

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2017-12-19

湘赣中、上奥陶统烟溪组、对耳石组硅质岩成因

郑 宁¹, 李廷栋¹, 程木伟²

1. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037

2. 中国石油勘探开发研究院 亚太研究所, 北京 100083

ZHENG Ning¹, LI Tingdong¹, CHENG Muwei²

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Asia-Pacific Department, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

ZHENG Ning, LI Tingdong, CHENG Muwei. Origin of siliceous rocks in the Middle – Upper Ordovician Yanxi Formation, Hunan Province and Dui’ershi Formation, Jiangxi Province in South China. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 086-098

Abstract: High siliceous rocks are extensively developed in the neritic-bathyal environment of South China during the Middle – Upper Ordovician. These rocks are mainly distributed throughout the Yanxi and Dui’ershi Formations in Hunan and Jiangxi provinces, respectively, generally between the Yangtze and Cathaysian Plates in the EW strip. The stratum thickness gradually decreases from SE to NW, and the layers are mostly thin. Radiolarian *Protoentactinia* sp. is found in the rocks, sometimes more than 50% in sample content. Analysis results showed that biological and terrigenous Si is the main silicon source—a clear indication of rocks’ biochemical origin. It was found that the $Al/(Al + Fe + Mn)$ ratio is greater than 0.45, and K_2O/Na_2O ratio ranges between 1.55 and 42.11. The Al_2O_3 -Ni, V, B, Cr diagram showed both discrete and linear relationships and a U/Th ratio of 0.72. Lastly, our study revealed that REE contents in central Hunan and Jiangxi provinces are relatively high, while element Ce in chert in the southeast area showed slightly negative anomaly. In the research area, $\Sigma LREE \approx \Sigma HREE$, this suggests that the areas from Hengyang to Ganzhou are affected by volcanic and hydrothermal activities.

Key words: Hunan and Jiangxi provinces; Ordovician; Radiolarian; siliceous rock; geochemistry

摘 要: 华南地区中—上奥陶统浅海—半深海环境中广泛发育了一套高硅岩石, 主要分布于湖南烟溪组和江西对耳石组。该套硅质岩呈东西条带状发育于扬子板块与华夏板块之间, 地层厚度从东南到西北逐渐减薄, 岩层多呈薄层状, 含放射虫 *Protoentactinia* sp., 部分岩样放射虫含量超过 50%。分析结果表明, 生物 Si 和陆源 Si 为本区硅质岩 Si 的重要来源, 生物化学成因特征明显。硅质岩 $Al/(Al + Fe + Mn)$ 比值 > 0.45 , K_2O/Na_2O 比值范围为 1.55~42.11, 由微量元素 Ni、V、B、Cr 与 Al_2O_3 关系图来看, 二者关系表现为部分线性、部分离散, U/Th 比值为 0.72。湘赣中部地区硅质岩中稀土元素含量偏高, 东南部 Ce 元素略呈负异常, 研究区 $\Sigma LREE \approx \Sigma HREE$, 表明衡阳到赣州一带受一定火山、热水活动的影响。

关键词: 湘赣; 奥陶系; 放射虫; 硅质岩; 地球化学

中图分类号: P588.244; P581 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2018)04-0086-13

在华夏板块与扬子板块之间的中—上奥陶统广泛发育了一套高硅含量的岩石, 最具代表性的地层包括发育较纯硅质岩的湖南中南部中—上奥陶统烟溪组和发育碳硅质岩的赣南中—上奥陶统对耳石组。关于这套硅质岩的成因一直存在争议。硅质岩是指自生 SiO_2 含量达到 80% 的沉积岩, 并不包括由碎屑石英英组成的高硅含量岩石^[1-2]。烟溪组和对耳石组硅质岩中 SiO_2 含量普遍高于 80%。硅质岩

收稿日期: 2017-09-11; 修回日期: 2017-10-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41402100); 中国地质调查局全国地质构造区划与区域地质调查综合集成项目及子项目(DD20160345, 1212011120117, 121201102000150012-32); 中国地质调查局中东亚跨境成矿带对比与综合编图项目(DD20160102)

作者简介: 郑 宁(1983—), 女, 助理研究员, 沉积学专业。E-mail: zhengninglaio@163.com

主要由隐晶或微晶质自生 SiO_2 矿物(石英、蛋白石、玉髓等)组成,含少量黏土矿物、重晶石、赤铁矿,岩石致密坚硬,受成岩作用和风化作用影响较小,地球化学成分变化不大,因此地球化学分析是对硅质岩成因研究的重要手段^[3]。此外,对硅质岩进行地层学、沉积学和古生物学特征的传统分析手段也非常重要。硅质岩的成因主要涉及 SiO_2 来源、形成方式、沉积古水深等方面的讨论,其中 SiO_2 的来源主要包括生物、陆源、火山热水,形成方式包括原生沉淀作用和成岩或后生阶段交代两种方式。硅质岩的成因可以是单因素控制,也可以是多因素共同影响。华南中—上奥陶统硅质岩过去仅在华南上奥陶统五峰组中发现过放射虫^[4],因此一直存在热水成因^[5]与生物成因^[6]的争议。根据近年的研究,烟溪组和对耳石组中普遍存在造硅生物放射虫^[6-7],有必要对这套地层中硅质岩的成因做进一步探讨。

1 构造—沉积背景

湘赣地区位于欧亚大陆东南端华南岩石圈块体内^[8],本文研究对象为扬子板块与华夏板块之间的

中、上奥陶统(图 1a、b)。一般认为,经过晋宁运动(850~800 Ma),华夏板块与扬子板块在江山以东开始闭合,形成江绍缝合带及浙西前陆盆地。缝合带混杂岩带由绿片岩、杂砂岩、基性—超基性岩块构成。江山以西并未缝合,华南海盆变为规模不大的残留盆地,研究区即位于此残留盆地范围内,晋宁晚期沉积了巨厚浊积岩层的深海—半深海盆地,震旦纪仍为深海沉积环境。华夏板块与扬子板块的碰撞是近南北向斜撞,江绍缝合带除了发生南北向地壳消减外,还存在左行平移,尤其在陆壳俯冲的阻力加大后,斜向俯冲就逐渐转变为左行走滑运动,转换拉张带即为其板块的边界^[9]。加里东期震旦纪开始,江绍缝合带转为走滑断层,由于走滑运动使扬子板块向西、华夏板块向东滑动,使华南残留盆地重新扩展,盆域依然巨大。到中奥陶世晚期,残留盆地开始收缩^[10],研究区东部浙闽沿海地区隆升,西南部仍为海域。根据前人对华南早古生代岩石组合、沉积序列及沉积构造的研究认为,火山和岩浆活动不明显,缺乏存在洋壳的证据,研究区属于被动大陆边缘环境^[11-14],中、晚奥陶世以滞流、非补偿的浅海—半深海环境为主^[14-15],华夏板块为海盆沉积物的主要

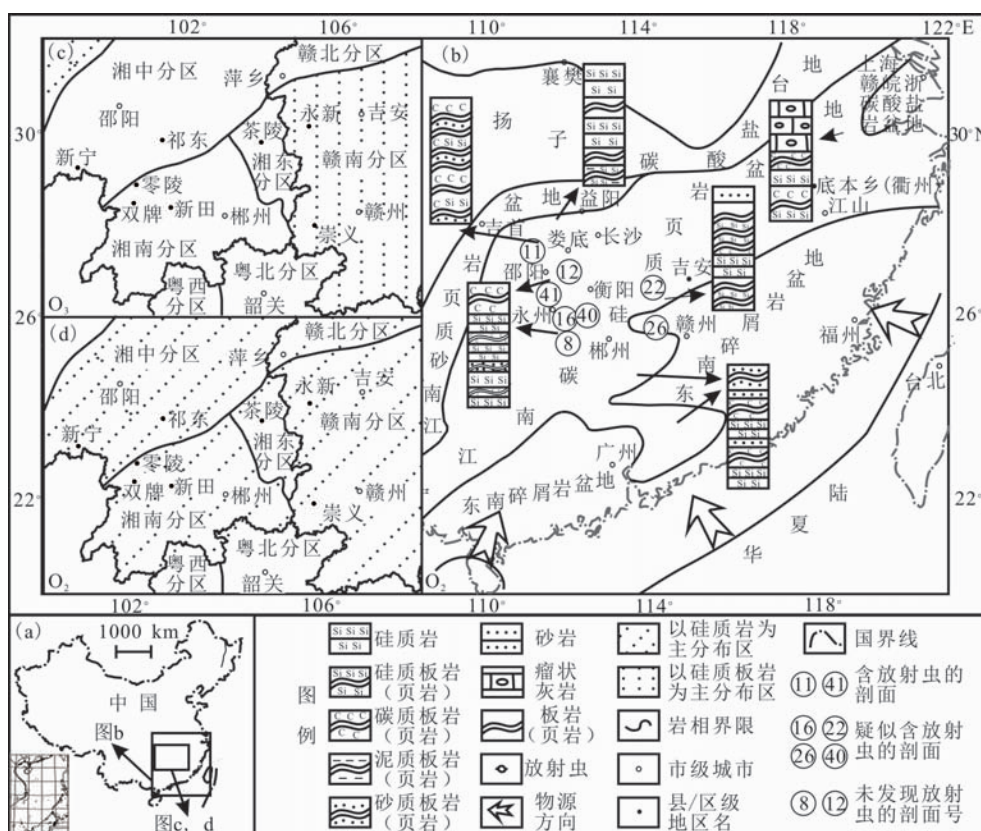


图 1 华南中、上奥陶统高硅含量岩石分布图

Fig.1 Distribution of the high siliceous rocks of the Middle – Upper Ordovician in South China

物源供给区^[12-13,16-17],扬子板块南缘为碳酸盐岩沉积区。志留纪末到泥盆纪初期,经过加里东运动形成华南造山带^[11-12,18-20]。

2 地层发育特征及硅质岩成因分析

研究区中、上奥陶统烟溪组和对耳石组,分别属于华南地层区的湘中、湘南地层分区和赣南地层分区,这套地层研究历史很长。湘北地层分区以化石丰富的大湾组、牯牛潭组碳酸盐岩为主,向南动物群由华北类型逐渐过渡为东南类型,地层也渐变为以碳质硅板岩、硅质岩为主的湘中烟溪组,很难划出明确边界线。从赣北到赣中地区,这套地层由含化石的碳酸盐岩变化为以泥质岩为主夹碳酸盐岩,赣中奥陶纪地层露头非常少。由湘中到湘南(均为烟溪组地层分布区)、向东到赣西南(即为对耳石组地层分布区范围),硅质岩中硅质含量逐渐减少(图 1b),泥质、砂质含量增多,逐渐过渡为以砂泥质沉积为主。从地层时代来看,从中奥陶统到上奥陶统,硅质含量减少。研究区内高硅含量的岩石均表现为薄层状硅质板岩、硅质岩(图 2~4),前人研究认为,高温热水成因到远离热水低温成因的岩性变化为:碧玉岩-纹理状硅岩-块状泥质硅岩-硅页岩^[21],原生沉淀作用多形成页岩、薄层硅质岩,交代作用多形成厚层块状、结核状硅质岩,可见本区硅质岩成因主要为非热水原生沉淀作用。

笔者在湘中、赣中地区发现大量聚硅生物放射虫,也证明硅质岩的发育应存在生物因素。在湖南娄底 No.11、永州 No.16、衡阳 No.40 和 No.41 地层剖面的烟溪组中,以及江西吉安 No.22 和崇义 No.26 地层剖面的对耳石组中(图 5),均发现疑似放射虫的生物化石,在 No.11 和 No.41 剖面中泡制出放射虫 *Protoentactinia* sp.(中国科学院南京地质古生物研究所王玉净研究员鉴定)。地化数据显示,这些发育放射虫的硅质岩中 SiO₂ 含量普遍超过 80%,显微镜下部分岩样放射虫含量超过 50%(图 5),达到了放射虫岩的标准。

在安化、桃江、益阳地区烟溪组中下部,为薄层黑色板岩与泥质硅质岩互层(图 1);向南到湘中娄底—永州一带,硅质岩中泥质含量减少,硅质含量较高,地球化学主量元素分析结果表明 SiO₂ 含量可达 90%以上;再向东南到祁东、新宁、茶陵、零陵、新田、双牌等地区(图 1c、d),硅质岩中泥质含量又有增加,且出现砂质板岩夹层。烟溪组顶部在偏北部地区表现为薄层硅质岩,向南为黑色纹层状含碳质板岩。对耳石组分布于吉安永新—赣州崇义一带,岩性比较稳定,以泥质、碳质、硅质板岩互层为主(图 2~4),在中部和上部出现两次含硅高峰。从研究区总体来看,湘中烟溪组更靠近北部扬子板块碳酸盐岩发育的环境,海水清洁,更有利于放射虫等聚硅生物的发育,因而该区发育的硅质岩中 Si 含量较高。而湘南烟溪组和向东的赣西南对耳石组更靠近

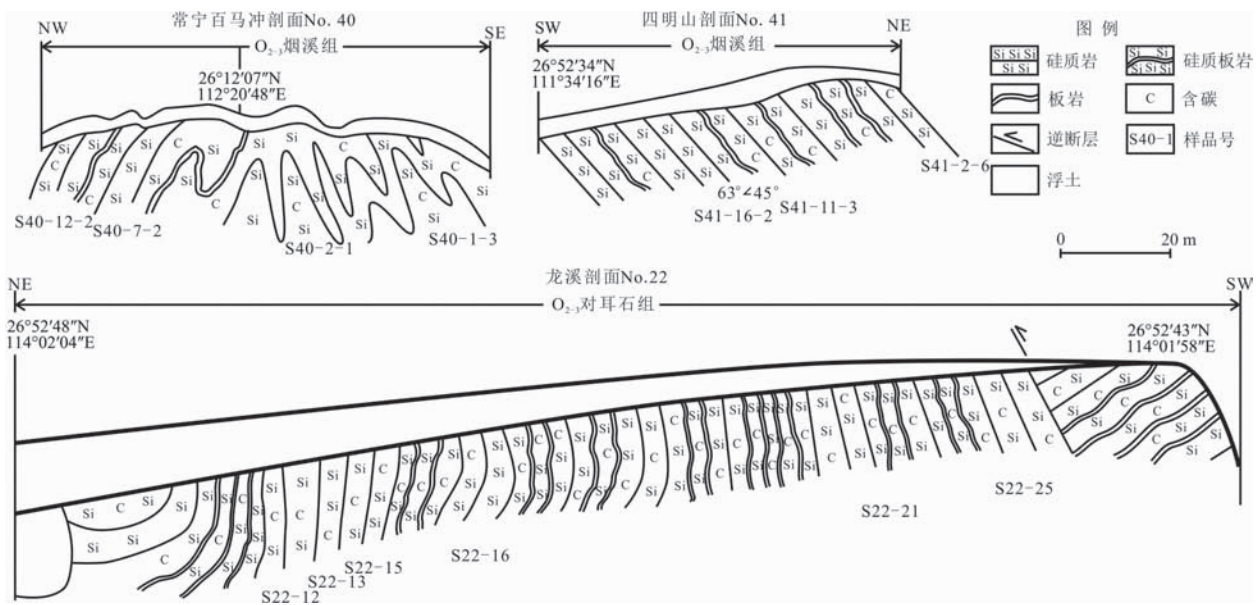


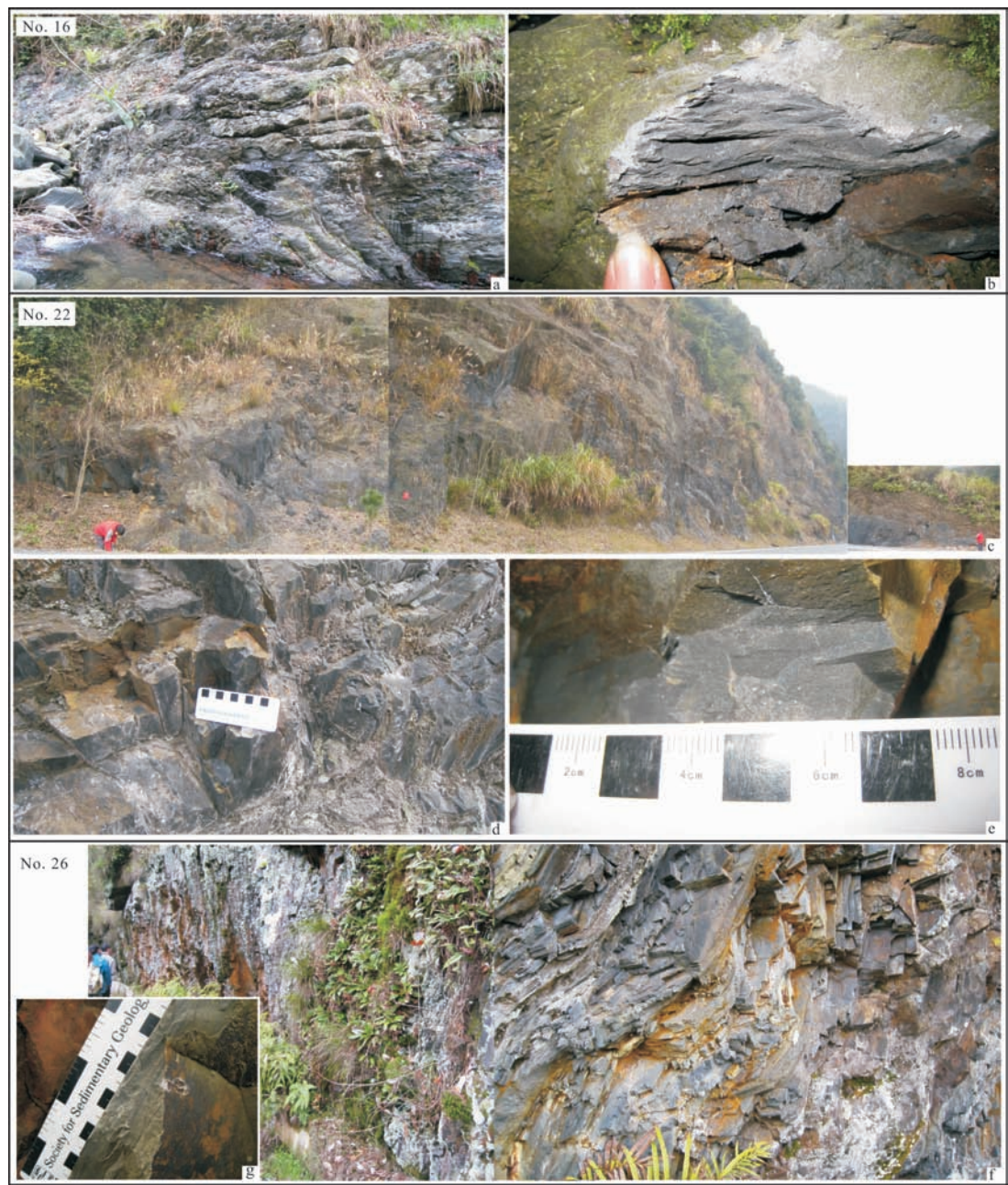
图 2 湖南衡阳烟溪组和江西崇义对耳石组地层剖面图
Fig.2 Sections of Yanxi Formation in Hengyang, Hunan Province and Duiershishi Formation in Chongyi, Jiangxi Province



a—湖南省娄底市烟溪组层型剖面(No.11)薄层碳硅质板岩、硅质岩互层;b—湖南省娄底市烟溪组层型剖面(No.11)中碳质含量较高的硅质岩;c—e—湖南省衡阳市四明山剖面(No.41)碳硅质板岩、硅质岩互层,薄层为主,可见15 cm左右中厚层;f、g—湖南省衡阳市百马冲剖面(No.40)薄层碳硅质板岩、硅质岩互层,发育褶皱变形;h—湖南省衡阳市百马冲剖面(No.40)中发育的灰黑色硅质岩;i—湖南省衡阳市百马冲剖面(No.40)中灰黑色硅质板岩。

图3 湖南烟溪组剖面岩层照片(No.11、No.41和No.40)

Fig.3 Photos of the sections of Yanxi Formation in Hunan Province (No.11, No.41 and No.40)



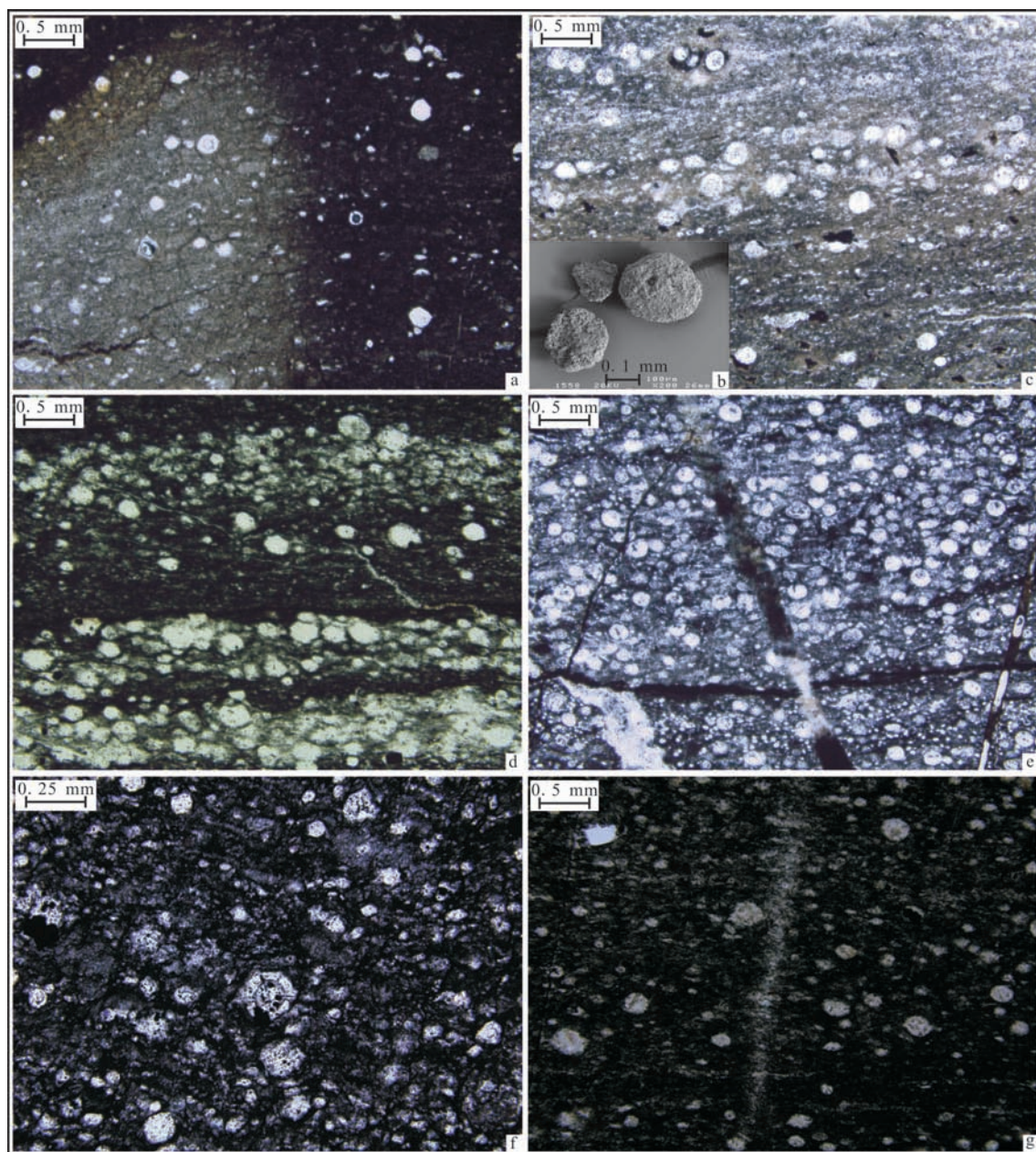
a—湖南省永州市大明江剖面(No.16)烟溪组中—薄层碳硅质板岩与薄层硅质岩互层特征;b—湖南省永州市大明江剖面(No.16)烟溪组地层,上半部分为硅质板岩,下半部分为硅质岩;c,d—江西省吉安市韩江—石口剖面(No.22)对耳石组薄层碳硅质板岩、硅质岩互层;e—江西省吉安市韩江—石口剖面(No.22)对耳石组灰黑色含放射虫硅质岩;f—江西省吉安市对耳石组层型剖面(No.26)薄层碳硅质板岩、硅质岩互层特征;g—江西省吉安市对耳石组层型剖面(No.26)中发育的灰黑色硅质板岩。

图 4 湖南烟溪组和江西对耳石组剖面岩层照片(No.16、No.22 和 No.26)

Fig.4 Photos of the sections of Yanxi Formation in Hunan Province and Duiershi Formation in Jiangxi Province (No.16,No.22 and No.26)

华夏板块碎屑岩发育区,因而硅质岩中泥质、砂质含量偏高。从地层厚度变化来看,该套地层存在由北西向南东逐渐增厚的趋势^[6],在北部安化、桃江、益阳一带,厚度为 7~63 m,在中部和南部地区增厚至 108~160 m,向东对耳石组变得更厚,达 250~450 m,且对耳石组自北向南存在增厚的趋势,可见研究区西北部硅质岩厚度明显薄于东南部,这可能与本区

南部靠近华夏板块碎屑岩供给区有关。陆源碎屑物大量供给硅铝酸盐,不仅给聚硅生物提供了充足的 SiO₂,而且陆地母岩区硅铝酸盐化学分解产生的大量游离 SiO₂ 直接进入海水中,提高了海水中 SiO₂ 的含量,有利于硅质岩的形成。此外,大陆边缘较快的沉积速率、相对较浅的水深及黏土矿物的沉淀可降低生物硅的溶解速率,有利于放射虫硅质壳的保



a—No.11; b,c—No.41; d—No.16; e—No.40; f—No.22; g—No.26。

图5 湖南烟溪组、江西对耳石组放射虫 *Protoentactinia* sp.显微镜镜下照片Fig. 5 Photos of the Radiolaria *Protoentactinia* sp. of Yanxi Formation in Hunan Province and Dui'ershi Formation in Jiangxi Province

存^[22],因而研究区东南部地区硅质岩厚度增大,可见生物 Si 和陆源 Si 均为本区硅质岩中 Si 的重要来源。

3 地球化学测试与硅质岩成因分析

3.1 测试方法

首先,对研究区采集的样品进行切割,去除表面风化层,破碎样品后选取无次生岩脉且新鲜的样块低温烘干并研磨至 200 目备用。试验由河北省区域

地质矿产调查研究所实验室完成。测试方法如下:

(1) 主量元素。SiO₂ 使用电子分析天平检测, CaO 及 FeO 使用 50 mL 滴定管方法检测, Al₂O₃、Fe₂O₃、TiO₂ 及 P₂O₅ 采用分光光度计检测, Na₂O 及 K₂O 采用火焰光度计测试完成, MnO 采用 WFX-110B 原子吸收分光光度计检测。(2) 微量元素、稀土元素。采用 X Serise 等离子体质谱仪, B 元素利用 WP-1 光栅色谱仪完成。本文稀土元素标准化均采用北美页岩的测试标准^[23], 其中 Ce 异常表达式为 $Ce/Ce^* = 2 \times C_{Ce} / (La_N + Pr_N)$ 。分析结果见表 1~5^[21,24-34]。

3.2 主量元素分析

由于岩石中 Al 元素的富集与陆源物质的供给有关,Fe 和 Mn 元素的富集与热水的参与有关^[28-29,35],因此,硅质岩主量元素含量可用于判断硅的来源。根据 Adachi 等^[29]的研究,以衡量沉积物中热水成分含量的 Al/(Al+Fe+Mn)比值图为底进行投图,发现本区 75%的点落于生物成因硅质岩范围内,25%的样品点接近生物成因区,全部不在热水沉积成因硅质岩范围及该范围邻区处(图 6)。从 Adachi 等的 Al/(Al+Fe+Mn)比值图中热水参与标志——Fe 元素在样品中成分比重结果可见,靠近西北部的 No.41、No.40、No.11、No.8 剖面比靠近东南部的 No.22 和 No.26 剖面 Fe 含量低,西北部剖面的硅质岩较东南部地区受热水活动影响更小。根据 Yamamoto^[28]的研究,Al/(Al+Fe+Mn)比值可以用来判断硅质岩成因:纯热水成因比值小于 0.01;当比值逐渐增大表示受非热水因素成因影响增大,当

比值达到 0.4 以上表示主要受控于陆源物质影响;当比值增大至 0.6 以上时可认为该硅质岩为远海生物成因。研究区各样品 Al/(Al+Fe+Mn)比值均大于 0.45(表 1),表明均为非热水成因硅质岩。从各剖面平均值来看,西北部的 4 个剖面其比值为 0.82(No.41)、0.72(No.11)、0.68(No.40)、0.65(No.8),均大于 0.6,可判断为远海生物成因。而位于偏东南部的剖面其比值为 0.58(No.22)、0.57(No.26),也非常接近 0.6(表 1),但比值普遍小于西北区剖面,结合表 5 可见湖南地区从北部娄底新化到南部永州,江西从北部吉安永新到南部赣州崇义,均呈现 Al 含量增高,说明东南部比西北部更靠近陆源碎屑物质供给区,即华夏板块更可能为华南海盆沉积物质的供给区。表 5 可见 Fe、Mn 含量在衡阳常宁到赣州崇义一带达到高值,东部赣州崇义达到最高,含量接近苏联麦维母河火山成因的硅质岩,说明这一带硅质岩成因受火山影响更强烈。

表 1 湖南烟溪组、江西对耳石组硅质岩主量元素分析结果
Table 1 Major element of the siliceous rocks of Yanxi Formation in Hunan Province and
Dui'ershi Formation in Jiangxi Province

| 样品号 | w _B /% | | | | | | | | | | | Al/(Al+Fe+Mn) | K ₂ O/Na ₂ O |
|---------|-------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|------------------|-------------------|------|-------------------------------|---------------|------------------------------------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | FeO | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | MnO | P ₂ O ₅ | | |
| 11-34-2 | 91.17 | 5.14 | 0.22 | 1.22 | 0.17 | 0.05 | 0.32 | 1.62 | 0.08 | 0.00 | 0.02 | 0.73 | 21.21 |
| 11-35-5 | 91.77 | 4.89 | 0.24 | 0.87 | 0.20 | 0.05 | 0.32 | 1.57 | 0.08 | 0.00 | 0.01 | 0.77 | 19.24 |
| 11-38-2 | 95.40 | 2.58 | 0.12 | 0.54 | 0.17 | 0.07 | 0.16 | 0.80 | 0.14 | 0.01 | 0.01 | 0.73 | 5.83 |
| 41-2-6 | 86.48 | 8.74 | 0.35 | 0.97 | 0.42 | 0.05 | 0.57 | 2.28 | 0.10 | 0.00 | 0.04 | 0.82 | 23.17 |
| 41-11-3 | 89.84 | 6.50 | 0.25 | 0.25 | 0.27 | 0.10 | 0.60 | 2.09 | 0.08 | 0.00 | 0.01 | 0.9 | 26.65 |
| 41-16-2 | 91.97 | 5.01 | 0.20 | 0.48 | 0.24 | 0.06 | 0.39 | 1.54 | 0.07 | 0.00 | 0.02 | 0.83 | 22.89 |
| 40-1-3 | 80.44 | 11.78 | 0.57 | 1.95 | 0.58 | 0.06 | 1.34 | 3.12 | 0.13 | 0.02 | 0.02 | 0.77 | 24.51 |
| 40-2-1 | 80.12 | 11.49 | 0.66 | 1.39 | 0.67 | 0.07 | 1.15 | 4.28 | 0.12 | 0.01 | 0.03 | 0.8 | 34.61 |
| 40-7-2 | 93.31 | 3.52 | 0.17 | 0.20 | 0.78 | 0.78 | 0.63 | 0.39 | 0.18 | 0.02 | 0.02 | 0.71 | 2.17 |
| 40-12-2 | 85.36 | 8.35 | 0.43 | 1.02 | 1.06 | 0.19 | 1.39 | 1.82 | 0.32 | 0.03 | 0.02 | 0.74 | 5.72 |
| 8-2a | 96.99 | 1.48 | 0.02 | 0.48 | 0.20 | 0.24 | 0.15 | 0.40 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.61 | 17.99 |
| 8-2b | 96.18 | 2.16 | 0.04 | 0.10 | 0.45 | 0.27 | 0.20 | 0.54 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.73 | 28.45 |
| 8-2c | 96.02 | 2.18 | 0.04 | 0.36 | 0.29 | 0.39 | 0.18 | 0.48 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.71 | 25.40 |
| 22-12 | 87.75 | 6.24 | 0.27 | 3.29 | 0.33 | 0.07 | 0.33 | 1.64 | 0.05 | 0.01 | 0.02 | 0.56 | 29.90 |
| 22-13 | 87.33 | 6.53 | 0.32 | 1.78 | 0.72 | 0.56 | 1.05 | 1.58 | 0.06 | 0.03 | 0.04 | 0.65 | 26.82 |
| 22-15 | 91.79 | 3.85 | 0.17 | 1.34 | 0.25 | 0.76 | 0.62 | 1.10 | 0.07 | 0.03 | 0.02 | 0.64 | 15.72 |
| 22-16 | 90.96 | 3.27 | 0.14 | 1.84 | 0.47 | 1.43 | 0.93 | 0.81 | 0.06 | 0.05 | 0.02 | 0.51 | 14.55 |
| 22-21 | 83.74 | 8.85 | 0.40 | 1.86 | 1.47 | 0.07 | 1.34 | 2.14 | 0.07 | 0.02 | 0.04 | 0.66 | 29.50 |
| 22-25 | 83.58 | 9.67 | 0.50 | 2.66 | 0.27 | 0.08 | 0.59 | 2.51 | 0.08 | 0.02 | 0.03 | 0.71 | 32.75 |
| 26-5 | 75.84 | 12.49 | 0.64 | 2.14 | 4.14 | 0.10 | 2.10 | 2.36 | 0.06 | 0.05 | 0.08 | 0.58 | 42.11 |
| 26-10 | 95.12 | 2.34 | 0.27 | 0.40 | 0.70 | 0.14 | 0.35 | 0.57 | 0.03 | 0.00 | 0.07 | 0.6 | 21.46 |

注:表中主量元素数据为扣除烧失量后换算成 100%后的值。

表 2 湖南烟溪组硅质岩微量元素分析结果
Table 2 Trace earth element compositions of the siliceous rocks of Yanxi Formation in Hunan Province

| 样品号 | $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | U/Th | |
|---------|---------------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|----------|-------|--------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|--|
| | Mn | B | V | Cr | Ni | Cu | Pb | Zn | Sr | Li | Ba | Ga | Rb | Mo | W | Be | Sc | Nb | Cs | Ta | U | Th | | |
| 11-34-2 | 15.49 | 27.24 | 139.00 | 44.39 | 5.30 | 32.83 | 35.17 | 30.77 | 10.81 | 3.97 | 260.00 | 7.65 | 75.99 | 5.62 | 0.41 | 1.07 | 5.71 | 6.55 | 2.73 | 0.45 | 3.95 | 5.91 | 0.67 | |
| 11-35-6 | 7.74 | 21.03 | 69.71 | 26.70 | 3.51 | 24.47 | 14.24 | 16.66 | 6.01 | 4.63 | 154.30 | 4.49 | 44.63 | 3.32 | 0.23 | 0.62 | 3.95 | 3.46 | 1.44 | 0.24 | 2.05 | 2.72 | 0.75 | |
| 11-38-2 | 38.72 | 18.69 | 63.35 | 27.31 | 3.24 | 16.53 | 19.66 | 18.21 | 6.48 | 4.22 | 181.10 | 3.86 | 37.10 | 1.84 | 0.22 | 0.61 | 2.72 | 3.29 | 1.50 | 0.22 | 1.09 | 2.49 | 0.44 | |
| 41-2-6 | 30.98 | 57.39 | 218.10 | 59.94 | 18.04 | 37.73 | 138.20 | 36.93 | 39.54 | 106.80 | 341.50 | 12.10 | 109.30 | 5.66 | 0.41 | 2.28 | 7.86 | 8.83 | 9.12 | 0.59 | 15.04 | 9.73 | 1.55 | |
| 41-11-3 | 23.23 | 47.90 | 114.60 | 44.79 | 5.43 | 10.36 | 17.15 | 19.84 | 17.88 | 13.81 | 307.10 | 10.41 | 96.80 | 0.90 | 0.52 | 1.51 | 7.87 | 8.25 | 5.03 | 0.53 | 4.96 | 7.13 | 0.70 | |
| 41-16-2 | 30.98 | 33.08 | 197.90 | 39.89 | 6.33 | 20.10 | 23.26 | 18.47 | 23.96 | 7.42 | 221.20 | 8.44 | 75.64 | 4.41 | 0.38 | 1.30 | 6.16 | 6.82 | 5.13 | 0.46 | 4.71 | 4.51 | 1.04 | |
| 40-1-3 | 131.66 | 67.44 | 134.60 | 86.10 | 39.18 | 50.48 | 12.54 | 71.52 | 8.38 | 57.11 | 1 003.00 | 18.05 | 132.00 | 3.64 | 1.60 | 4.90 | 13.83 | 13.73 | 7.50 | 0.97 | 2.55 | 11.76 | 0.22 | |
| 40-2-1 | 69.70 | 98.45 | 134.00 | 84.62 | 11.84 | 40.22 | 39.69 | 48.91 | 42.47 | 27.31 | 846.40 | 20.39 | 189.40 | 5.51 | 1.92 | 1.84 | 14.85 | 14.41 | 6.44 | 1.03 | 2.78 | 12.93 | 0.22 | |
| 40-7-2 | 116.17 | 5.93 | 59.67 | 34.43 | 28.89 | 30.77 | 18.81 | 129.30 | 60.28 | 10.19 | 94.49 | 5.24 | 26.02 | 2.07 | 0.33 | 1.00 | 3.76 | 4.93 | 1.92 | 0.32 | 2.16 | 1.87 | 1.15 | |
| 40-12-2 | 209.10 | 54.27 | 94.60 | 61.39 | 17.75 | 44.86 | 22.19 | 57.80 | 24.65 | 22.20 | 280.90 | 12.69 | 93.33 | 3.03 | 0.45 | 1.30 | 9.19 | 8.13 | 4.86 | 0.52 | 2.33 | 9.00 | 0.26 | |
| 8-2a | 5.88 | 13.37 | 18.76 | 14.67 | 1.84 | 15.56 | 5.64 | 9.46 | 14.22 | 17.34 | 56.74 | 2.11 | 17.06 | 0.89 | 0.23 | 0.40 | 4.44 | 1.67 | 0.88 | 0.11 | 0.77 | 1.87 | 0.41 | |
| 8-2b | 12.22 | 17.81 | 25.90 | 18.18 | 7.36 | 31.29 | 12.09 | 13.34 | 18.46 | 10.74 | 82.43 | 2.96 | 25.46 | 1.03 | 0.27 | 0.67 | 4.96 | 2.60 | 1.35 | 0.16 | 1.88 | 2.71 | 0.69 | |
| 8-2c | 8.20 | 9.25 | 27.89 | 18.17 | 2.52 | 20.82 | 6.24 | 10.88 | 20.73 | 14.55 | 81.12 | 3.08 | 24.90 | 1.04 | 0.30 | 0.43 | 4.82 | 2.33 | 1.22 | 0.16 | 0.98 | 2.69 | 0.36 | |

表 3 湖南烟溪组硅质岩稀土元素分析结果
Table 3 Rare earth element compositions of the siliceous rocks of Yanxi Formation in Hunan Province

| 样品号 | $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | LREE/HREE | | δEu | δCe | |
|---------|---------------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|--------|-----------|-------|-------------|-------------|------|
| | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y | REE | LREE | HREE | | | | |
| 11-34-2 | 15.59 | 29.81 | 3.42 | 12.41 | 2.46 | 0.55 | 2.11 | 0.35 | 1.86 | 0.37 | 1.09 | 0.17 | 1.15 | 0.17 | 10.09 | 71.5 | 64.24 | 7.26 | 8.85 | | 1.14 | 0.97 |
| 11-35-6 | 11.16 | 21.64 | 2.6 | 9.23 | 1.94 | 0.4 | 1.58 | 0.28 | 1.5 | 0.3 | 0.86 | 0.13 | 1.04 | 0.15 | 7.72 | 52.81 | 46.97 | 5.84 | 8.04 | | 1.08 | 0.95 |
| 11-38-2 | 7.34 | 14.34 | 1.59 | 5.74 | 0.98 | 0.19 | 0.86 | 0.13 | 0.72 | 0.16 | 0.51 | 0.08 | 0.68 | 0.1 | 4.89 | 33.43 | 30.18 | 3.25 | 9.3 | | 0.95 | 0.99 |
| 41-2-6 | 35.14 | 66.45 | 8.17 | 30.66 | 5.93 | 1.18 | 5.15 | 0.84 | 4.53 | 0.95 | 2.73 | 0.43 | 2.76 | 0.4 | 26.69 | 165.31 | 147.53 | 17.78 | 8.3 | | 1.01 | 0.93 |
| 41-11-3 | 21.37 | 45.75 | 4.49 | 15.76 | 2.71 | 0.54 | 2.32 | 0.36 | 1.95 | 0.42 | 1.27 | 0.21 | 1.36 | 0.21 | 12.52 | 98.72 | 90.61 | 8.11 | 11.17 | | 1.01 | 1.1 |
| 41-16-2 | 14.06 | 26.17 | 2.99 | 10.94 | 1.94 | 0.39 | 1.73 | 0.28 | 1.56 | 0.34 | 1.08 | 0.17 | 1.28 | 0.19 | 10.59 | 63.13 | 56.5 | 6.63 | 8.52 | | 1 | 0.95 |
| 40-1-3 | 32.22 | 63.37 | 6.97 | 25 | 4.38 | 0.9 | 3.9 | 0.66 | 3.68 | 0.82 | 2.34 | 0.37 | 2.21 | 0.35 | 22.94 | 147.16 | 132.84 | 14.32 | 9.28 | | 1.02 | 1 |
| 40-2-1 | 39.31 | 65.34 | 8.31 | 29.73 | 5.16 | 1.05 | 4.29 | 0.68 | 3.6 | 0.77 | 2.27 | 0.37 | 2.23 | 0.37 | 21.81 | 163.48 | 148.9 | 14.58 | 10.21 | | 1.04 | 0.85 |
| 40-7-2 | 11.01 | 19.86 | 2.33 | 8.64 | 1.66 | 0.44 | 1.56 | 0.28 | 1.57 | 0.36 | 1.01 | 0.16 | 1.05 | 0.15 | 10.75 | 50.06 | 43.94 | 6.12 | 7.18 | | 1.28 | 0.93 |
| 40-12-2 | 25.07 | 41.65 | 5.34 | 19.14 | 3.29 | 0.63 | 2.86 | 0.44 | 2.35 | 0.51 | 1.49 | 0.24 | 1.56 | 0.25 | 14.2 | 104.81 | 95.11 | 9.7 | 9.8 | | 0.96 | 0.85 |
| 8-2a | 4.74 | 8.86 | 1.01 | 3.72 | 0.69 | 0.16 | 0.56 | 0.09 | 0.5 | 0.1 | 0.29 | 0.05 | 0.31 | 0.05 | 2.7 | 21.12 | 19.17 | 1.95 | 9.83 | | 1.18 | 0.96 |
| 8-2b | 7 | 13.1 | 1.5 | 5.6 | 1.08 | 0.23 | 0.9 | 0.15 | 0.82 | 0.16 | 0.47 | 0.07 | 0.47 | 0.07 | 3.98 | 31.62 | 28.51 | 3.11 | 9.16 | | 1.1 | 0.95 |
| 8-2c | 5.98 | 12.06 | 1.39 | 4.97 | 0.87 | 0.2 | 0.77 | 0.12 | 0.64 | 0.12 | 0.38 | 0.06 | 0.4 | 0.06 | 3.22 | 28.01 | 25.46 | 2.55 | 9.99 | | 1.16 | 0.99 |

注: NASC(北美页岩)标准化数据文献[24]。

表 4 江西对耳石组硅质岩微量元素、稀土元素分析结果

Table 4 Trace and rare earth element compositions of the siliceous rocks of Dui'ershi Formation in Jiangxi Province

| 样品号 | $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|------|------|
| | Mn | B | V | Cr | Ni | Cu | Pb | Zn | Sr | Li | Ba | Ga | Rb | Mo | W |
| 22-12 | 95.45 | 25.7 | 67.75 | 41.39 | 22.77 | 30.9 | 36.2 | 16.89 | 7.91 | 13.97 | 189.09 | 7.41 | 60.61 | 4.14 | 1.01 |
| 22-13 | 215.01 | 28.3 | 78.34 | 53.52 | 45.97 | 32.27 | 28.36 | 38.24 | 26.35 | 14.23 | 204.16 | 8.58 | 64.31 | 2.44 | 1.23 |
| 22-15 | 223.68 | 14.2 | 44.34 | 34.54 | 14.08 | 22.74 | 8.48 | 13.1 | 30.06 | 7.17 | 138.16 | 5.04 | 42.64 | 1.35 | 0.74 |
| 22-16 | 344.98 | 12.8 | 35.26 | 30.36 | 15.02 | 43.96 | 7.32 | 21.22 | 49.08 | 7.72 | 109.16 | 4.21 | 32.1 | 1.38 | 0.36 |
| 22-21 | 138.84 | 66.7 | 74.98 | 67.35 | 38.53 | 27.68 | 13.95 | 43.67 | 7.58 | 22.15 | 258.06 | 12.17 | 91.34 | 0.98 | 1.42 |
| 22-25 | 168.19 | 58.4 | 94.15 | 68.95 | 15.21 | 10.18 | 24.4 | 39.68 | 7.07 | 19.54 | 267.19 | 11.73 | 95.77 | 3.41 | 1.58 |
| 26-6 | 430.11 | 44.78 | 101.88 | 76.35 | 32.23 | 33.94 | 12.25 | 67.36 | 25.36 | 27.87 | 470.54 | 20.14 | 176.1 | 0.25 | 1.73 |
| 26-7 | 193.17 | 29.34 | 89.17 | 66.42 | 31.11 | 37.31 | 11.75 | 127.6 | 22.32 | 24.86 | 341.44 | 17.18 | 129.5 | 0.23 | 1.35 |
| 26-11 | 65.84 | 42.28 | 87.04 | 48.92 | 30.2 | 30.19 | 25.22 | 53.38 | 20.81 | 16.65 | 325.25 | 11.01 | 92.87 | 5.41 | 0.84 |

| 样品号 | $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|---------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| | Be | Sc | Nb | Cs | Ta | U | Th | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb |
| 22-12 | 1.16 | 5.23 | 4.62 | 3.3 | 0.31 | 10.24 | 5.41 | 15.94 | 31.65 | 3.41 | 12.18 | 2.22 | 0.43 | 2.01 | 0.29 |
| 22-13 | 1.26 | 6.55 | 5.9 | 3.27 | 0.4 | 8.49 | 7.29 | 19.35 | 39.03 | 4.2 | 15.5 | 2.91 | 0.56 | 2.65 | 0.39 |
| 22-15 | 0.8 | 3.24 | 2.89 | 2.49 | 0.2 | 1.44 | 3.57 | 8.81 | 16.88 | 1.87 | 6.96 | 1.39 | 0.32 | 1.25 | 0.2 |
| 22-16 | 0.85 | 2.88 | 1.77 | 1.96 | 0.08 | 3.88 | 2.48 | 6.36 | 12.36 | 1.35 | 5.09 | 1.13 | 0.26 | 1.06 | 0.18 |
| 22-21 | 2.12 | 9.25 | 8.19 | 4.62 | 0.56 | 2.43 | 9.05 | 25.24 | 48.92 | 5.46 | 19.98 | 3.97 | 0.75 | 3.66 | 0.58 |
| 22-25 | 1.99 | 9 | 7.65 | 5.02 | 0.54 | 3.72 | 8.82 | 25.33 | 50.52 | 5.35 | 18.97 | 3.38 | 0.64 | 3.07 | 0.44 |
| 26-6 | 3.15 | 12.22 | 14.6 | 8.58 | 1.38 | 4.28 | 18.28 | 55.85 | 95.03 | 13.13 | 48.97 | 9.14 | 1.81 | 7.96 | 1.45 |
| 26-7 | 2.9 | 10.59 | 11.71 | 5.61 | 1.11 | 3.1 | 15.81 | 52.61 | 71.55 | 11.96 | 47.23 | 8.94 | 1.54 | 6.68 | 1.12 |
| 26-11 | 1.35 | 7.28 | 11 | 5.64 | 0.74 | 6.35 | 12.76 | 27.44 | 51.11 | 6.07 | 22.92 | 4.56 | 0.83 | 3.71 | 0.71 |

| 样品号 | $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | | | LREE/ HREE | δEu | δCe | U/Th |
|-------|---------------|------|------|------|------|------|-------|--------|--------|-------|---------------|-------------|-------------|------|
| | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y | REE | LREE | HREE | | | | |
| 22-12 | 1.52 | 0.32 | 0.88 | 0.15 | 0.93 | 0.18 | 8.68 | 72.11 | 65.82 | 6.28 | 10.48 | 0.96 | 1.02 | 1.89 |
| 22-13 | 2.08 | 0.44 | 1.2 | 0.2 | 1.22 | 0.22 | 11.41 | 89.97 | 81.56 | 8.41 | 9.7 | 0.94 | 1.02 | 1.17 |
| 22-15 | 1.12 | 0.25 | 0.65 | 0.11 | 0.69 | 0.13 | 6.06 | 40.62 | 36.23 | 4.39 | 8.25 | 1.13 | 0.98 | 0.41 |
| 22-16 | 0.97 | 0.19 | 0.53 | 0.09 | 0.55 | 0.1 | 4.93 | 30.21 | 26.55 | 3.65 | 7.27 | 1.12 | 1 | 1.57 |
| 22-21 | 3.02 | 0.64 | 1.7 | 0.27 | 1.73 | 0.31 | 16.68 | 116.23 | 104.32 | 11.91 | 8.76 | 0.93 | 0.99 | 0.27 |
| 22-25 | 2.26 | 0.48 | 1.32 | 0.23 | 1.52 | 0.29 | 12.76 | 113.79 | 104.19 | 9.6 | 10.85 | 0.94 | 1.03 | 0.42 |
| 26-6 | 7.88 | 1.53 | 4.44 | 0.71 | 4.29 | 0.54 | 41.03 | 252.71 | 223.92 | 28.79 | 7.78 | 1 | 0.83 | 0.23 |
| 26-7 | 5.45 | 1.01 | 3.09 | 0.5 | 2.93 | 0.41 | 27.3 | 215 | 193.82 | 21.18 | 9.15 | 0.93 | 0.68 | 0.2 |
| 26-11 | 3.89 | 0.78 | 2.26 | 0.39 | 2.24 | 0.31 | 20.06 | 127.22 | 112.93 | 14.29 | 7.9 | 0.95 | 0.94 | 0.5 |

注:NASC(北美页岩)标准化数据据文献[24]。

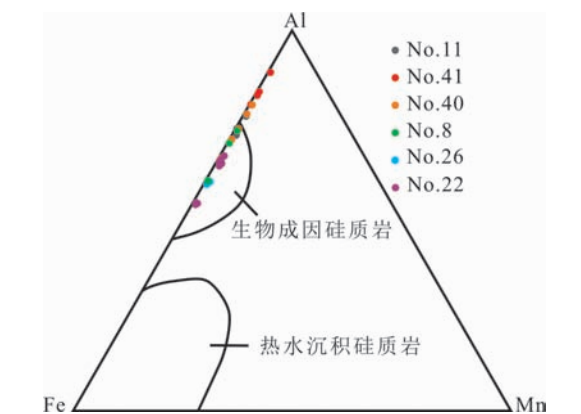


图 6 湖南烟溪组、江西对耳石组硅质岩 Al-Fe-Mn 图解

Fig.6 Al-Fe-Mn diagram for the siliceous rocks of Yanxi Formation in Hunan Province and Dui'ershi Formation in Jiangxi Province

研究^[36]表明,Na 是热水参与的标志,对 K_2O/Na_2O 比值进行分析发现,生物化学沉积作用产生的硅质岩的 K_2O/Na_2O 比值远大于 1,火山成因的硅质岩比值小于 1。本区比值范围为 1.55~42.11,平均值为 20.22(表 1),从表 5 中 Na_2O 含量来看,各样品分析数据均接近于生物成因,仅湖南中部衡阳 No.40 的样品数值接近于热水成因,因而本区硅质岩应属于生物化学成因。

3.3 微量元素分析

前人根据硅质岩中 Al_2O_3 与微量元素的关系来判断硅质岩中 Si 的来源。若为陆源,则 Al_2O_3 与微量元素呈线性关系;若为生物、热水等非陆源因素,则两者呈离散关系;若为混合成因的硅质岩,则部分呈线性关系、部分呈离散关系。本区以微量元

表 5 湖南烟溪组、江西对耳石组硅质岩主量元素、微量元素和稀土元素成因分析
Table 5 The analysis of the reason of the major element, trace and rare earth element compositions of the siliceous rocks of Yanxi Formation in Hunan Province and Dui'ershi Formation in Jiangxi Province

| 样品地区 | $w_B/\%$ | | | | | | | | | | $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | |
|---------------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|------------------|-------------------|------|-------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | TiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | FeO | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | MnO | P ₂ O ₅ | B | Cr | Ni | Cu | Pb | Zn | | |
| 湖南 | 娄底新化 | 92.78 | 4.2 | 0.19 | 0.88 | 0.18 | 0.06 | 0.27 | 1.33 | 0.1 | 0 | 0.01 | 22.32 | 32.8 | 4.02 | 24.61 | 23.02 | 21.88 | |
| | 衡阳祁东 | 89.43 | 6.75 | 0.27 | 0.57 | 0.31 | 0.07 | 0.52 | 1.97 | 0.08 | 0 | 0.02 | 46.12 | 48.21 | 9.93 | 22.73 | 59.54 | 25.08 | |
| | 衡阳常宁 | 84.81 | 8.79 | 0.46 | 1.14 | 0.77 | 0.28 | 1.13 | 2.4 | 0.19 | 0.02 | 0.02 | 56.52 | 66.64 | 24.42 | 41.58 | 23.31 | 76.88 | |
| | 永州 | 96.39 | 1.94 | 0.03 | 0.31 | 0.31 | 0.3 | 0.18 | 0.47 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 13.48 | 17.01 | 3.91 | 22.56 | 7.99 | 11.23 | |
| 江西 | 吉安永新 | 87.52 | 6.4 | 0.3 | 2.13 | 0.59 | 0.5 | 0.81 | 1.63 | 0.06 | 0.03 | 0.03 | 34.35 | 49.35 | 25.26 | 27.95 | 19.79 | 28.8 | |
| | 赣州崇义 | 85.48 | 7.42 | 0.45 | 1.27 | 2.42 | 0.12 | 1.22 | 1.47 | 0.04 | 0.03 | 0.07 | 38.8 | 63.9 | 31.18 | 33.81 | 16.41 | 82.78 | |
| 生物成因 | 1 | 95.96 | 0.71 | 0.03 | 0.43 | 0.08 | 0.08 | 0.02 | 0.05 | 0.06 | 0.02 | 0.02 | 73.1 | 1.3 | 2.7 | 11.4 | <15 | | |
| | 2 | 95.19 | 1.97 | 0.1 | 0.63 | 0.5 | 0.38 | 0.53 | 0.51 | 0.09 | 0.03 | 0.06 | | 40 | 14 | 59 | 8.2 | 30 | |
| 火山成因 | 3 | 79.91 | 5.85 | 0.5 | 0.97 | 2.1 | 2.82 | 1.15 | 1.05 | 1.18 | 0.11 | 0.06 | | | | | | | |
| | 4 | 80.82 | 7.59 | 0.35 | 2.19 | 0.1 | 1.24 | 1.24 | 0.16 | 2.66 | 0.53 | 0.03 | 43.3 | 4.3 | 14 | 7.3 | | 51.7 | |
| 热水成因 | 5 | 92.63 | 1.41 | 0.09 | 2.67 | 0.26 | 0.11 | 0.33 | 0.42 | 0.16 | 0.8 | 0.03 | | 9.5 | 16 | | 25 | 43 | |
| | 6 | 92.8 | 1.44 | 0.1 | 2.68 | 0.16 | 0.37 | 0.61 | 0.51 | 0.55 | 0.46 | 0.17 | | 18 | 36 | 225 | 13 | 57 | |
| $w_B/10^{-6}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 样品地区 | Ba | Mo | Th | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | Y | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 湖南 | 娄底新化 | 198.47 | 3.6 | 3.7 | 11.36 | 21.93 | 2.54 | 9.12 | 1.79 | 0.38 | 1.52 | 0.25 | 1.36 | 0.28 | 0.82 | 0.13 | 0.96 | 0.14 | 7.57 |
| | 衡阳祁东 | 289.93 | 3.66 | 7.12 | 23.52 | 46.12 | 5.22 | 19.12 | 3.53 | 0.7 | 3.07 | 0.49 | 2.68 | 0.57 | 1.69 | 0.27 | 1.8 | 0.27 | 16.6 |
| | 衡阳常宁 | 556.2 | 3.56 | 8.89 | 26.9 | 47.56 | 5.74 | 20.63 | 3.62 | 0.75 | 3.15 | 0.51 | 2.8 | 0.61 | 1.78 | 0.28 | 1.76 | 0.28 | 17.43 |
| | 永州 | 73.43 | 0.98 | 2.42 | 5.91 | 11.34 | 1.3 | 4.76 | 0.88 | 0.2 | 0.74 | 0.12 | 0.65 | 0.13 | 0.38 | 0.06 | 0.39 | 0.06 | 3.3 |
| 江西 | 吉安永新 | 194.3 | 2.28 | 6.1 | 16.84 | 33.23 | 3.61 | 13.11 | 2.5 | 0.49 | 2.28 | 0.35 | 1.83 | 0.39 | 1.04 | 0.18 | 1.11 | 0.2 | 10.09 |
| | 赣州崇义 | 379.07 | 1.96 | 15.61 | 45.3 | 72.56 | 10.39 | 39.71 | 7.54 | 1.39 | 6.11 | 1.09 | 5.74 | 1.1 | 3.26 | 0.53 | 3.16 | 0.42 | 29.46 |
| 生物成因 | 7 | 10.7 | <2 | 5.8 | 12.74 | 1.31 | 5.17 | 1.02 | 0.33 | 1 | 0.16 | 0.95 | 0.2 | 0.58 | 0.09 | 0.58 | 0.09 | 4.91 | |
| | 8 | 140 | 8.5 | 3.3 | 11.39 | 20.33 | 2.7 | 10.67 | 2.27 | 0.57 | 2.38 | 0.4 | 2.64 | 0.57 | 1.63 | 0.23 | 1.62 | 0.24 | 14.46 |
| 火山成因 | 9 | | | | 35.63 | 66.68 | 8.19 | 31.53 | 5.5 | 0.77 | 4.31 | 0.72 | 3.11 | 0.54 | 1.77 | 0.3 | 2.23 | 0.37 | 14.4 |
| | 10 | 11.7 | 7.3 | | 6.12 | 9.28 | 1.78 | 8.07 | 1.93 | 0.71 | 2.33 | 0.62 | 3.04 | 0.67 | 2.14 | 0.62 | 2.17 | 0.61 | 22.69 |
| 热水成因 | 11 | 610 | 2.1 | 18.4 | 37.49 | 4.15 | 16.46 | 3.1 | 0.57 | 3.72 | 0.53 | 2.77 | 0.52 | 1.65 | 0.22 | 1.47 | 0.22 | | 13.9 |
| | 12 | 940 | 14 | | 6.01 | 7.23 | 5.67 | 1.38 | 0.33 | | 0.25 | | | | | 0.93 | 0.17 | | |

注:1—深海钻探计划第62航次^[25];2—日本中部 Mino 地体^[26];3—苏联麦维母河^[27];4—深海钻探计划第62航次^[25];5—美国加利福尼亚 Franciscan 地体^[28];6—北太平洋地区 DSPP Leg32, 303-304 钻孔^[29];7—中国滇东南麻栗坡地区^[30];8—中国北祁连南地区^[31];9—中国若尔盖地区^[32];10—北大巴山^[33];11—中国勉略构造带^[34];12—中国华南地区^[21]。

素 Ni、V、B 和 Cr 为例投图后,发现硅质岩为部分线性、部分离散关系(图 7),说明硅质岩中硅元素来源应为混合成因。

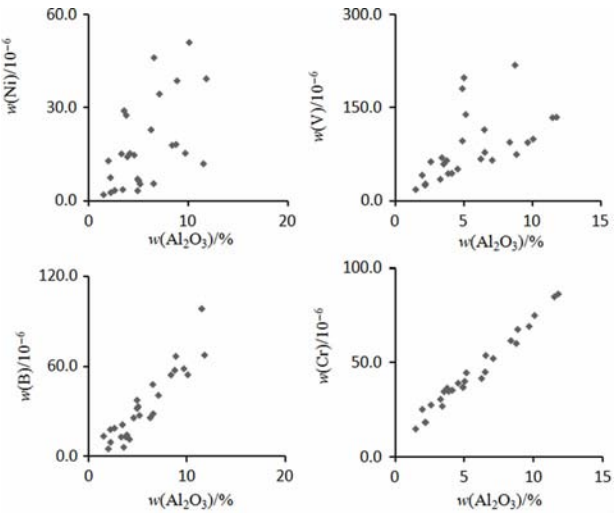


图 7 湖南烟溪组、江西对耳石组硅质岩 Al_2O_3 -Ni、V、B、Cr 的关系图

Fig.7 Al_2O_3 -Ni、V、B、Cr diagram for the siliceous rocks of Yanxi Formation in Hunan Province and Dui'ershi Formation in Jiangxi Province

此外,Douthitt^[37]用 U/Th 比值来指示硅质岩是否为热水成因,当比值大于 1 时为热水沉积硅质岩,小于 1 为非热水成因。本区 U/Th 比值接近(表 2~4),平均为 0.72,说明主要为非热水成因。

3.4 稀土元素分析

硅质岩中 REE 常来源于 3 个方面:海水中吸收、陆源输入和海底热水提供。形成于不同环境的硅质岩 REE 特征差异较大,硅质岩中稀土元素在成岩前后变化不大,因此具有较好的 Si 来源指示意义^[38-39]。

在连通海水环境中,当陆源或热水加大稀土元素供给时,ΣREE 表现升高, No.26 剖面的 ΣREE 较其他剖面偏高, No.40 和 No.41 次高,本区剖面 ΣREE 总体含量接近(图 8)。根据表 5 的对比发现赣州 No.26、衡阳 No.40 和 No.41 几条剖面稀土元素含量比较接近于若尔盖地区志留纪火山成因硅质岩中的含量,而北部剖面 and 南部永州剖面更接近于生物成因硅质岩,表明东南部的剖面更靠近陆源供给区,研究区中部可能更受火山活动影响。

正常海水中轻稀土亏损、重稀土富集;而热水流体中的轻稀土明显富集、重稀土亏损。热水成因硅质岩北美页岩标准化的成型模式图呈左倾趋势,本区稀土元素北美页岩标准化的成型模式图为平缓型(图 8), ΣLREE≈ΣHREE(表 2~4),说明全区受

热水流体影响偏小。
根据对硅质岩中 Ce 的研究,在陆相沉积物、火山岩中以 Ce^{3+} 为主,但在海水被氧化为 Ce^{4+} 时,其溶解度较小,以类质同象替换 Mn^{4+} 进入水成铁锰氧化物中而快速在海水中减少,变得相对其他稀土元素亏损,在海底下渗循环的热水流体中也表现为亏损^[40-41]。根据前人研究分析,本区 Ce 负异常不明显,应为大陆边缘区构造环境,东南部的剖面更靠近陆源区应表现为正异常,而实际只有研究区东南部的剖面 No.26 和 No.40 的部分样品 Ce 元素略呈现负异常(图 8),两个剖面的位置均位于研究区的东南部,可推测本区东南部剖面硅质岩较西北部地区受热水活动影响较大,这与主量元素分析结果吻合。

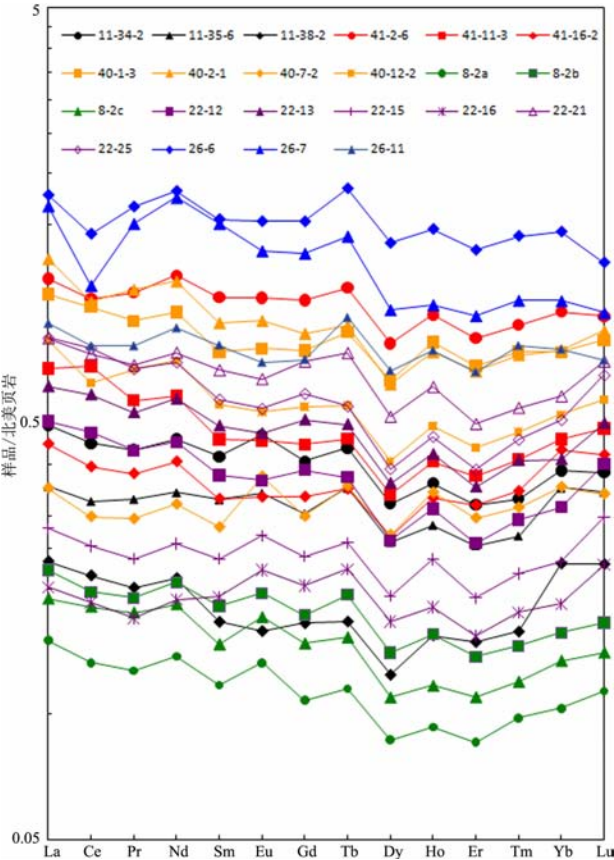


图 8 湖南烟溪组、江西对耳石组硅质岩 NASC(北美页岩) 标准化稀土模式曲线图 (标准化数据据文献[24])

Fig.8 NASC-normalized REE patterns for the siliceous rocks of Yanxi Formation in Hunan Province and Dui'ershi Formation in Jiangxi Province

4 硅质岩成因讨论

基于对湘赣中奥陶统一上奥陶统下部烟溪组、

对耳石组地层中放射虫硅质岩的调查研究结果,结合本区硅质岩岩石学和地球化学特征分析认为,烟溪组和对耳石组硅质岩中 Si 的来源包括生物来源和陆源,生物来源主要为放射虫一类聚硅生物死亡后被溶解进入海水中,陆源为研究区东南部华夏板块向华南海盆大量供给的由硅酸盐及铝硅酸盐岩化学分解而成的游离 SiO_2 。这些 Si 元素通过放射虫等生物的原生沉淀作用沉淀下来,硅质壳体从海水表层缓慢下降直接堆积于浅海—半深海海底形成薄层状的放射虫硅质岩。根据对硅质岩的野外地质特征的调查,结合地球化学分析,本区这套高硅含量岩石的形成与热水、火山作用关系不大,主要为生物化学成因,研究区东南部较西北部受热水活动影响相对略大。仅靠放射虫等硅质生物很难形成厚度很大的硅质沉积,华夏板块对华南海盆大量陆源物质的供给、Si 元素充足提供及对放射虫加速沉降并保存的促进作用,是造成研究区东南部硅质岩地层厚度明显大于西北部的的主要原因。

5 简短结论

(1)研究区中、上奥陶统放射虫分布的认识。放射虫广泛分布于湘赣中南部地区(娄底、永州、衡阳、吉安、崇义)烟溪组和对耳石组内,发育于黑色、灰黑色薄层碳质含量较高的硅质岩中。在湘中娄底和衡阳地区烟溪组的样品中泡制鉴定出放射虫 *Protoentactinia* sp.,部分岩性为放射虫岩。

(2)生源和陆源为 Si 的主要来源,生物化学成因特征明显。主要依据如下:发育于浅海—半深海海盆中的本区烟溪组和对耳石组硅质板岩、硅质岩均为薄层状,在平均 Si 质含量较高的湘中中奥陶统地层中放射虫的密度最大,靠近碎屑岩供给区(华夏板块)的东南部地区的地层明显增厚以及各成因硅质岩地球化学数据对比结果、 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 投图、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值、 Al_2O_3 与微量元素(Ni、V、B、Cr)的线性与离散关系的共存、 U/Th 比值等。

(3)研究区东南部中、上奥陶统地球化学分析存在如下特点: $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值偏低,Fe 与 Mn 元素含量偏高,Ce 元素略呈负异常, $\Sigma\text{LREE}\approx\Sigma\text{HREE}$ 。各成因硅质岩地球化学数据对比结果显示,全区受火山、热水活动影响较小,东南部地区受其影响相对略大。

感谢对本文野外及室内研究工作给予支持和帮助的宋

天锐老师、王玉净老师、王乃文老师、丁孝忠老师、任留东老师、刘燕学老师、孙克勤老师、王军、史志刚、金贵善等同行们。感谢评审老师提出的宝贵意见。感谢编辑老师的辛勤付出。

参考文献

- [1] KNAUTH L P. Petrogenesis of chert[J]. Silica Physical Behavior Geochemistry & Materials Applications, 1994, 29 (3): 233-258.
- [2] FOLK R L, PITTMAN J S. Length-slow chalcedony: a new testament for vanished evaporites[J]. Journal of Sedimentary Research, 1971, 41(4): 1045-1058.
- [3] 杨金玉, 罗平, 刘波, 等. 塔里木盆地阿克苏地区下寒武统玉尔吐斯组硅质岩分类及成因[J]. 地学前缘, 2017, 24(5): 245-264.
- [4] 王玉净, 张元动. 江苏仑山地区上奥陶统五峰组放射虫动物群及其地质意义[J]. 微体古生物学报, 2011, 28(3): 251-260.
- [5] 李红中, 周永章, 杨志军, 等. 钦-杭结合带硅质岩的分布特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 2016, 22(2): 108-117.
- [6] 何垚砚, 牛志军, 杨文强, 等. 湘中南中—晚奥陶世硅质岩地球化学特征及其对奥陶纪盆地演化的启示[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 936-952.
- [7] 郑宁, 宋天锐, 李廷栋, 等. 华南造山带下寒武统和中奥陶统发现放射虫[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 260-265.
- [8] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 700-709.
- [9] 刘宝瑞, 许效松, 潘杏楠, 等. 中国南方大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 9-47.
- [10] RONG J Y, ZHAN R B, XU H G, et al. Expansion of the Cathaysian Oldland through the Ordovician – Silurian transition: emerging evidence and possible dynamics[J]. Science in China: Series D, 2010, 53(1): 1-17.
- [11] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31 (7): 1035-1053.
- [12] SHU L S, JAHN B M, CHARVET J, et al. Early Paleozoic depositional environment and intraplate tectono-magmatism in the Cathaysia Block (South China): evidence from stratigraphic, structural, geochemical and geochronological investigations[J]. American Journal of Science, 2014, 314 (1): 154-186.
- [13] WANG Y J, ZHANG F F, FAN W M, et al. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology[J]. Tectonics, 2010, 29(6): 1-16.
- [14] 舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1581-1593.

- [15] 陈旭, 张元动, 樊隽轩, 等. 广西运动的进程: 来自生物相和岩相带的证据[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(11): 1617-1626.
- [16] 郑宁, 李廷栋, 耿树方, 等. 赣西南地区寒武纪沉积构造环境分析[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1454-1466.
- [17] 郑宁, 刘燕学, 丁孝忠, 等. 赣西南下寒武统杂砂岩地球化学特征和沉积环境[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1115-1125.
- [18] LI Z X, LI X H, WARTHO J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi – Yunkai orogeny, southeastern South China: new age constraints and pressure-temperature conditions [J]. Geological Society of America Bulletin, 2010, 122(5/6): 772-793.
- [19] CHARVET J, SHU L, FAURE M, et al. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: genesis of an intracontinental orogen[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39(4): 309-330.
- [20] 杜远生, 徐亚军. 华南加里东运动初探[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5): 43-49.
- [21] 周永章, 何俊国, 杨志军, 等. 华南热水沉积硅质岩建造及其成矿效应[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 373-377.
- [22] 秦亚超. 生物硅早期成岩作用研究进展[J]. 地质论评, 2010, 56(1): 89-98.
- [23] HASKIN L A, HASKIN M A, FREY F A, et al. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths[M]// AHRENS L H. Origin and distribution of the elements. Oxford: Pergamon Press, 1968: 889-912.
- [24] MCLENNAN S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [M]// LIPIN B R, MCKAY G A. Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1989, 21: 169-200.
- [25] HEIN J R, VALLIER T L, ALLAN M A. Chert petrology and geochemistry, Mid-Pacific Mountains and Hess Rise, deep sea drilling project leg 62[R]// THIEDE J, VALLIER T L. Initial reports of the Deep Sea Drilling Project. Washington DC: U S Government Printing Office, 1981, 62: 711-748.
- [26] YAMAMOTO K. Geochemical study of Triassic bedded cherts from Kamiasso, Gifu Prefecture[J]. Journal of the Geological Society of Japan, 1983, 89(3): 143-162.
- [27] 王安东. 雅鲁藏布江深断裂带所产生硅岩的成因[M]// 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 西藏南部的沉积岩. 北京: 科学出版社, 1981.
- [28] YAMAMOTO K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes[J]. Sedimentary Geology, 1987, 52(1): 65-108.
- [29] ADACHI M, YAMAMOTO K, SUGISAKI R. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity [J]. Sedimentary Geology, 1986, 47(1/2): 125-148.
- [30] 任光明, 王鹏, 张林奎, 等. 滇东南弗拉斯期放射虫硅质岩地球化学特征及沉积环境探讨[J]. 地质论评, 2011, 57(4): 505-514.
- [31] 杜远生, 朱杰, 顾松竹. 北祁连山一带奥陶纪硅质岩沉积地球化学特征及其多岛洋构造意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2006, 31(1): 101-109.
- [32] 张岩, 漆富成, 张宇龙, 等. 迭部志留系硅质岩地球化学特征及成因分析[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(4): 375-460.
- [33] 高长林, 何将启. 北大巴山硅质岩的地球化学特征及其成因[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1999, 24(3): 246-256.
- [34] 戢兴忠, 李楠, 张闯, 等. 勉略构造带硅质岩元素地球化学特征及其形成环境[J]. 岩石学报, 2014, 30(9): 2619-2630.
- [35] BALTUCK M. Provenance and distribution of tethyan pelagic and hemipelagic siliceous sediments, pindos mountains, Greece[J]. Sedimentary Geology, 1982, 31(1): 63-88.
- [36] 张汉文. 秦岭泥盆系的热水沉积岩及其与矿产的关系: 概论秦岭泥盆纪的海底热水作用[J]. 西北地质科学, 1991, (31): 15-42.
- [37] DOUTHITT C B. The geochemistry of the stable isotope of silicon[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46(8): 1449-1458.
- [38] MURRAY R W, BUCHHOLTZ T B M R, JONES D L, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. Geology, 1990, 18(3): 268-271.
- [39] MURRAY R W, JONES D L, BUCHHOLTZ T B M R. Diagenetic formation of bedded chert: evidence from chemistry of the chert-shale couplet[J]. Geology, 1992, 20(3): 271-274.
- [40] HOLSER W T. Evaluation of the application of rare-earth elements to paleoceanography[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1997, 132(1/2/3/4): 309-323.
- [41] HARA H, KURIHARA T, KURODA J, et al. Geological and geochemical aspects of a Devonian siliceous succession in northern Thailand: implications for the opening of the Paleo-Tethys[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 297(2): 452-464.