNSZ and SNMZ. In this paper, research on the siliceous rocks from the Asa area, located in the central segment of SNMZ, is reported, including field work, petrology, as well as major- and trace-element analysis. Moreover, the genesis and sedimentary environments of these siliceous rocks have also been analyzed. The Asa siliceous rocks consist of two types: red siliceous and black siliceous, which are exposed as rock blocks in the mélangé belt. The  $\text{SiO}_2$  content in red siliceous rocks is lower than that of pure siliceous rocks, while the red siliceous rocks are relatively enriched in Al. The rare earth element patterns of the red siliceous rocks are similar with flat model with a weak negative Ce anomaly after North American Shale standardization (NASS). The red siliceous rocks belong to the siliceous rocks of normal sedimentary genesis. So, the red siliceous rocks were formed in a continental margin basin environment with the addition of terrigenous materials in the source area. The black siliceous rocks are enriched in Fe and Mn, with a strong negative Ce anomaly after North American Shale standardization (NASS). The black siliceous rocks are of hydrothermal origin, influenced by basic pyroclastic materials and formed by hydrothermal activity near the continental margin. The geochemical characteristics of the siliceous rocks indicate that siliceous rocks in Asa ophiolitic mélangé were formed in a limited oceanic basin environment close to the continental margin, which is consistent with siliceous rocks from other ophiolites in SNMZ. Unlike SNMZ, BNSZ not only contains siliceous rocks formed in the continental margin environment but also preserves siliceous rocks deposited in the pelagic environment. Therefore, the difference in the siliceous depositional environments between BNSZ and SNMZ suggests that SNMZ does not represent a tectonic nappe of BNSZ but is an in-situ ophiolitic mélangé belt originated from a limited oceanic basin.

**Key words:** siliceous; geochemical characteristics; sedimentary environment; Meso-Tethys

## 0 引言

深海相硅质岩是大洋板块地层中的重要组成部分(Isozaki et al., 1990; 冯益民等, 2018), 洋盆闭合之后, 这些深海相硅质岩多与蛇绿岩伴生, 作为混杂岩基质或蛇绿岩上覆的沉积岩系存在(张进等, 2012; Dilek and Furnes, 2014)。除其中的放射虫化石可以约束洋盆形成时代之外, 这些硅质岩受后期风化作用及成岩作用影响较弱, 其地球化学特征记录了洋盆扩张期间热液作用、火山及陆源碎屑等的含量变化, 可为洋盆规模、性质以及其中热液活动记录提供重要的信息(Murray et al., 1990, 1991; Kato and Nakamura et al., 2002)。因此, 硅质岩的地球化学特征对揭示洋盆格局演化与区域动力演变具有重要的指导意义(Murray et al., 1990; 冯彩霞等, 2001, 2011; 杜远生等, 2007; 闫臻等, 2008; 张聪等, 2017)。

中特提斯洋的俯冲与闭合, 在西藏中部残留了大量的洋壳遗迹, 根据蛇绿岩和伴生岩石的空间分布, 前人在西藏中部划分出了班公湖-怒江缝合带和狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带等两条构造带(Baxter et al., 2009; Zhang et al., 2014; Zhu et al., 2016; 马安林和胡修棉, 2021)。目前, 对于狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩的构造属性的争论尤为激烈, 核

心分歧在于其属于班公湖-怒江缝合带的构造推覆体还是一条记录了洋盆闭合位置的独立蛇绿混杂岩带(Wu et al., 2015; Zeng et al., 2018a; Zeng et al., 2018b), 该分歧严重制约了中特提斯洋中生代洋盆格局、俯冲极性以及闭合时限的深入探讨, 进而制约了对羌塘盆地的性质转换和油气保存条件的全面认识(刘中戎和张佳伟, 2017)。前人的研究主要集中于两条蛇绿岩带中的蛇绿岩空间分布、形成时代、地球化学性质以及相关地层时代等研究(Fan et al., 2015, 2017a; Xu et al., 2014; Liu et al., 2016)。对能反映成因和沉积环境重要标志的硅质岩, 前人研究集中在其中的放射虫时代上(Baxter et al., 2009; Fan et al., 2015; 潘桂棠等, 2020), 虽对其岩相学、地球化学特征及其构造背景等方面有所涉及(曹圣华等, 2005; 陈玉禄等, 2006; 冯彩霞等, 2011; 徐梦婧等, 2014), 却并未针对两条蛇绿岩带的硅质岩地球化学特征及构造背景的差异进行深入研究, 限制了对两条蛇绿混杂岩带间构造关系的深入认识。

本文以狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带阿索地区的黑色硅质岩和紫红色硅质岩为研究对象, 在野外地质、岩石学、地球化学研究的基础上, 分析了两类硅质岩的岩石成因与沉积环境。结合班公湖-怒江缝合带和狮泉河-纳木错蛇绿岩带其他硅质岩,



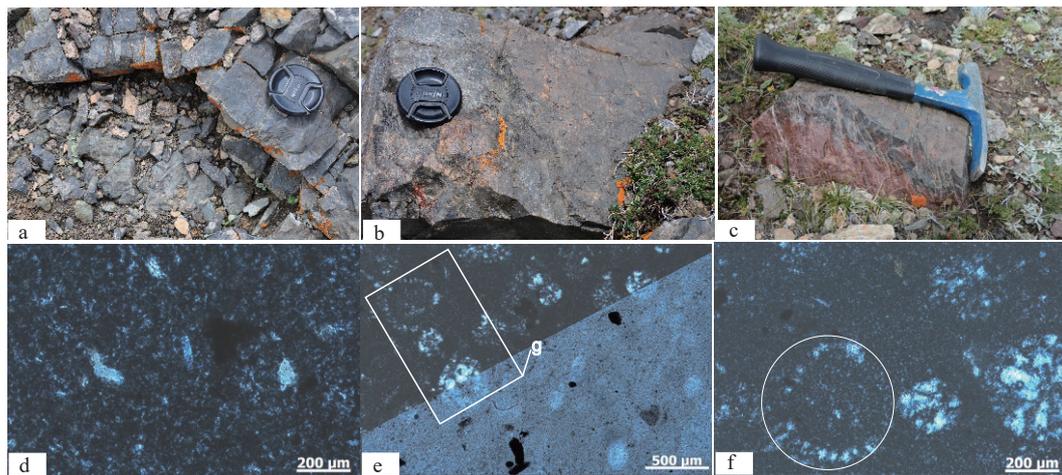
生代变质岩岩块、火山岛弧岩石以及深海硅质岩、泥岩等(图 1b)。混杂岩带内部还被早白垩世花岗岩所侵入,但混杂岩带边界上并未发育同期侵入岩(Liu et al., 2018)。深海沉积多与蛇绿岩相伴生,以透镜状构造岩块的形式夹持在变形强烈的阿索岩组砂泥岩基质之中(曾孝文等, 2018; Zeng et al., 2018b)。深海沉积岩产出岩性丰富,包括含放射虫硅质岩、条纹状硅质岩、铁锰质粉砂岩及硅质粉砂岩等。野外工作发现,硅质岩主要分为两类,分别为黑色硅质岩(图 2a-b)和紫红色含放射虫硅质岩(图 2c),二者均以岩块形式与早白垩世阿索岩组断层接触,未见二者存在直接接触关系。另外,野外还发现蛇绿岩中玄武岩岩枕空隙中有黑色硅质岩充填于其中,前人也发现有硅质岩与蛇绿岩中玄武岩整合接触(唐峰林等, 2004),表明硅质岩可能属于洋壳上覆沉积岩的组成部分。

## 2 样品描述与分析方法

本次工作主要针对混杂岩带中黑色层状硅质岩和紫红色硅质岩采集了相关样品,具体采样位置见图 1。黑色硅质岩层状构造较为发育(图 2a),表面见岩石角砾以及褐铁矿化(图 2b)。黑色硅质岩主要矿物组成由微晶石英以及隐晶质玉髓等组成(图 2d),含有少量的金属矿物颗粒,且见较多的褐

铁矿化。紫红色硅质岩风化的灰紫色、浅红色(图 2c),镜下主要由团块状蛋白石,玉髓以及微晶石英组成,粒间可见云雾状黏土矿物充填(图 2f)。蛋白石多为球状集合颗粒,部分微晶石英以圆环状形式重结晶,二者均为放射虫颗粒重结晶组成,组成生物骨架结构,估算放射虫骨架颗粒含量约为 30%(图 2e),在石英颗粒之间可见少量泥质物质、碳质物质以及白云母充填,含量约 5%(图 2f)。

本次野外工作共采集硅质岩地球化学样品 10 件,其中黑色硅质岩 6 件,紫红色硅质岩 4 件。为避免后期风化作用、热液蚀变影响,野外采集样品均为质地坚硬且不存在后期脉体的未受改造样品。全岩地球化学粉末样品处理工作由河北廊坊宇能地质服务公司进行。首先选取未受改造的硅质岩样品,去除风化部分,破碎至 1~5 mm 粒径,用稀盐酸和去离子水多次超声浸泡并清洁至无气泡,随后使用去离子水洗净烘干,将粉末以玛瑙研钵粉碎至 74  $\mu\text{m}$ (200 目),用于主、微量元素分析测试。样品的主、微量元素及烧失量测定工作均在中国地质大学(北京)地质资源与地质过程国家重点实验室进行,所获的主、微量元素分析结果见附表 1<sup>\*</sup>。烧失量分析过程为取待测样品 1 g 在马弗炉中于 950  $^{\circ}\text{C}$  加热 24 h,稳定后称量并计算质量差。主量元素含量测定使用仪器为美国利曼公司



a. 黑色层状硅质岩野外照片,镜头北; b. 黑色层状硅质岩近景照片,镜头北; c. 紫红色硅质岩野外照片,镜头西; d. 黑色硅质岩显微照片; e. 紫红色硅质岩显微照,其中团块状蛋白视为放射虫遗骸; f. 紫红色硅质岩放射虫生物骨架结构

图 2 阿索蛇绿混杂岩带中产生的硅质岩野外及镜下照片

Fig. 2 Field and microscopic photographs of the cherts in Asa area

\*数据资料请联系编辑部或登录期刊网站 <https://cjyttdz.journals.cn> 获取。

(LEEMAN LABS.INC)Prodigy 型等离子发射光谱仪(ICP-OES);对于部分低含量元素,采用酸溶溶液,利用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 进行 K、P、Ti、Mn 等元素含量验证性测定,当前述元素含量低于 0.01% 时,直接选用微量元素分析结果。化学预处理方法为称取约 50 mg 样品,采用碱溶法将样品进行全部溶解,并将碱溶溶液用纯硝酸提取定容后待测, SiO<sub>2</sub> 的分析精度 1%,其他氧化物的分析精度在 4%~10% 之间。微量和稀土元素预处理方法为在超净实验室内使用电子天平上称取约 40 mg 样品,采用两酸(HNO<sub>3</sub>+HF)高压反应釜(Bomb)溶样方法进行样品的化学预处理。样品分析仪器为美国安捷伦公司生产的 Agilent 7500a 型等离子质谱仪,分析过程中,以美国标准局美国 Equipment 实验室制备的标准溶液 Std-1、Std-2、Std-4 为检测外部标样,以定值加入的 Rh 为检测内部标准进行含量标定;使用美国地质调查局(USGS)标准样品 AGV2、中国地质测试中心岩石标样 GSR-1 和 GSR-3、GSR-5 进行分析质量监控,标样数据见附表 2<sup>\*</sup>。样品分析误差:Li, P, K < 15%; Ti, Ni, V, Co, Cr, Sc, Mn < 10%,其他元素 < 5%。P、K、Mn、Ti 含量较高时以常量分析结果为准。详细的样品处理过程,分析精度见 Wang et al.(2013)。

### 3 分析结果

阿索混杂岩带中黑色硅质岩的 SiO<sub>2</sub> 含量在 85.75%~94.59% 之间,平均含量为 88.77%;紫红色

硅质岩的 SiO<sub>2</sub> 含量在 86.11%~89.94% 之间,平均值为 87.80%,二者 SiO<sub>2</sub> 含量低于纯硅质岩的 SiO<sub>2</sub> 含量(91%~99.8%)。紫红色硅质岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量在 3.26%~4.73% 之间, Si/Al 比值为 16.05~24.32,远低于纯硅质岩 Si/Al 比值(80~1400; Murray et al., 1992)。紫红色硅质岩 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 和 MnO 含量较低,分别介于 1.27%~1.98% 和 0.04%~0.11%,而 TiO<sub>2</sub> 含量和 K<sub>2</sub>O 含量相对较高,分别为 0.11%~0.18% 和 0.71%~1.55%; MnO 含量较低,在 0.04%~0.11% 之间。与紫红色硅质岩相比,黑色硅质岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量相对较低,介于 0.58%~2.40%, Si/Al 比值在 34.74~131.30 之间,总体低于纯硅质岩 Si/Al 比值。黑色硅质岩 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 和 MnO 相对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 而言,含量较高,变化范围分别为 1.86%~7.23% 和 0.07%~0.92%; TiO<sub>2</sub> 和 K<sub>2</sub>O 含量较低,分别介于 0.03%~0.11% 和 0.04%~0.11%; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量介于 0.08%~0.32%,变化范围较大。

阿索地区硅质岩稀土元素(REE)总体含量较低,ΣREE 介于 25.50×10<sup>-6</sup>~111.50×10<sup>-6</sup>,轻稀土元素总含量(ΣLREE)介于 93.01×10<sup>-6</sup>~21.16×10<sup>-6</sup>,重稀土元素总含量(ΣHREE)为 4.42×10<sup>-6</sup>~18.82×10<sup>-6</sup>,整体上,较富集轻稀土元素。在球粒陨石标准化稀土曲线上(图 3b),硅质岩稀土整体表现出轻稀土元素富集的右倾分布特征并具有轻微的 Eu 负异常。在北美页岩标准化稀土微量曲线图中(图 3a),硅质岩样品整体表现出较为平坦的稀土配分曲线。紫红色硅质岩与黑色硅质岩二者在北

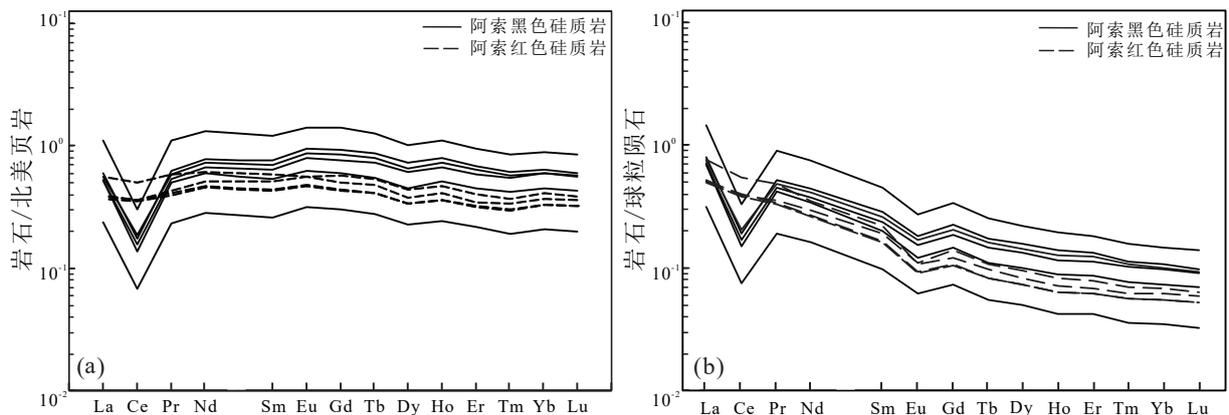


图 3 阿索硅质岩北美页岩标准化 (a) 和球粒陨石标准化 (b) 稀土配分模式图 (球粒陨石标准化数据据 Sun and McDonough, 1989, 北美页岩标准化数据据 Boynton, 1984)

Fig. 3 North American Shale rare earth element (a) and chondrite-normalized rare earth element (b) diagrams for cherts in Asa aera (chondrite-normalized data after Sun and McDonough, 1989; North American Shale data after Boynton, 1984)

\*数据资料请联系编辑部或登录期刊网站 <https://cjyttsdz.ijournals.cn> 获取。

美页岩标准化稀土曲线图中表现出不同的 Ce 异常程度,黑色硅质岩  $\delta\text{Ce}$  值介于 0.29~0.34,而紫红色硅质岩的  $\delta\text{Ce}$  值介于 0.88~0.92,黑色硅质岩的 Ce 负异常明显(图 3a),而紫红色硅质岩 Ce 负异常不明显(图 3b)。硅质岩微量元素总量较低,其中黑色硅质岩中不相容元素 Nb、Ta、Th、U 等整体低于地壳元素丰度值;Cu、Zn 和 Y 等亲铜元素含量高于地壳元素丰度值;Ba、Rb 以及 Sr 等碱土金属亏损明显。与黑色硅质岩相比,紫红色硅质岩 Cu、Zn 和 Y 等亲铜元素含量远低于地壳元素丰度值,Nb、Ta、Th、U 等不相容元素含量也低于地壳元素丰度值,Ba、Sr 等碱土金属亏损较为明显(地壳元素丰度值据黎彤,1987)。

## 4 讨论

### 4.1 硅质岩的成因

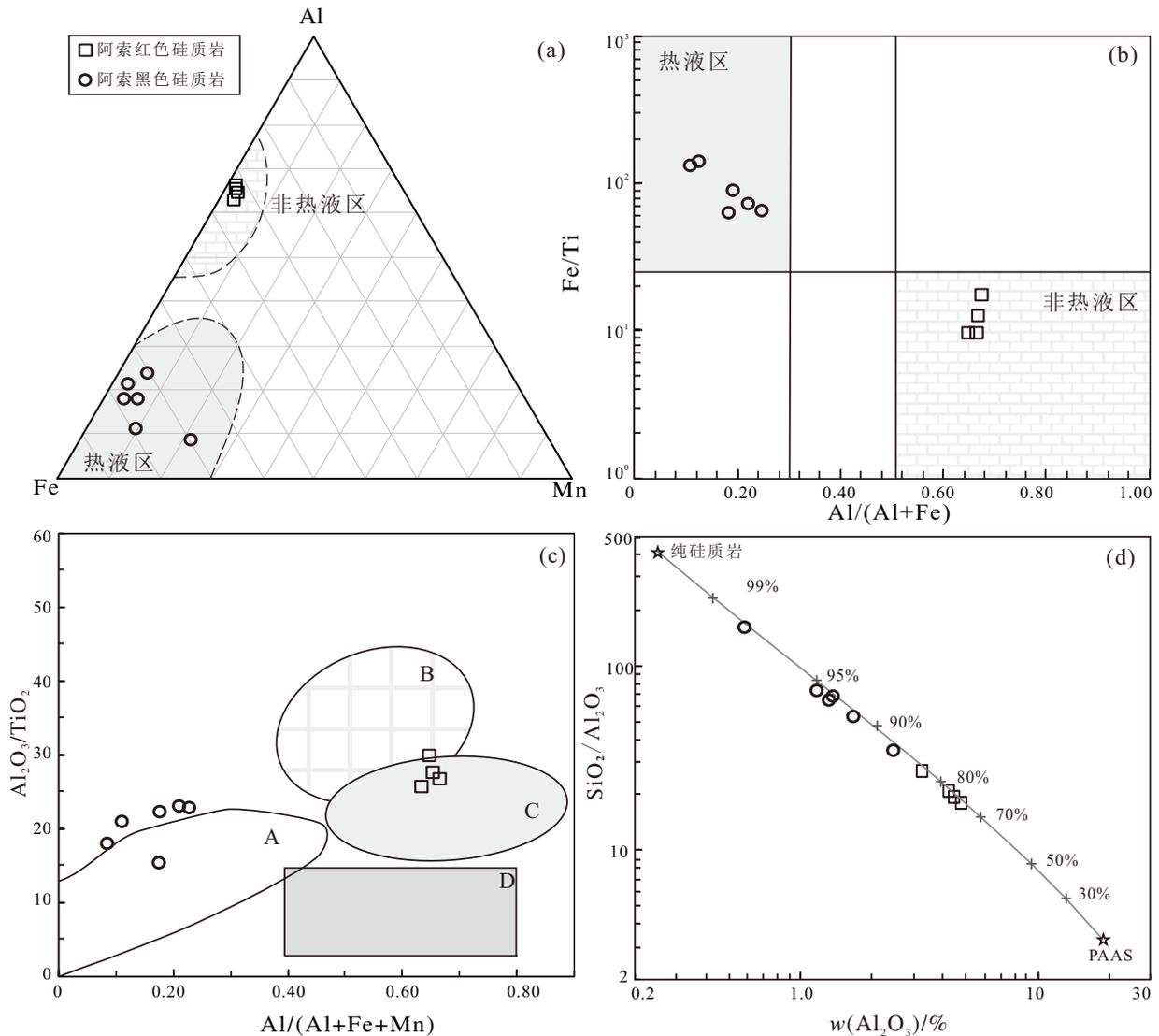
关于大洋盆地硅质岩的成因,主要有生物化学沉积成因、火山沉积成因、热液成因等观点(Adachi et al., 1986)。由于后期成岩作用对硅质岩原始组构存在改造的可能性,直接的矿物学证据对硅质岩的成因缺乏可靠的指示意义,因此,对于硅质岩的成因判别主要依靠地球化学手段(Hara et al., 2010; Bruce et al., 2014)。前人的研究表明,硅质岩中 Fe 和 Mn 的富集主要归因于海底热液的参与,而 Al、Ti 等元素的相对富集则多与陆源物质的输入相关,硅质岩中 Al、Fe、Mn、Ti 元素的含量可以作为判定硅质岩成因的重要指标(Bostr et al., 1972; Yamamoto et al., 1987)。阿索黑色硅质岩具有较高的  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  和 MnO 含量而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  含量相对较低,表明其成因可能与热液活动相关。黑色硅质岩具有较低的  $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$  比值(0.09~0.23),与纯热液成因的硅质岩相似,在 Al-Fe-Mn 三角环境判别图解中,其投点落入了热液成因区域之中(图 4a)。考虑到 Mn 元素在成岩作用后具有一定活动性(Murray, 1994),选取  $\text{Fe}/\text{Ti}-\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe})$  图解进行补充判别,阿索黑色硅质岩投点落入了热液成因区(图 4b),证明阿索地区的黑色硅质岩主要形成热液作用环境之中。阿索黑色硅质岩的  $\text{SiO}_2$  含量略低,而  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量相对较高,表明阿索黑色硅质岩在成岩过程中有少量陆源物质的加入。阿索黑色硅质岩具有相对较高的 MgO 含量(0.07%~0.92%),表明其热液成因可能与镁铁质岩浆作用相关。在硅质岩成因  $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  判

别图解之中(图 4c; 黄虎等, 2012), 岩石投点落入了靠近基性火山热液成因硅质岩区域, 表明岩石形成于基性火山热液成因相关背景下, 可能存在少量基性岩屑物质的加入, 这也和黑色硅质岩与蛇绿岩相伴生的特点一致。

阿索地区的紫红色硅质岩与黑色硅质岩相比,二者之间的差异较大。阿索紫红色硅质岩具有较低的 Fe、Mn 含量, 相对较高的 Al、Ti 等陆源物质组成成分, 暗示了源区成岩过程中有陆源物质的加入(杜远生, 1995; Bruce et al., 2014)。在 Al-Fe-Mn 成因图解之中(图 4a), 阿索黑色硅质岩投点落入了非热液区域之中, 表明紫红色硅质岩的形成与热液作用关系不大。同样, 在  $\text{Fe}/\text{Ti}-\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe})$  和  $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})-\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  判别图解之中(图 4b-c), 紫红色硅质岩样品投点均落入非热液区域之中, 表明岩石形成于正常沉积的非热液环境。紫红色硅质岩的  $\text{SiO}_2$  含量远低于纯硅质岩, 并且具有相对较高的  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量, 表明陆源物质是其重要的成分来源(Murray, 1994)。此外, 样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值介于 25.9~29.9, 高于正常海相沉积硅质岩的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值(22.08), 表明成岩过程中有长英质物质的加入(黄虎等, 2012, 2013)。将后太古界澳大利亚沉积页岩(PAAS)作为一端元与纯硅质岩做简单混合模拟(图 4d), 在  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  趋势线上, 紫红色硅质岩样品表现出约 20%~30% PAAS 物质的加入, 也证明陆源物质在其成岩过程中加入比例较大(黄虎等, 2013)。

### 4.2 硅质岩的沉积环境

硅质岩的硅质来源、物理化学条件以及沉积速率受控于硅质岩的沉积环境, 而反映在硅质岩的地球化学特征之中, 因此, 运用硅质岩的地球化学特征能很好约束硅质岩的沉积环境(冯彩霞, 2011)。硅质岩中的稀土元素主要来源于所吸附海水和陆源物质, 且在成岩作用后具有稳定性, 对于反映硅质岩的沉积环境具有重要意义(Murry et al., 1992)。前人对现代海洋沉积物的研究发现, 硅质岩中 Ce 异常值( $\delta\text{Ce}$  值)受沉积环境影响较大(丁林和钟大赉, 1995), 大陆边缘环境下所形成硅质岩的北美页岩标准化  $\delta\text{Ce}$  值介于 0.68~1.52(平均为 1.09), 开阔洋盆中硅质岩的  $\delta\text{Ce}$  值为 0.58~0.76(平均为 0.6), 洋中脊附近环境的硅质岩的  $\delta\text{Ce}$  值较低, 为 0.18~0.38。前人研究表明, 大陆边缘硅质岩  $(\text{La}/\text{Ce})_{\text{N}}$  值为 0.67~1.33(平均 0.93), 大洋中脊



a. 硅质岩 Al-Fe-Mn 成因判别图解 (据 Adachi et al., 1986; Yamamoto, 1987); b. 硅质岩 Fe/Ti-Al/(Al+Fe) 成因判别图解 (据 Adachi et al., 1986; Yamamoto, 1987); c. 硅质岩  $Al_2O_3/TiO_2$ -Al/(Al+Fe+Mn) 成因判别图解 (黄虎等, 2012); d. 硅质岩  $SiO_2/Al_2O_3$ - $Al_2O_3$  图 (硅质岩组分演化曲线据黄虎等, 2013)。A—基性火山热液成因硅质岩; B—含酸性火山碎屑非热液成因硅质岩; C—正常海相非热液成因硅质岩; D—含基性火山碎屑非热液成因硅质岩

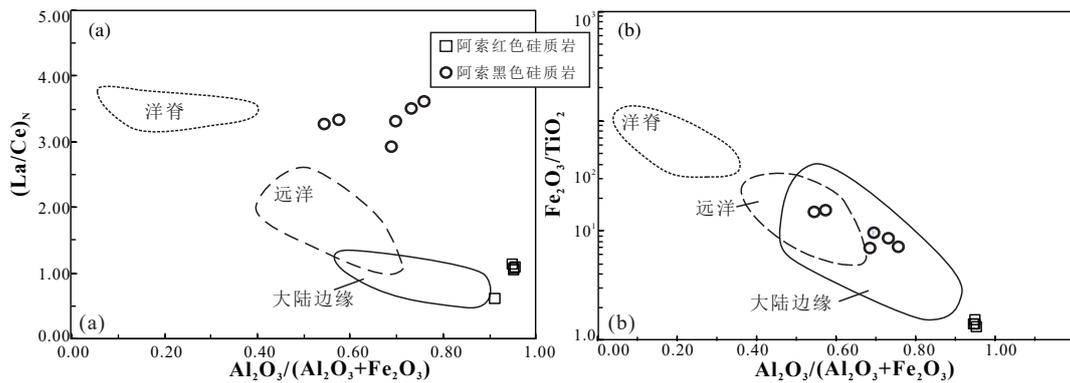
图 4 阿索蛇绿混杂岩中硅质岩岩石成因判别图解

Fig. 4 Petrogenesis diagrams of cherts in Asa aera

$(La/Ce)_N$  介于 1.66~5.19 (平均为 3.44), 从大洋中脊向开阔洋盆再向大陆边缘延伸,  $(La/Ce)_N$  值表现出与距大洋中脊距离成负相关的关系 (Murry et al., 1991)。 $(La/Ce)_N$  值越高, 说明硅质岩源区受陆源物质影响越小 (Murry, 1994), 与之相反,  $(La/Yb)_N$  值则表现出与距大洋中脊距离成正相关的关系,  $(La/Yb)_N$  值越大, 说明硅质岩受陆源物质影响越大, 距离大洋中脊越远 (Murry et al., 1991)。

紫红色硅质岩的北美页岩标准化  $\delta Ce$  值在 0.80~0.92 之间, 远远高于大洋中脊岩石的  $\delta Ce$  值,

表明阿索紫红色硅质岩沉积环境远离大洋中脊 (Armstrong et al., 1999)。同样, 紫红色硅质岩具有较低的  $(La/Ce)_N$  比值 (1.04~1.12), 在  $(La/Ce)_N$ - $Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  构造环境判别图解 (图 5a) 中, 岩石投点落入了大陆边缘盆地区域。阿索紫红色硅质岩的成岩过程中存在一定陆源物质的加入, 也暗示了阿索紫红色硅质岩的形成位置可能相对靠近大陆边缘。在主量元素  $Al_2O_3/(100-SiO_2)-Fe_2O_3/(100-SiO_2)$  硅质岩沉积环境判别图解中 (图 6a), 紫红色硅质岩投点落入了大陆边缘区域之中, 与其



a. 硅质岩  $(La/Ce)_N-Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  沉积环境判别图解 (据 Murray et al., 1994) b. 硅质岩  $Fe_2O_3/TiO_2-Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  沉积环境判别图解 (据 Murray et al., 1992) ;

图5 阿索蛇绿混杂岩中硅质岩沉积环境判别图解

Fig. 5 The environment discrimination diagrams for cherts in Asa area

稀土元素的富集特征相符合。紫红色硅质岩样品的 V/Y 比值介于 1.35~3.10, 也与大陆边缘硅质岩 V/Y 比值组成相接近, 而明显不同于大洋中脊硅质岩和远洋盆地硅质岩(V/Y 比值为 5.8; Murray, 1994)。以上证据表明, 紫红色硅质岩沉积在大陆边缘盆地环境中。尽管黑色硅质岩属碱性火山热液成因, 但在  $Fe_2O_3/TiO_2-Al_2O_3/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$  环境判别图解之中(图 5b), 黑色硅质岩样品主体也落入了大陆边缘区域之中, 这也与其成岩过程中有少量陆源物质加入的特征一致。综合黑色硅质岩与紫红色硅质岩研究结果, 本文认为阿索地区的硅质岩形成于大陆边缘洋盆之中, 盆地中热液活动较为明显。

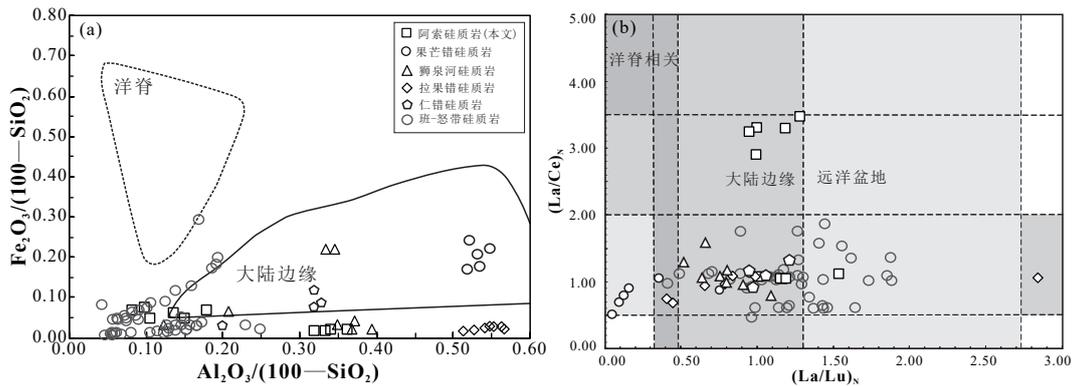
### 4.3 大地构造意义

前人在阿索混杂岩带硅质岩中采集的放射虫样品经南京古生物研究所王玉净鉴定, 包括古网冠虫 *Aftchaedictyomitra* sp.、假网冠虫 *Pseudodictyomitra* sp.、十字虫 *Crucella* sp.、原锥球虫 *Praeconocaryomma* sp.、帕罗内氏虫 *Paronaella* sp.、撒纳勒虫 *Thanarla* sp. 等种属, 其时代为早白垩世(唐峰林等, 2004)。另外, 我们预研究时在由黑色硅质岩填充岩枕空隙的枕状玄武岩中获得了 121 Ma 的锆石 U-Pb 谐和年龄(作者未刊数据), 也与前人的放射虫时代鉴定结果一致。阿索混杂岩带深海相浊积岩混杂基质的沉积时代也为早白垩世(Zeng et al., 2021), 前人还在阿索蛇绿岩中获得了 114 Ma 的早白垩世蛇绿岩年龄(曾孝文等, 2018), 这也与硅质岩的沉积时代总体相符。拉果错地区硅质岩的放射虫形成于中侏罗世至早白垩世阿普

特阶之间(Baxter et al., 2009), 表明该地区在早白垩世仍然存在深水沉积环境。永珠蛇绿岩枕状玄武岩夹层中的硅质岩中放射虫形成时代总体为  $J_3-K_1$ (Xu et al., 2014), 也证明永珠蛇绿岩中存在早白垩世的深海沉积。据此推测, 阿索混杂岩带中的深海沉积岩块的主体沉积时代可能为早白垩世, 但也不排除存在侏罗纪深海沉积岩石的可能性。

综合前人报道的狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带中的硅质岩和本文数据, 分析显示, 阿索蛇绿混杂岩和狮泉河、拉果错、仁错以及永珠果芒错等四处蛇绿岩中的硅质岩均相对较为富铝而贫铁, 硅质岩沉积环境判别图解显示岩石形成于大陆边缘盆地区域之中(图 6a), 表明其形成于有限洋盆环境, 并非开阔的大洋盆地环境(Murray, 1994)。同样, 以上硅质岩与典型的大洋中脊热液活动影响的硅质岩所具有的高  $(La/Ce)_N$ (北美页岩标准化) 比值特征不一致, 表明其沉积环境远离大洋中脊(图 6b)。果芒错地区的硅质岩多以夹层形式产出于玄武岩之中, 徐梦婧等(2014)研究结果显示其形成于靠近大陆边缘的洋盆中。以上结果表明, 狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带中的硅质岩主要沉积于靠近大陆边缘的有限洋盆环境中, 与该带中的早侏罗世-早白垩世蛇绿岩属于形成于俯冲背景下的小洋盆的认识一致。

班公湖-怒江缝合带中出露的大量硅质岩则有所不同, 尽管部分硅质岩体现出大陆边缘沉积岩石的相似性, 但该带中的硅质岩并非产出于单一的沉积环境。在  $Fe_2O_3/(100-SiO_2)-Al_2O_3/(100-SiO_2)$  主量元素判别图解中(图 6a), 班公湖-怒江缝合带



a. 硅质岩  $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100-\text{SiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3/(100-\text{SiO}_2)$  沉积环境判别图解 (据 Murray et al., 1992); b. 硅质岩  $(\text{La}/\text{Ce})_N - (\text{La}/\text{Lu})_N$  沉积环境判别图解 (据 Murray et al., 1994)。数据来源: 果芒错硅质岩据徐梦婧等 (2014), 拉果错硅质岩据徐梦婧等 (2020), 狮泉河硅质岩据王艳凯等 (2021), 仁错硅质岩据任强 (2019), 阿索混杂岩硅质岩数据据本文, 班公湖-怒江缝合带硅质岩据冯彩霞 (2011) 和 Fan et al. (2017)

图6 狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带和班公湖-怒江缝合带硅质岩沉积环境判别图解

Fig. 6 The environment discrimination diagrams for the cherts of BNSZ and SNMZ

中的部分硅质岩投点落入了大陆边缘环境区域之中,但与狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带中的硅质岩不同,班公湖-怒江缝合带中,还有部分混杂岩带中的硅质岩具有较高的  $(\text{La}/\text{Lu})_N$  比值,暗示其可能形成于远洋盆地环境(图 6b)。另外,与狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带中的硅质岩仅与蛇绿岩伴生的特征不同,前人在班公湖-怒江缝合带的洋岛和洋底高原岩石组合中也发现有硅质岩夹层,并显示出远洋沉积的特征(Zhang et al., 2014; Fan et al., 2017)。

基于对两条蛇绿混杂岩带的整体分析,尽管狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带和班公湖-怒江缝合带的蛇绿岩中均保存有大陆边缘环境中的硅质岩,但班公湖-怒江缝合带内的蛇绿混杂岩中的硅质岩还保留了远洋环境中沉积的硅质岩,而狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带中缺乏远洋沉积的物质记录。同样,与狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带中保存的蛇绿岩主要为早侏罗世-早白垩世 SSZ 型蛇绿岩的特征不同(Xu et al., 2014; Zeng et al., 2021),班公湖-怒江缝合带中保存的大洋地壳物质更加丰富,包含了晚三叠世-早白垩世洋岛、早侏罗世洋底高原、晚三叠世蛇绿岩及晚三叠世-早侏罗世深海浊积岩等(Zhang et al., 2014; Ma et al., 2020; Zhang et al., 2020)。因此,硅质岩的沉积环境差异与两条蛇绿混杂岩带中其余洋壳物质的差异共同指示了狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带并非班公湖-怒江缝合带的构造推覆体,而是一条独立的蛇绿混杂岩带,其代表了相对靠近大陆边缘的有限洋盆。

## 5 结论

(1) 西藏尼玛县阿索蛇绿混杂岩中产出的紫红色硅质岩为生物成因且成岩过程中有一定陆源物质的加入,黑色硅质岩形成于基性火山相关的热液环境之中。

(2) 硅质岩地球化学特点表明阿索蛇绿混杂岩带中的硅质岩沉积于大陆边缘环境,与狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带中其他蛇绿岩产出的硅质岩沉积环境一致。

(3) 狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩中硅质岩的地球化学特征与班公湖-怒江缝合带存在明显差异,该带中缺乏班公湖-怒江缝合带存在的远洋环境硅质岩,表明其并非班公湖-怒江缝合带的构造推覆体,而是一条独立的蛇绿混杂岩带。

**致谢:** 分析测试工作得到了中国地质大学(北京)地质实验中心苏犁教授与张红雨老师的指导,野外工作中得到了张天羽博士、刘一鸣博士、罗安波博士等的帮助,论文审稿过程中得到了本刊编辑和两位匿名审稿人的耐心帮助,在此一并致谢。

## References

- Adachi M, Yamamoto K, Suigiski R, 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific: Their geological significance a indication of ocean ridge activity[J]. *Sedimentary*

- Geology*, 47: 125–148.
- Armstrong H A, Owen A W, Floyd J D, 1999. Rare earth geochemistry of Arenig cherts from the Ballantrae ophiolite and Leadhills Imbricate Zone, southern Scotland: Implications for origin and significance to the Caledonian Orogeny[J]. *Journal of the Geological Society*, 156 (3): 549–560.
- Baxter A T, Aitchison J C, Zybrev S V, 2009. Radiolarian age constraints on Mesotethyan ocean evolution, and their implications for development of the Bangong-Nujiang suture, Tibet[J]. *Journal of the Geological Society*, 166 (4): 689–694.
- Bostr M K, Joensuu O, S Valdés, et al., 1972. Geochemical history of South Atlantic Ocean sediments since Late Cretaceous[J]. *Marine Geology*, 12 (2): 85–121.
- Boynton W V, 1984. Cosmochemistry of the rare earth element: Meteorite studies[M]// Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier: 63–114.
- Bruce M C, Percival I G, 2014. Geochemical evidence for provenance of Ordovician cherts in southeastern Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 61 (7): 927–950.
- Cao S H, Luo X C, Tang F L, et al., 2004. Time-space structure and evolution of the arc-basin system on the southern side of the Bangong Co-Nujiang junction zone[J]. *Geology in China*, 31 (1): 51–56 (in Chinese with English abstract).
- Cao S H, Liao L G, Deng S Q, et al., 2005. Sequences, geochemistry and genesis of the Bangong-Lake ophiolites in Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25 (3): 101–110 (in Chinese with English abstract).
- Cao S H, Xiao X L, Ouyang K G, 2008. Renew-establishment of the Jurassic Mugangri groups and its geological significance on the western side of the Bangonghu-Nujiang suture zone[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26 (4): 559–564 (in Chinese with English abstract).
- Chen Q, Xie L, Xiao Z J, 2007. Characteristics and tectonic evolution of Bangong Lake ophiolitic mélange belt in the western Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 30 (2): 107–112 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y L, Zhang K Z, Yang Z M, et al., 2006. Discovery of a complete ophiolite section in the Jueweng area, Nagqu County, in the central segment of the Bangong Co-Nujiang junction zone[J]. *Geological Bulletin of China*, 25 (6): 694–699 (in Chinese with English abstract).
- Dilek Y, F H, 2014. Ophiolites and Their Origins[J]. *Elements*, 10 (2): 93–100.
- Ding L, Zhong D L, 1995. Characteristic of rare earth elements and Ce anomaly of chert from palaeo-Tethys in Changning Menglian belt, western Yunnan [J]. *Science in China (Ser. B)*, 25 (1): 93–100 (in Chinese).
- Du Y S, 1995. Devonian Paleo-ocean of Qinling orogenic belt[J]. *Earth Science*, 20 (6): 617–623 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Zhu J, Gu S Z, et al., 2007. Sedimentary geochemistry of the Cambrian-Ordovician cherts: Implication on archipelagic ocean of north Qilian orogenic belt[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 37 (10): 1314–1329 (in Chinese with English abstract).
- Feng C, Liu J J, 2001. The inventive actuality and mineralization significance of cherts[J]. *World Geology*, 20 (2): 119–123 (in Chinese with English abstract).
- Feng C, 2011. Geochemical characteristics and sedimentary environment of siliceous rocks of Gerze area in western Bangong Co-Nujiang suture zone, Tibet[J]. *Mineral Deposits*, 30 (5): 773–786 (in Chinese with English abstract).
- Fan J J, Li C, Xie C M, et al., 2015. The evolution of the Bangong-Nujiang Neo-Tethys Ocean: Evidence from zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic analyses of Early Cretaceous oceanic islands and ophiolites[J]. *Tectonophysics*, 655: 27–40.
- Fan J J, Li C, Wang M, et al., 2017. Reconstructing in space and time the closure of the middle and western segments of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean in the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 107 (1): 231–249.
- Feng Y, Liao L G, Xu P, 2006. The geological characteristics and the forming time of ophiolites in the region of the Bangong Lake, Tibet[J]. *Resource Survey and Environment*, 26 (3): 185–192 (in Chinese with English abstract).
- Feng Y M, Zhang Y, 2018. Introduction and commentary on ocean plate stratigraphy[J]. *Geological Bulletin of China*, 37 (4): 523–531 (in Chinese with English abstract).
- Hara H, Kurihara T, Kuroda J, et al., 2010. Geological and geochemical aspects of a Devonian siliceous succession in northern Thailand: Implications for the opening of the Paleo-Tethys[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 297 (2): 452–464.
- Huang H, Du Y S, Yang J H, et al., 2012. Geochemical features of siliceous sediments of the Shuicheng-Ziyun-Nandan Rift Basin in the Late Paleozoic and their tectonic implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86 (12): 1994–2010 (in Chinese with English abstract).
- Huang H, Du Y S, Huang Z Q, et al., 2013. Depositional chemistry of chert during late Paleozoic from western Guangxi and its implication for the tectonic evolution of the Youjiang Basin[J]. *Science China: Earth Sciences*, 56: 479–493 (in Chinese with English abstract).
- Isozaki Y, Maruyama S, Fukuoka F, 1990. Accreted oceanic materials in Japan[J]. *Tectonophysics*, 181: 179–205.
- Kato Y, Nakao K, Isozaki Y, 2002. Geochemistry of Late Permian to Early Triassic pelagic cherts from southwest Japan: Implications for an oceanic redox change[J]. *Chemical Geology*, 182 (1): 15–34.
- Li T, 1987. The statistical characteristics of the abundance of chemical elements in the earth's crust[J]. *Geology and Prospecting*, 28 (10): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Liu Q H, Xiao Z J, Cao S H, et al., 2004. A preliminary study of the spatio-temporal framework of the archipelagic arc-basin systems in the western part of the Bangong- (Nujiang) suture zone, Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24 (3): 15–21 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y M, Wang M, Li C, et al., 2018. Late Cretaceous tectono-magmatic activity in the Nize region, central Tibet: Evidence for lithospheric delamination beneath the Qiangtang-Lhasa collision

- zone[J]. *International Geology Review*: 1 – 22.
- Liu T, Zhai Q G, Wang J, et al., 2016. Tectonic significance of the Dongqiao ophiolite in the north-central Tibetan Plateau: Evidence from zircon dating, petrological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characterization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 116: 139 – 154.
- Liu Z R, Zhang J W, 2017. Late Mesozoic tectonic events and hydrocarbon accumulation in the Qiangtang Basin, northern Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37 (2): 23 – 29 (in Chinese with English abstract).
- Ma A L, Hu X M, Kapp P, et al., 2020. Mesozoic subduction accretion History in central Tibet: constrained from provenance analysis of the Mugangri subduction complex in the Bangong - Nujiang suture zone[J]. *Tectonics*, 39: 006144.
- Ma A L, Hu X M, 2021. Constraining the obduction process of the Dongqiao ophiolite in the Bangongco-Nujiang suture zone by the sedimentary record[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (2): 163 – 175 (in Chinese with English abstract).
- Murray R W, Ten Brink M R B, Jones D L, et al., 1990. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. *Geology*, 18 (3): 268 – 271.
- Murray R W, Buchholtz T, Brink M R, et al., 1991. Rare earth, major, and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey Group, California: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55 (7): 1875 – 1895.
- Murray R W, Ten Brink M R B, Gerlach D C, et al., 1992. Rare earth, major, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: Assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 (7): 2657 – 2671.
- Murray R W, 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications[J]. *Sedimentary Geology*, 90 (3-4): 213 – 232.
- Pan G T, Wang L Q, Geng Q R, et al., 2020. Bangonghu-Shuanghu-Nujiang-Changning-Menglian Mega-suture zone: A discussion on geology and evolution of the Tethys Ocean[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (3): 1 – 19 (in Chinese with English abstract).
- Ren Q, 2018. The ophiolitic tectonic melange and mineralization in the Yongzhu area, Tibet[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Sun D L, Xu J T, Wang Y J, et al., 1991. Stratigraphy and Paleontology of Triassic, Jurassic and Cretaceous in the Ritu Area, (Xizang) [M]. Nanjing: Nanjing University Press: 1 – 210 (in Chinese).
- Sun S S, McDonough W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society Special Publications*, 42: 313 – 345.
- Tang F L, Huang J C, Luo X C, et al., 2004. The discovery and significance of the Asuo structural mélanges in north Tibet[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 27 (3): 245 – 250 (in Chinese with English abstract).
- Wang M, Li C, Wu Y W, et al., 2013. Geochronology, geochemistry, Hf isotopic compositions and formation mechanism of radial mafic dikes in northern Tibet[J]. *International Geology Review*, 56 (2): 187 – 205.
- Wang Y K, Liu E Q, Bi Z W, et al., 2021. Geochemical characteristics and formational environments of siliceous rocks associated with ophiolitic in Shiquanhe area, Tibet[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 44 (5): 16 – 22 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Wang J P, Liu Y M, et al., 2002. Characteristics and age of the Dingqing ophiolite in Xizang (Tibet) and their geological significance[J]. *Acta Micropaleontologica Sinica*, 19 (4): 417 – 420 (in Chinese with English abstract).
- Wu Z, Barosh P J, Ye P, 2015. Late Cretaceous tectonic framework of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 693 – 703.
- Xu M J, Li C, Wu Y W, et al., 2014. Geochemical characteristics and sedimentary environments of siliceous rocks in Guomang-co ophiolitic mélange of Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 33 (7): 1061 – 1066 (in Chinese with English abstract).
- Xu M J, Li C, Zhang X, et al., 2014. Nature and evolution of the Neo-Tethys in central Tibet: Synthesis of ophiolitic petrology, geochemistry, and geochronology[J]. *International Geology Review*, 56 (9): 1072 – 1096.
- Xu M J, Zhao P Y, Lan R, et al., 2020. Geochemical characteristics and sedimentary environments of siliceous in the middle and western parts of the Shiquanhe-Yongzhu-Jiali tectonic belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 27 (3): 182 – 190 (in Chinese with English abstract).
- Xu W, Wang M, Li C, et al., Early Cretaceous ridge subduction along the southern margin of the Qiangtang terrane: New evidence from the Yanqiang Ling fragmented ophiolite, central Tibet[J]. *The Journal of Geology*, 126: 639 – 654.
- Yamamoto K, 1987. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes[J]. *Sedimentary Geology*, 52 (1): 65 – 108.
- Yan Z, Li J L, Yong Y, et al., 2008. Tectonic environment of Ordovician carbonate-cherts in the Shihuigou area, North Qilian orogeny[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (10): 2384 – 2394 (in Chinese with English abstract).
- Zeng X W, Wang M, Fan J J, et al., 2018. Petrology and geochronology of Asuo ophiolite in central Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 37 (8): 1492 – 1502 (in Chinese with English abstract).
- Zeng X W, Wang M, Fan J J, et al., 2018b. Geochemistry and geochronology of gabbros from the Asa Ophiolite, Tibet: Implications for the early Cretaceous evolution of the Meso-Tethys Ocean[J]. *Lithos*, 320–321: 192 – 206.
- Zeng X W, Wang M, Li C, et al., 2021. Lower Cretaceous turbidites in the Shiquanhe-Namco Ophiolite Mélange Zone, Asa area, Tibet: Constraints on the evolution of the Meso-Tethys Ocean[J]. *Geoscience Frontiers*, 12: 101127.
- Zeng Y C, Xu J F, Chen J L, et al., 2018a. Geochronological and geochemical constraints on the origin of the Yunzhug ophiolite in the Shiquanhe-Yunzhug-Namu Tso ophiolite belt, Lhasa Terrane,

- Tibetan Plateau[J]. *Lithos*, 300-301: 250-260.
- Zhai Q G, Jahn B M, Wang J, et al., 2016. Oldest Paleo-Tethyan ophiolitic mélange in the Tibetan Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 128 (3-4): 355-373.
- Zhang C, Huang H, Hou M C, 2017. Problems in the geochemical study on chest genesis for interpretation of tectonic background[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 44 (3): 293-304 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J, Deng J F, Xiao Q H, et al., 2012. New advances in the study of ophiolites[J]. *Geological Bulletin of China*, 31 (1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K J, Xia B, Zhang Y X, et al., 2014. Central Tibetan Mesozoic Tethyan oceanic plateau[J]. *Lithos*, 210-211: 278-288.
- Zhang W, Liu C, Liu T, et al., 2020. Subduction initiation triggered by accretion of a Jurassic oceanic plateau along the Bangong-Nujiang Suture in central Tibet[J]. *Terra Nova*, 33: 150-158.
- Zheng Y Y, Xu R K, Ma G T, et al., 2006. Ages of generation and subduction of Shiquanhe river ophiolite: Restriction from SHRIMP zircon dating[J]. *Acta petrologica Sinica*, 22 (4): 895-904 (in Chinese with English abstract) (in Chinese with English abstract).
- Zhu D, Li S, Cawood P A, et al., 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction[J]. *Lithos*, 245: 7-17.
- ### 附中文参考文献
- 曹圣华, 罗小川, 唐峰林, 等, 2004. 班公湖-怒江结合带南侧弧-盆地时空结构与演化特征[J]. *中国地质*, 31 (1): 51-56.
- 曹圣华, 廖六根, 邓世权, 等, 2005. 西藏班公湖蛇绿岩组合层序、地球化学及其成因研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 25 (3): 101-110.
- 曹圣华, 肖晓林, 欧阳克贵, 2008. 班公湖-怒江结合带西段侏罗纪木嘎岗日群的重新厘定及意义[J]. *沉积学报*, 26 (4): 559-564.
- 陈奇, 谢琳, 肖志坚, 2007. 青藏高原西部班公湖蛇绿混杂岩带的基本特征与构造演化[J]. *东华理工学院学报*, 30 (2): 107-112.
- 陈玉禄, 张宽忠, 杨志民, 等, 2006. 青藏高原班公湖-怒江结合带中段那曲县觉翁地区发现完整的蛇绿岩剖面[J]. *地质通报*, 25 (6): 694-699.
- 丁林, 钟大赟, 1995. 滇西昌宁-孟连带古特提斯洋硅质岩稀土元素和铷异常特征[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 25: 93-100.
- 杜远生, 1995. 秦岭造山带泥盆纪古海洋研究[J]. *地球科学*, 20 (6): 617-623.
- 杜远生, 朱杰, 顾松竹, 等, 2007. 北祁连造山带寒武系-奥陶系硅质岩沉积地球化学特征及其对多岛洋的启示[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 37 (10): 1314-1329.
- 冯彩霞, 刘家军, 2001. 硅质岩的研究现状及其成矿意义[J]. *世界地质*, 20 (2): 119-123.
- 冯彩霞, 2011. 班公湖-怒江缝合带西段改则硅质岩地球化学特征及沉积环境[J]. *矿床地质*, 30 (5): 773-786.
- 冯晔, 廖六根, 徐平, 2006. 西藏班公湖蛇绿岩地质特征及形成时代[J]. *资源调查与环境*, 26 (3): 185-192.
- 冯益民, 张越, 2018. 大洋板块地层 (OPS) 简介及评述[J]. *地质通报*, 37 (4): 523-531.
- 黄虎, 杜远生, 杨江海, 等, 2012. 水城-紫云-南丹裂陷盆地晚古生代硅质沉积物地球化学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 86 (12): 1994-2010.
- 黄虎, 杜远生, 黄志强, 等, 2013. 桂西晚古生代硅质岩地球化学特征及其对右江盆地构造演化的启示等[J]. *中国科学: 地球科学*, 43: 304-316.
- 黎彤, 1987. 地壳元素丰度的若干统计特征[J]. *地质与勘探*, 28 (10): 1-7.
- 刘庆宏, 肖志坚, 曹圣华, 等, 2004. 班公湖-怒江结合带西段多岛弧盆地时空结构初步分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 24 (3): 15-21.
- 刘中戎, 张佳伟, 2017. 西藏羌塘盆地中生代晚期构造事件与油气关系的关系[J]. *沉积与特提斯地质*, 37 (2): 23-29.
- 马安林, 胡修棉, 2021. 沉积记录约束班公湖-怒江缝合带东巧蛇绿岩的仰冲过程[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (2): 163-175.
- 潘桂棠, 王立全, 耿全如, 等, 2020. 班公湖-双湖-怒江-昌宁-孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (3): 1-19.
- 任强, 2019. 西藏永珠蛇绿构造混杂岩与成矿[D]. 长春: 吉林大学.
- 孙东立, 徐均涛, 王玉净, 等, 1991. 西藏日土地区二叠纪、侏罗纪、白垩纪地层及古生物[M]. 南京: 南京大学出版社: 1-210.
- 唐峰林, 黄建村, 罗小川, 等, 2004. 藏北阿索构造混杂岩的发现及其地质意义[J]. *东华理工大学学报: 自然科学版*, 27 (3): 245-250.
- 王艳凯, 刘二情, 毕志伟, 等, 2021. 西藏狮泉河地区与蛇绿岩伴生的硅质岩地球化学特征及形成环境分析[J]. *河北地质大学学报*, 44 (5): 16-22.
- 王玉净, 王建平, 刘彦明, 等, 2002. 西藏丁青蛇绿岩特征、时代及其地质意义[J]. *微体古生物学报*, 19 (4): 417-420.
- 徐梦婧, 李才, 吴彦旺, 等, 2014. 西藏果芒错蛇绿混杂岩中硅质岩的地球化学特征及其形成环境[J]. *地质通报*, 33 (7): 1061-1066.
- 徐梦婧, 赵佩云, 兰锐, 等, 2020. 狮泉河-永珠-嘉黎构造带中西段硅质岩地球化学特征及其沉积环境[J]. *地学前缘*, 27 (3): 182-190.
- 闫臻, 李继亮, 雍拥, 等, 2008. 北祁连石灰沟奥陶纪碳酸盐岩—硅质岩形成的构造环境[J]. *岩石学报*, 24 (10): 2384-2394.
- 曾孝文, 王明, 范建军, 等, 2018. 青藏高原中部阿索蛇绿岩岩石学同位素年龄[J]. *地质通报*, 37 (8): 1492-1502.
- 张聪, 黄虎, 侯明才, 2017. 地球化学方法在硅质岩成因与构造背景研究中的进展及问题[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 44 (3): 293-304.
- 张进, 邓晋福, 肖庆辉, 等, 2012. 蛇绿岩研究的最新进展[J]. *地质通报*, 31 (1): 1-12.
- 郑有业, 许荣科, 马国桃, 等, 2006. 锆石 SHRIMP 测年对狮泉河蛇绿岩形成和俯冲时间的约束[J]. *岩石学报*, 22 (4): 895-904.