

# 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

杜远生<sup>①②\*</sup> 朱杰<sup>①</sup> 顾松竹<sup>①②</sup> 徐亚军<sup>①</sup> 杨江海<sup>①</sup>

(① 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074; ② 生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074)

**摘要** 北祁连加里东造山带位于华北板块与柴达木微板块之间, 是柴达木微板块与华北板块碰撞形成的造山带。北祁连加里东期造山带是在晚元古代 Rodinia 联合大陆基础上裂解, 经由寒武纪裂谷盆地、奥陶纪多岛洋盆、志留纪-早泥盆、中泥盆世碰撞造山而成的。北祁连甘露池、向前山、石青洞寒武纪黑茨沟组硅质岩(除热液影响的样品)的常量元素  $Al/(Al+Fe+Mn)$  值平均为 0.794,  $Al/(Al+Fe)$  值平均为 0.627,  $\delta Ce$  值平均为 1.114,  $La_n/Yb_n$  值平均为 0.994,  $La_n/Ce_n$  平均为 1.034。天祝向前山的硅质岩以北美页岩标准化的稀土元素配分模式呈重稀土富集的配分特征, 接近于大洋盆地的重稀土富集的配分模式。甘露池、石青洞两地稀土元素配分模式呈平坦状, 即不同于大陆边缘的明显轻稀土元素富集的配分模式, 也不同于开放洋盆的重富集的配分模式。这些稀土元素特征反映寒武纪硅质岩形成于靠近或远离陆源的大陆边缘裂谷盆地的构造背景。北祁连大克岔、黑茨沟、边马沟、大岔大坂、九个泉、百泉门、肮脏沟、石灰沟、老虎山、毛毛山、崔家墩等地奥陶纪硅质岩(除热液影响的样品) $Al/(Al+Fe+Mn)$  值平均为 0.72,  $Al/(Al+Fe)$  值平均为 0.58,  $\delta Ce$  值平均为 0.99,  $La_n/Yb_n$  值平均为 1.09,  $La_n/Ce_n$  平均为 0.96。北祁连奥陶纪大部分硅质岩以北美页岩标准化的稀土元素配分模式呈平坦状或略左倾的重稀土元素。个别硅质岩的稀土元素配分模式呈略右倾的轻稀土富集的配分模式。沉积地球化学特征结合早古生代沉积特征与构造演化分析, 认为北祁连寒武纪-奥陶纪与裂谷、洋壳、岛弧、弧后盆地火山岩共生的硅质岩的构造背景不是典型的远洋盆地和洋中脊, 而是部分靠近、部分远离陆源的大陆边缘深水盆地的多岛洋背景。北祁连及相邻的柴达木微板块周缘地区存在的多条早古生代的蛇绿岩带说明该区处于原特提斯洋东侧的多岛洋背景。

**关键词** 北祁连造山带 寒武系-奥陶系 硅质岩 沉积地球化学 多岛洋

北祁连加里东造山带位于青藏高原西北缘, 为柴达木微板块、中祁连地块与华北板块碰撞形成的造山带。20 世纪 70 年代末以来, 随着板块学说引进大陆造山带研究, 有关北祁连加里东造山带的物质组成、结构和构造演化引起学者们的极大关注, 在北祁连

蛇绿岩和火山岩、蓝片岩和高压变质带、构造变形和大地构造演化等方面取得了丰硕的成果。但也存在对北祁连早古生代古海洋性质的不同认识<sup>[1,2]</sup>。造山带古海洋学是当今造山带地质学的一个前沿领域, 它对造山带的形成、演化及大地构造背景研究均具重

收稿日期: 2006-12-30; 接受日期: 2007-06-04

国家自然科学基金(批准号: 40372061, 40621002)和教育部创新团队发展计划(IRT00546)资助项目

\* E-mail: [duyzy@cuq.edu.cn](mailto:duyzy@cuq.edu.cn)

要的理论意义. 北祁连寒武纪-奥陶纪处于裂谷-大洋演化阶段, 与大洋盆地、岛弧、弧后盆地共生的硅质岩发育. 造山带硅质岩沉积地球化学分析, 可以帮助分析造山带的古海洋性质, 认识北祁连奥陶纪古海洋格局和构造背景.

### 1 区域地质背景

北祁连加里东期造山带位于华北板块西南缘龙首山与中祁连之间, 北界为龙首山断裂, 南缘与中祁连北缘断裂相接. 东端为同心-固原右行走滑断裂, 西端为左行走滑的阿尔金断裂所截切(图 1). 根据冯益民和何世平<sup>[3]</sup>的划分方案, 北祁连造山带自北向南可以划分为河西走廊弧后盆地、北祁连岛弧、俯冲杂岩和消减洋壳残片等不同的单元, 并可归并为河西走廊弧后盆地、北祁连岛弧、海沟俯冲杂岩 3 个构造分区(图 1).

北祁连寒武纪-奥陶纪地层分布广泛, 地层发育良好, 属于祁连地层区北祁连分区. 按照甘肃省地质矿产局<sup>[4]</sup>地层清理的划分意见(表 1), 北祁连寒武纪-奥陶纪地层特征主要为火山岩、碎屑岩、泥质岩、灰岩及硅质岩沉积.

北祁连寒武系黑茨沟组以火山岩、火山碎屑岩为主, 夹少量细碎屑岩、硅质岩及灰岩透镜体. 黑茨沟

组火山岩为海底火山熔岩、火山碎屑岩, 双峰式火山喷发特征反映其为典型的大陆裂谷火山活动的产物<sup>[5]</sup>. 北祁连晚寒武世-早奥陶世香毛山组, 主要为浅变质的碎屑岩、泥质岩夹结晶灰岩, 局部夹火山碎屑岩, 内含丰富的浅海相三叶虫、腕足类化石. 中、晚寒武世大黄山组(甘肃)和香山群(宁夏)以浅海碎屑岩沉积为主, 代表北祁连裂谷扩展过程中产物.

早奥陶世, 北祁连广泛分布阴沟组(天祝-景泰-带为车轮沟群), 中、下奥陶统中堡群. 阴沟组和车轮沟群主要由玄武岩、安山玄武岩、安山岩及火山碎屑岩组成, 内夹各类岩屑砂岩、板岩、硅质岩及灰岩. 火山岩以溢流相为主, 局部发育喷发相, 以块状和枕状熔岩为主. 火山岩东西向延伸 800 km, 最大厚度 5000 m 以上, 最薄处小于 1000 m. 中、下奥陶统中堡群包括海相火山岩和正常沉积岩. 海相火山岩以基性和中基性火山岩为主体, 由下至上为玄武岩、玄武安山岩、细碧玢岩、角砾熔岩、细碧火山碎屑岩、碱性粒玄岩和粗面岩等, 岩石化学分类分属岛弧拉斑玄武岩、钙碱性玄武岩和橄榄玄粗岩系. 沉积岩包括硅质岩、砂板岩和块状灰岩等, 呈夹层或者规模不等的透镜体与火山岩共生, 形成熔岩-火山碎屑岩-火山岩夹沉积岩-沉积岩的岩石系列.

北祁连中、上奥陶统包括中奥陶统斯家沟组、妖

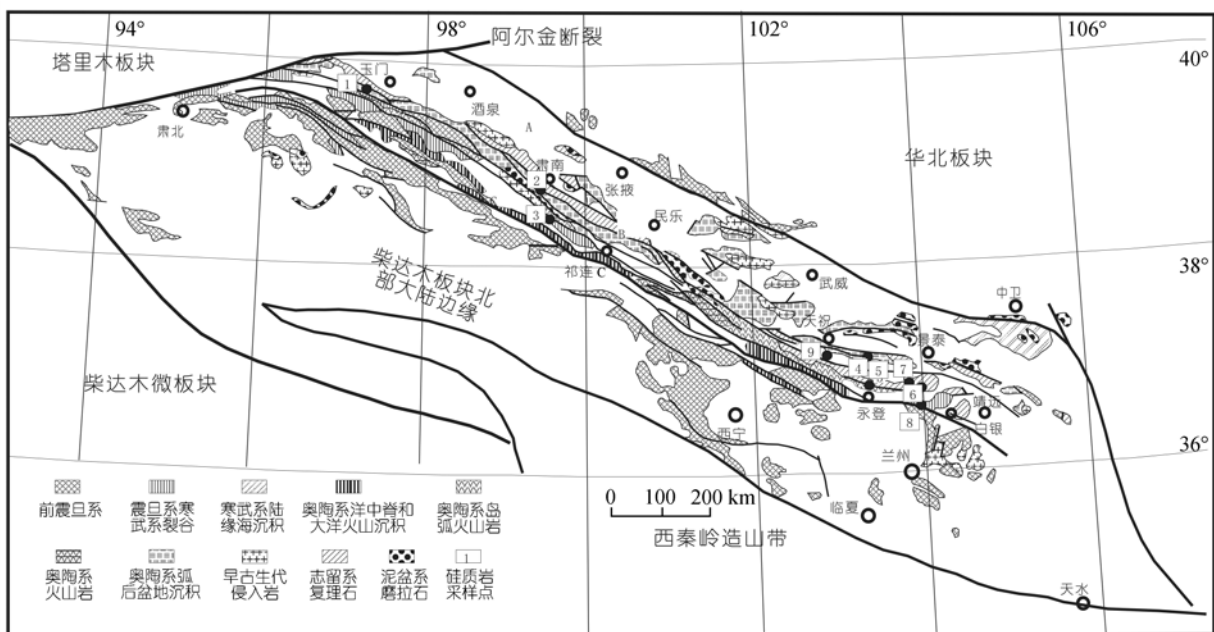


图 1 北祁连造山带的构造格架和研究剖面分布图

据冯益民、何世平<sup>[3]</sup>修改. 构造分区: A. 河西走廊弧后盆地, B. 岛弧, C. 海沟俯冲杂岩; 研究剖面和采样点: 1. 玉门肮脏沟, 2. 肃南百泉门-九个泉, 3. 大坂大盆-边家沟, 4. 古浪毛毛山, 5. 永登石灰沟, 6. 景泰老虎山, 7. 景泰崔家墩, 8. 永登甘露池, 9. 天祝黑茨沟、石青洞、向前山、大克岔

表 1 北祁连-河西走廊地区寒武系-奥陶系划分简表

奥陶系	上统	扣门子组 南石门子组	斜壕组
		妖魔山组	斯家沟组 天祝组
	中统	中堡群	
下统	阴沟组	车轮沟群	
寒武系	上统	香毛山组	大黄山组
	中、下统	黑茨沟组	

魔山组、天祝组，上奥陶统南石门子组、扣门子组和斜壕组。斯家沟组以钙质页岩和瘤状灰岩交互为特征。妖魔山组以巨厚层-块状灰岩覆盖于中堡群之上。天祝组主要为紫红色-灰绿色砂砾岩、砂岩、粉砂岩及页岩，底部局部见厚达百米的底砾岩。上奥陶统南石门子组、扣门子组见于北祁连西部，南石门子组为泥质板岩、变粉砂岩、砂岩、硅质岩夹灰岩、泥灰岩。扣门子组为安山质火山岩、火山凝灰岩，夹灰岩及碎屑岩。斜壕组见于北祁连东段，下部为细砂岩，向上为砂-页岩互层，局部顶部出现灰岩、角砾状灰岩。

北祁连山自北向南发育多条蛇绿岩带，包括玉门榆树沟-肃南九个泉-肃南百泉门-景泰老虎山蛇绿岩带、肃南大岔大坂蛇绿岩带、祁连边马沟-百经寺蛇绿岩带、祁连玉石沟-川刺沟-小八宝蛇绿岩带。与蛇绿岩共生发育多套火山岩和硅质岩，火山岩研究表明上述蛇绿岩共生的火山岩分别代表洋壳火山岩(玉石沟-小八宝山、边马沟-百经寺)、岛弧火山岩(大岔大坂)、弧后盆地火山岩(榆树沟-老虎山)<sup>[3,6]</sup>。与上述蛇绿岩带及火山岩共生的有多处硅质岩。

## 2 寒武-奥陶系硅质岩野外产状和特征

北祁连寒武系和中、下奥陶统硅质岩主要夹于基性火山岩、火山碎屑岩或细粒沉积岩中。包括永登甘露池、天祝石青洞、向前山等地寒武系黑茨沟组硅质岩，玉门肮脏沟、肃南边马沟、大岔大坂、百泉门、九个泉，永登石灰沟、甘露池，天祝大克岔、黑茨沟，古浪毛毛山，景泰老虎山、崔家墩等地奥陶系硅质岩。这些硅质岩呈灰色、深灰色，中厚层状-薄层状，风化后显红色，反映岩石中铁质较高，与深海硅质岩类似。硅质岩的显微薄片分析表明，岩石呈隐晶质或微晶

状，未见重结晶现象。与野外观察相一致，反映岩石未经重结晶成岩作用和变质作用改造。

硅质岩样品处理过程中，首先用清水去除岩石表面的风化残余物，尔后进行粗粉碎，选择新鲜样品送样。样品由湖北省岩矿测试中心进行细粉碎制样，每件样品分两份，一份由湖北省岩矿测试中心进行 X 荧光主量元素测试，另一份由中国地质大学地质过程和矿产资源国家重点实验室 ICP-MS 实验室进行微量元素和稀土元素测试。

## 3 硅质岩的地球化学特征及其构造意义

硅质岩的常量元素、微量元素和稀土元素地球化学特征可以帮助恢复其形成环境及其各种背景，已成为古海洋分析的重要手段<sup>[7-14]</sup>。Murray<sup>[12]</sup>收集了世界各地早古生代至晚第三纪有代表性的硅质岩地球化学资料，包括陆源层序和 DSDP, ODP 样品，总结了广泛适用各种沉积环境的地球化学判别标志。硅质岩中的 SiO<sub>2</sub> 主要来自生物和海底火山作用，由于大多数硅质岩都含有硅质微生物，因此生物来源可能更为重要。热液影响的硅质岩，类似于热水沉积的硅质岩<sup>[15]</sup>。由于热液影响的样品不能反映硅质岩的沉积环境和沉积背景，因此在分析其形成环境和构造背景时应该剔除热液影响的样品。北祁连寒武纪-奥陶纪硅质岩一般呈层状产出，颜色为深灰色、灰黑色或红黑色，主要为沉积成因的。部分硅质岩沉积受热液影响，可以通过常量元素特征判别。

### 3.1 常量元素

常量元素 Fe, Mn, Al 的含量对于区分热液成因硅质岩与生物成因硅质岩具有重要意义。硅质岩中 Fe, Mn 的富集主要与热液的参与有关，而 Al 的富集则与陆源物质的介入有关。Adachi 等<sup>[16]</sup>拟定了 Al-Fe-Mn 三角图解，所有热液成因硅质岩比值均落于图解富 Fe 端，非热液成因硅质岩比值均落于图解富 Al 端。Bostrom 和 Peterson 等<sup>[17]</sup>，Bostrom 等<sup>[18]</sup>提出 Al/(Al+Fe+Mn) 比值是判断硅质岩成因的重要参数，该比值随着远离扩张中心距离的增大而增高，并与热液系统的影响有关。Bostrom 等<sup>[17]</sup>提出，海相沉积中 Al/(Al+Fe+Mn) 值以 Al/(Al+Fe+Mn)=0.4 为界，小于 0.4 为热液成因，大于 0.4 反映碎屑来源。Adachi 等<sup>[16]</sup>和 Yamamoto<sup>[19]</sup>指出这个比值在 0.01(纯热液成因)到 0.60(纯生物成因)之间变化。Murray 等<sup>[10-12]</sup>研究证明，

Mn是硅质岩形成过程中分离出来的, Mn 和Al的比值不能反映沉积物的沉积环境, 建议用Al/(Al+Fe)比值判断构造背景. 洋中脊Al/(Al+Fe)值平均为 0.12; 北太平洋硅质岩的Al/(Al+Fe)比值平均为 0.32; 日本中部的三叠纪大陆边缘的层状硅质岩Al/(Al+Fe)平均为 0.6(Sugisaki等<sup>[20]</sup>)、DSDP62 的白垩纪硅质岩Al/(Al+Fe)值为 0.62<sup>[21]</sup>. Murray<sup>[12]</sup>利用已知沉积环境的硅质岩化学成分比值拟定图解, 如 $100 \times (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2) - 100 \times (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2)$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ 图解, 圈定了大陆边缘、大洋盆地和洋中脊硅质岩投影区.

北祁连永登甘露池, 天祝石青洞、向前山寒武系黑茨沟组硅质岩 Al/(Al+Fe+Mn)值绝大部分大于 0.4, 仅有两个样品小于 0.4(S4, X4), 反映寒武纪硅质岩成因主要为碎屑成因, 未受热液作用影响, 2 个样品受一定程度的热液作用影响. 奥陶纪硅质岩除黑茨沟阴沟组 H6(0.24)、毛毛山中堡群 MM-3(0.29)、石灰沟中堡群 Y304(0.38)、老虎山中堡群 L03-1(0.13)和 L04-1(0.01)、九个泉阴沟组 Db17(0.37)和 Db18(0.28)、边马沟阴沟组 Db19(0.36)、百泉门阴沟组 J201(0.39)外, 其他样品均大于 0.4(表 2, 3). 说明该区硅质岩除个别样品外, 受热液影响不明显, 为碎屑成因.

以硅质岩的 Al/(Al+Fe)值判别期构造成因(表 3). 北祁连永登甘露池, 天祝石青洞、向前山寒武系黑茨沟组硅质岩 Al/(Al+Fe)值除受热液影响的两个样品小于 0.4(石青洞样品 S4, 向前山样品 X4), 3 个样品大于 0.7, 其他 4 个样品在 0.4~0.6 之间. 反映寒武纪甘露池硅质岩成因主要为大陆边缘成因, 石青洞、向前山硅质岩介于大陆边缘与大洋盆地构造背景之间. 天祝大克岔奥陶纪阴沟组 9 个样品硅质岩 Al/(Al+Fe)值均大于 0.6, 为大陆边缘成因. 景泰崔家墩奥陶纪阴沟组硅质岩 4 个样品 Al/(Al+Fe)值两个大于 0.6, 2 个小于 0.4, 分别接近于为大陆边缘和大洋盆地. 毛毛山奥陶纪中堡群硅质岩 2 个样品一个受热液影响不计, 另一个样品 Al/(Al+Fe)值为 0.56, 接近于为大陆边缘成因. 黑茨沟奥陶纪阴沟组 4 个样品一个样品受热液影响(H6), 其他 3 个样品 Al/(Al+Fe)值在 0.4~0.6 之间, 介于大陆边缘和大洋盆地成因之间. 永登石灰沟奥陶纪中堡群共有 14 件硅质岩样品, 除一个样品受热液影响, 其他样品有 3 个样品大于 0.6, 2 个样品

介于 0.4~0.6 之间, 其他样品均小于 0.4, 其中 S28-1 样品最低, 为 0.07, 反映石灰沟奥陶纪中堡群硅质岩更接近于大洋盆地和洋中脊成因. 景泰老虎山奥陶纪中堡群 5 件硅质岩样品两件样品(L03-1, L04-1)受热液影响, 其他 3 件样品 Al/(Al+Fe)值 1 个样品大于 0.6, 2 个样品大于 0.4, 分别接近于大陆边缘和大洋盆地成因. 玉门肮脏沟奥陶纪阴沟组 2 件硅质岩样品 Al/(Al+Fe)值均在 0.4~0.6 之间, 接近于大洋盆地成因. 肃南九个泉奥陶纪阴沟组 4 件样品 2 件样品受热液影响, 其他 2 件样品分别为 0.50, 0.73, 为大陆边缘成因. 肃南边马沟奥陶纪阴沟组两件样品 1 件样品受热液影响, 另一件样品 Al/(Al+Fe)值为 0.33, 接近于大洋盆地成因. 肃南大岔大坂奥陶纪阴沟组 5 件硅质岩样品 Al/(Al+Fe)值, 1 个样品为 0.45, 1 个样品为 0.58, 其他 3 个样品均大于 0.6, 反映主要为大陆边缘成因. 肃南百泉门 8 件样品, 1 个样品受热液影响不计, 其他 6 个样品 Al/(Al+Fe)值在 0.5~0.8 之间, 1 个样品为 0.47, 也反映主要为大陆边缘成因.

把寒武纪硅质岩样品数据投入 Al-Fe-Mn 图解(图 2(a))中, 2 别样品接近于热液成因区, 反映受一定热液作用影响. 其他样品均落在生物成因岩硅质岩区或富 Al 端, 说明这些硅质岩以生物成因为主, 未受热液活动参与. 将研究区硅质岩岩石化学换算后投入  $100 \times (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2) - 100 \times (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)$ (图 2(b)),  $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2)$ (图 2(c))和  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$ (图 2(d))图解中, 除受热液影响的样品落入洋中脊区不计外, 其他大部分投点落入大陆边缘盆地及附近和远洋盆地范围, 反映该区的硅质岩主要形成于大陆边缘盆地的构造背景, 部分样品接近于远洋盆地的构造背景.

将奥陶纪硅质岩样品数据投入 Al-Fe-Mn 图解(图 3)中, 4 个样品落在热液成因的硅质岩区, 包括样品 23(毛毛山, MM3)、25(黑茨沟, H6)、43(老虎山, L03-1)、44(老虎山, L04-1), 这些样品的 Al/(Al+Fe+Mn)值均小于 0.30 左右, 反映受热液作用明显. 12 个样品落在热液成因的硅质岩和生物成因硅质岩区外, 包括样品 19(崔家墩, CJ-2)、20(崔家墩, CJ-5)、21(崔家墩, CJ-8)、32(石灰沟, Y304)、36(石灰沟, SH6-8)、42(石灰沟, SH-8)、51(九个泉, (Db14)、52(九个泉, (Db17)、53(九个泉, (Db18)、54(边马沟, Db19)、55(边马沟, Db21)、62(九个泉, J201), 这些样品的 Al/(Al+

表 2 北祁连山寒武纪-奥陶纪硅质岩常量元素含量表(单位: %)<sup>a)</sup>

样点	样品	分析样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>
石青洞	S3	1	93.55	0.08	1.70	1.48	0.63	0.03	0.40	0.42	0.02	0.51	0.30	0.73	0.02
	S4	2	97.07	0.01	0.53	0.88	0.35	0.04	0.10	0.10	0.01	0.11	0.04	0.47	0.06
甘露池	G2-1	3	91.57	0.12	2.87	0.21	0.53	0.03	0.30	1.03	0.53	0.32	0.03	1.13	1.06
	G2-2	4	91.28	0.20	4.19	<0.01	0.53	0.01	0.21	0.72	0.15	0.55	0.04	1.48	0.45
	G2-3	5	92.88	0.12	3.18	<0.01	0.47	0.01	0.24	0.49	0.07	0.81	0.03	1.05	0.60
向前山	X1	6	96.67	0.04	0.81	<0.01	0.75	<0.01	0.06	0.07	0.02	0.25	0.09	0.64	0.26
	X2	7	96.67	0.04	0.54	<0.01	0.45	<0.01	0.04	0.11	0.02	0.16	0.05	0.77	0.05
	X3	8	96.67	0.04	1.99	2.86	0.18	0.02	0.04	0.15	0.02	0.11	0.17	1.40	0.02
	X4	9	96.67	0.04	1.67	4.27	0.35	<0.01	0.09	0.12	0.03	1.02	0.37	1.72	0.04
大克岔	D3	10	79.67	0.22	8.83	1.00	1.92	0.05	0.58	0.12	0.29	5.58	0.07	1.33	0.10
	D4	11	78.60	0.18	10.40	0.29	1.25	0.04	0.49	0.17	3.72	3.50	0.05	1.01	0.02
	D5	12	79.94	0.24	10.88	0.12	1.48	0.03	0.47	0.67	4.56	0.49	0.07	0.78	0.06
	D6	13	66.59	0.57	16.80	0.91	2.10	0.08	0.84	0.28	1.61	7.57	0.14	2.17	0.04
	D8	14	68.10	0.39	11.91	0.35	3.32	0.14	1.30	2.85	1.45	5.99	0.11	1.70	2.14
	D12	15	87.37	0.15	4.42	0.53	1.83	0.05	0.80	1.03	0.66	0.72	0.05	1.26	0.71
	D13	16	77.31	0.22	11.58	0.28	2.12	0.03	0.66	0.71	5.25	0.13	0.06	0.91	0.51
	D14	17	92.10	0.09	1.94	1.39	0.30	0.03	0.45	1.28	0.07	0.53	0.05	0.68	1.02
崔家墩	CJ-2	19	73.07	0.57	11.48	11.48	11.48	0.07	1.80	1.06	1.20	2.70	0.13	2.07	0.15
	CJ-5	20	75.05	0.59	11.35	11.35	11.35	0.07	1.38	1.28	2.44	1.80	0.13	1.70	0.03
	CJ-8	21	75.93	0.64	10.68	0.62	3.37	0.05	1.39	0.88	1.78	2.21	0.14	2.02	0.06
	CJ-9	22	77.82	0.56	9.83	0.53	3.25	0.05	1.33	0.73	2.38	1.48	0.08	1.75	0.06
毛毛山	MM3	23	79.07	0.07	0.39	0.17	1.10	0.10	0.17	10.4	0.04	0.03	0.04	0.58	7.85
	MM6	24	72.57	0.37	7.76	0.95	4.63	0.63	2.14	3.64	0.29	1.49	0.12	3.19	2.12
黑茨沟	H6	25	78.13	0.12	2.42	11.46	0.67	0.05	0.91	2.43	0.06	0.50	0.04	0.86	1.84
	H7	26	80.37	0.46	3.82	3.83	0.58	0.07	1.04	4.32	0.25	0.64	0.13	1.04	3.37
	H8	27	83.39	0.16	2.63	2.78	0.47	0.07	0.68	4.49	0.14	0.53	0.13	0.88	3.47
	H9	28	94.50	0.10	1.31	0.84	0.17	0.02	0.30	0.90	0.05	0.38	0.10	0.54	0.71
石灰沟	Y301	29	91.4	2.61	2.78	0.33	0.32	0.12	0.41	0.12	0.15	0.13	0.04	1.24	0.2
	Y302	30	95.48	1.15	0.71	0.27	0.16	0.12	0.49	0.08	0.11	0.03	0.02	0.61	0.08
	Y303	31	89.94	1.71	1.3	0.33	1.13	0.19	0.82	0.12	0.21	0.08	0.17	1.17	0.65
	Y304	32	89.78	0.13	2.06	3.78	0	1.4	0.17	0.39	0.11	0.22	0.05	1.57	0.2
	Y305	33	82.62	3.74	2.05	1.57	4.68	0.66	0.41	0.1	0.16	0.05	0.16	1.42	3.08
	SH6-5	34	87.97	3.90	1.09	1.30	0.62	1.09	1.16	0.02	0.19	0.04	0.12	1.71	0.64
	SH6-7	35	82.98	5.76	1.65	1.73	1.38	1.07	1.51	0.04	0.32	0.05	0.16	2.36	0.76
	SH6-8	36	97.23	0.77	0.27	0.23	0.25	0.20	0.25	0.02	0.05	0.04	0.01	0.50	0.20
	S24-1	37	87.52	2.89	1.91	0.50	0.39	0.35	1.08	0.04	0.24	0.06	0.01	1.76	0.72
	S24-3	38	94.94	4.92	0.41	0.37	0.24	0.25	0.36	0.04	0.10	0.04	0.01	0.86	0.26
	S26-1	39	77.82	1.34	2.71	1.93	0.95	1.53	1.74	0.98	0.48	0.11	0.16	2.16	0.06
	S26-4	40	88.04	9.17	0.50	1.67	0.34	1.10	1.03	0.26	0.21	0.03	0.20	1.54	0.09
	S28-1	41	95.92	4.99	0.08	0.42	0.60	0.18	0.28	0.07	0.10	0.05	0.01	0.54	0.42
SH-8	42	94.15	0.08	1.32	2.23	0.23	0.26	0.12	0.14	0.08	0.23	0.04	0.91	0.06	
老虎山	L03-1	43	91.75	0.03	0.58	5.01	1.10	0.10	0.22	0.27	0.04	0.01	0.02	0.94	0.02
	L04-1	44	90.81	0.04	0.05	6.61	1.17	0.02	0.15	0.35	0.04	0.02	0.04	0.43	0.08
	LH-1	45	87.69	0.19	3.97	0.51	3.03	0.19	1.05	0.28	0.07	0.80	0.05	1.81	0.03
	L07-3	46	93.50	0.09	1.39	0.41	1.02	0.03	0.71	1.19	0.14	0.06	0.04	0.73	0.30
	L11-2	47	83.97	0.29	6.41	0.85	1.67	0.04	1.22	0.75	2.18	0.52	0.17	1.39	0.24
肮脏沟	5034	48	97.63	0.05	0.25	0.05	0.23	0.01	0.14	0.14	0.07	0.18	0.05	0.22	0.41
	5032	49	97.47	0.04	0.24	0.15	0.1	0.01	0.13	0.1	0.04	0.07	0.01	0.26	0.24
九个泉	Db8	50	69.63	0.34	9.44	0.71	2.47	0.09	1.53	4.26	4.41	0.46	0.10	0.61	5.84
	Db14	51	87.78	0.15	2.30	1.28	0.93	1.21	0.80	1.68	0.55	0.97	0.16	0.94	1.18
	Db17	52	90.49	0.09	1.32	1.50	0.72	1.06	1.16	1.02	0.11	0.66	0.09	1.04	0.69
	Db18	53	93.78	0.06	0.80	1.21	0.98	0.87	0.63	0.16	0.08	0.32	0.05	0.82	0.10

表 2(续)

样点	样品	分析样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	CO <sub>2</sub>
边马沟	Db19	54	91.61	0.09	1.42	1.15	1.08	1.38	0.69	0.29	0.25	0.77	0.11	0.92	0.08
	Db21	55	79.42	0.33	3.97	7.71	0.18	1.15	1.20	1.83	0.98	0.40	0.12	1.44	1.13
大盆大坂	Db29	56	74.63	0.65	9.79	0.83	4.40	0.08	2.48	0.40	1.42	2.26	0.19	2.52	0.16
	Db30	57	70.75	0.76	12.04	2.88	1.50	0.04	1.70	0.54	2.70	3.67	0.12	1.94	0.32
	Db31	58	86.22	0.16	3.02	3.17	0.47	0.12	0.65	2.07	0	0.34	0.65	1.42	1.54
	D101	59	83.52	0.28	6.05	0.91	3.10	0.03	0.83	1.56	1.83	0.03	0.10	1.33	0.32
	D102	60	83.85	0.30	7.23	0.40	2.07	0.04	0.75	0.73	3.22	0.04	0.12	0.95	0.18
百泉门	J103	61	92.45	0.10	2.04	1.44	0.17	0.07	0.24	1.16	0.07	0.54	0.56	0.85	0.19
	J201	62	87.52	0.14	1.93	1.61	2.63	0.26	1.24	2.09	0.03	0.02	0.11	1.34	1.30
	J203	63	86.93	0.13	3.24	0.56	1.17	0.25	0.64	2.63	0.46	0.95	0.11	0.93	1.86
	J303	64	87.46	0.07	1.65	1.18	0.63	0.11	0.33	4.17	0.12	0.63	0.02	0.66	2.84
	J401	65	87.26	0.16	3.2	0.28	1.77	0.11	0.75	2.52	0.95	0.24	0.06	0.92	1.62
	J402	66	90.41	0.12	2.41	0.17	1.83	0.10	0.68	1.44	0.66	0.19	0.06	0.92	0.89
	J403	67	78.22	0.27	5.61	0.63	3.02	0.25	1.77	3.83	1.56	0.44	0.11	1.63	2.51
	J505	68	78.62	0.34	7.51	3.15	1.88	0.30	1.50	0.93	1.32	1.84	0.20	1.80	0.44

a) 湖北省岩矿测试中心 X 荧光测试

表 3 北祁连山寒武纪-奥陶纪硅质岩常量元素特征值

	S3	S4	G2-1	G2-2	G2-3	X1	X2	X3	X4	D3	D4	D5	D6	D8	D12	D13	D14	D15
Al/(Al+Fe+Mn)	0.55	0.39	0.84	0.91	0.90	0.60	0.62	0.51	0.36	0.81	0.91	0.91	0.89	0.82	0.73	0.87	0.63	0.80
Al/(Al+Fe)	0.44	0.29	0.78	0.88	0.86	0.49	0.51	0.40	0.26	0.74	0.86	0.86	0.84	0.75	0.63	0.81	0.53	0.75
	CJ-2	CJ-5	CJ-8	CJ-9	MM-3	MM-6	H6	H7	H8	H9	SH6-5	SH6-7	SH6-8	SH-8	Y301	Y302	Y303	Y304
Al/(Al+Fe+Mn)	0.43	0.43	0.79	0.79	0.29	0.64	0.24	0.57	0.55	0.66	0.70	0.71	0.69	0.43	0.56	0.70	0.76	0.38
Al/(Al+Fe)	0.32	0.32	0.71	0.70	0.22	0.56	0.17	0.46	0.44	0.56	0.35	0.34	0.35	0.35	0.80	0.61	0.45	0.35
	Y305	S24-1	S24-3	S26-1	S26-4	S28-1	L03-1	L04-1	LH-1	L07-3	L11-2	5034	5032	Db8	Db14	Db17	Db19	Db18
Al/(Al+Fe+Mn)	0.53	0.76	0.72	0.74	0.75	0.76	0.13	0.01	0.60	0.58	0.78	0.55	0.58	0.81	0.49	0.37	0.36	0.28
Al/(Al+Fe)	0.23	0.67	0.39	0.48	0.20	0.07	0.09	0.01	0.51	0.47	0.70	0.45	0.48	0.73	0.50	0.36	0.38	0.26
	Db21	Db29	Db30	Db31	D101	D102	J103	J201	J203	J303	J401	J402	J403	J505	洋中脊	大陆边缘	远洋盆地	
Al/(Al+Fe+Mn)	0.40	0.73	0.80	0.55	0.68	0.80	0.65	0.39	0.70	0.56	0.68	0.62	0.67	0.68				
Al/(Al+Fe)	0.33	0.63	0.73	0.45	0.58	0.73	0.56	0.30	0.64	0.47	0.59	0.52	0.58	0.59	0.12±	0.6±	0.32±	

Fe+Mn)值均在 0.40 左右, 反映受一定的热液作用影响。其他样品点均落在生物成因岩硅质岩区或附近, 说明这些硅质岩属于生物成因, 未受热液活动影响。将研究区硅质岩岩石化学换算后投入  $100 \times (\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2) - 100 \times (\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)$  (图 4(a)),  $\text{Fe}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2) - \text{Al}_2\text{O}_3/(100 - \text{SiO}_2)$  (图 4(b)) 和  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  (图 4(c)) 图解中, 除明显受热液影响的样品(样品 25, 32, 43, 44 和 62)落入洋中脊区不计外, 其他大部分投点落入大陆边缘盆地区及大陆边缘与远洋盆地重叠区, 反映该区的硅质岩主要形成于大陆边缘盆地的构造背景, 部分样品接近于远洋盆地的构造背景。

### 3.2 稀土元素特征

硅质岩的稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )在受陆源影响的环境中含量较高(如大陆边缘盆地和残余盆地), 但在远离陆源的远洋和深海盆地中, 沉积速率越低, 硅质岩在海水中吸附的稀土元素越多<sup>[8-12]</sup>。La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub>和形成环境有关, 与稀土元素总量的趋势一致。在受陆源影响的环境中, 轻稀土富集比较明显(La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub>)=1.49~1.74)。而在远洋和深海盆地中, 轻稀土明显亏损(La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub>为 0.70 左右), 洋中脊更低, 平均为 0.3 左右。硅质岩中的La<sub>n</sub>/Ce<sub>n</sub>与之相反, 大陆边缘的La<sub>n</sub>/Ce<sub>n</sub>为 0.5~1.5, 大洋盆地为 1.0~2.5, 洋中脊为 3.5。硅质岩中的Ce异常 $\delta\text{Ce}$ 受介质性质、陆源供给、沉

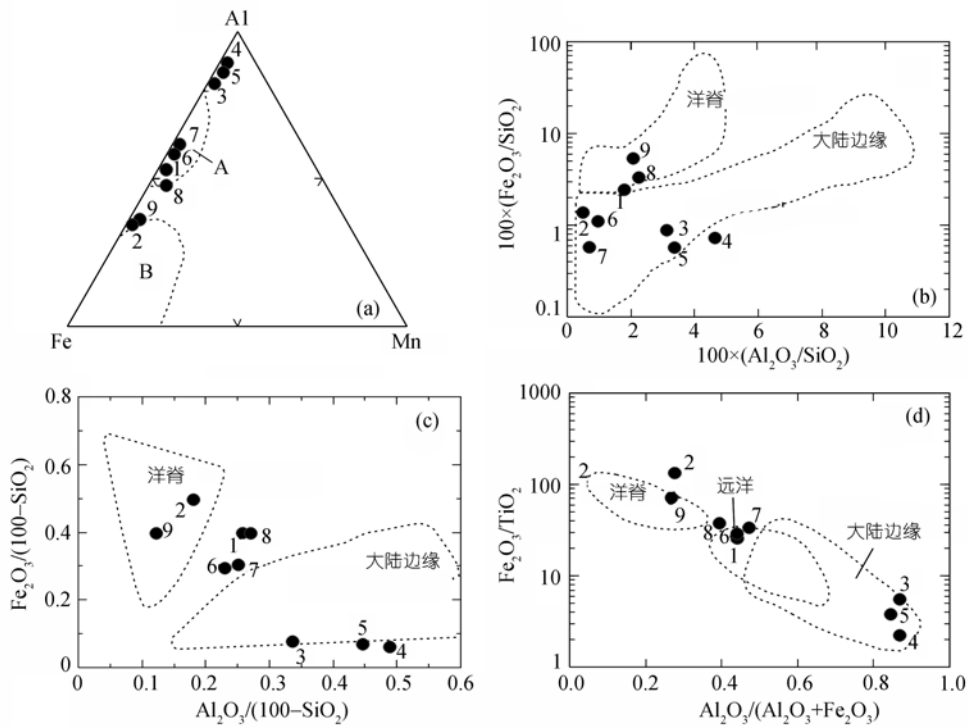


图 2 北祁连寒武系硅质岩常量元素图解

(a) A 示生物成因硅质岩区, B 示热水沉积硅质岩区(据 Adachi 等<sup>[16]</sup>); (b)~(d) (据 Murray<sup>[12]</sup>)

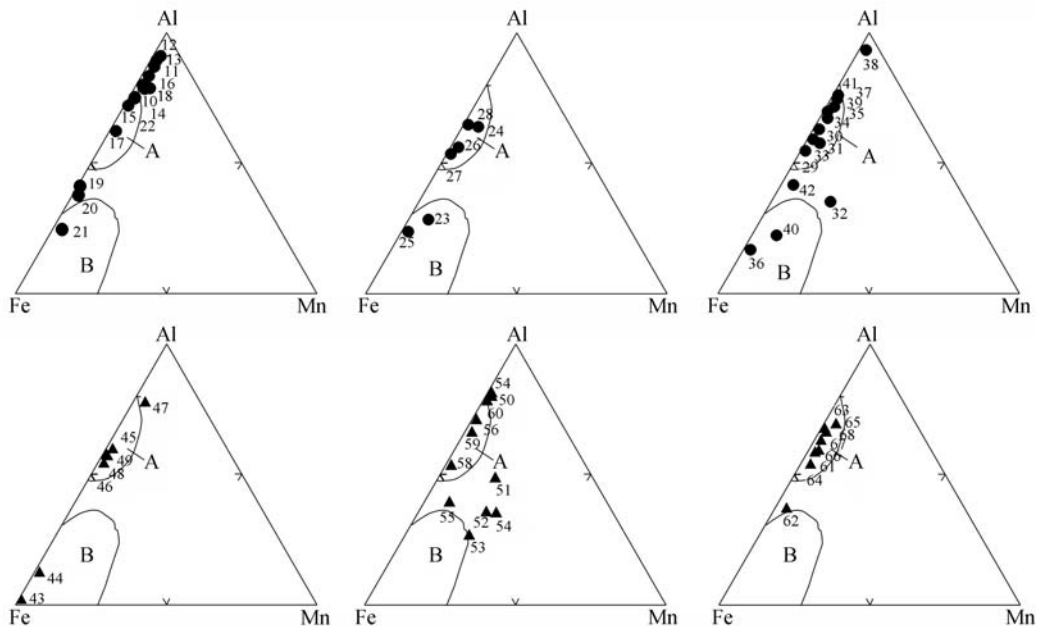


图 3 北祁连奥陶系硅质岩常量元素 Al-Fe-Mn 三角图解

A 示生物成因硅质岩区, B 示热水沉积硅质岩区(据 Adachi 等<sup>[16]</sup>)

积速率影响<sup>[8-12]</sup>. 现代环境研究表明, 河水中 Ce 与其他轻稀土元素没有发生分馏. Elderfield 等<sup>[22]</sup>报道了 40 条河流中  $\delta Ce$  介于 0.7~1.2 之间,  $\delta Ce$  平均值为 1.0. 海湾与河流具有相似的 Ce 异常特征, 近岸海水的

REE 含量与主要河流的流量、注入淡水的体积以及沿岸海水与开放洋盆间的水循环状况有关, 沿岸海水中  $\delta Ce$  与海湾水相似, 在页岩标准化模式图上没有明显的 Ce 异常,  $\delta Ce=0.8\sim 1.2$ . 开放洋盆中海水具有极

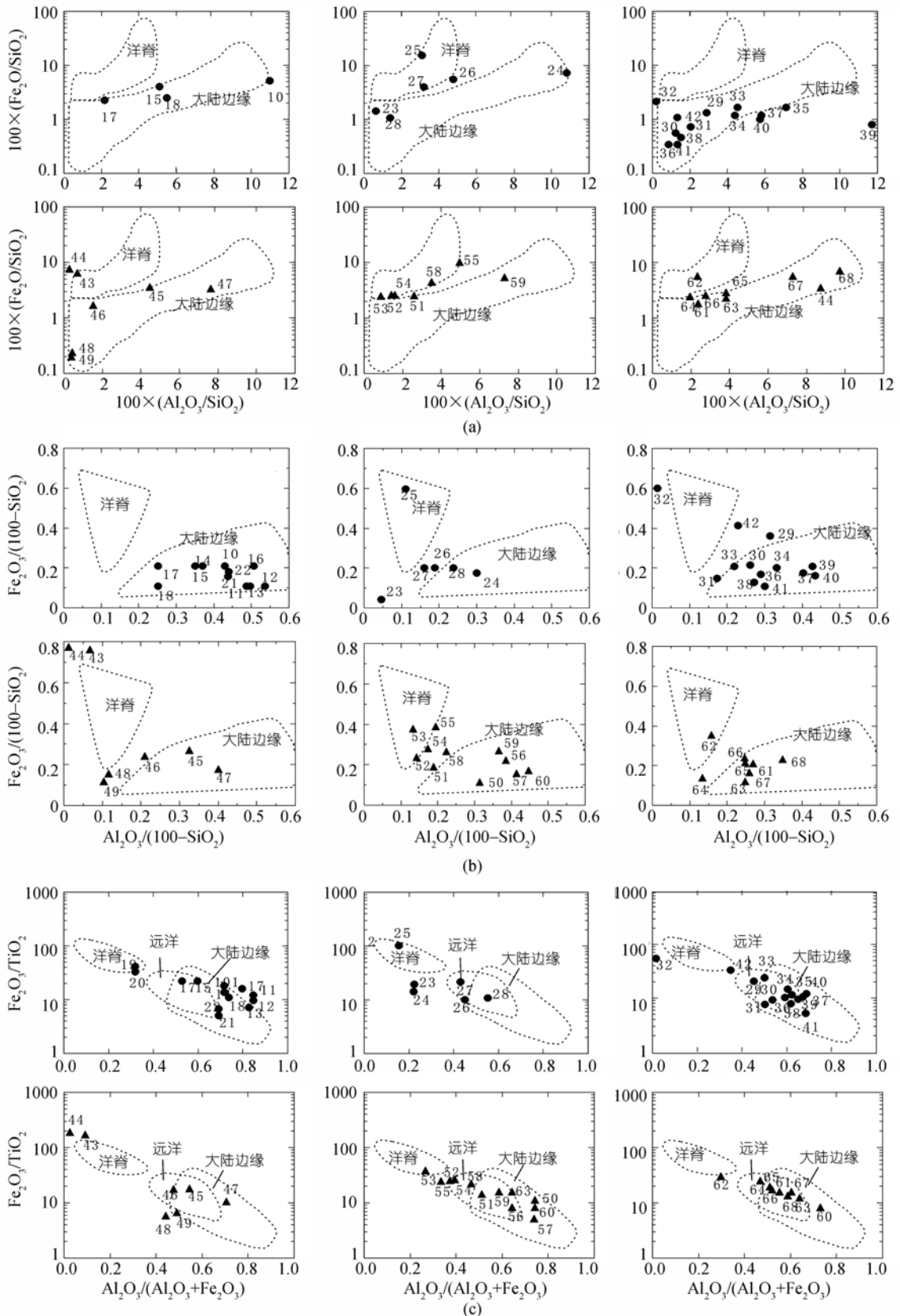


图 4 北祁连奥陶纪硅质岩常量元素图解(据Murray<sup>[12]</sup>)



低的 $\delta\text{Ce}$ 值介于 0.2~0.3 之间,  $\delta\text{Ce}$ 可随海水深度不同而发生变化, 无氧水比含氧水具有更高的值, 反映了氧化还原条件对 Ce 的控制作用<sup>[23]</sup>. 沉积物中 Ce 异常与沉积介质中的 Ce 异常相关. 大陆边缘水体中 Ce 异常亏损不明显, Murray 等<sup>[12]</sup>统计大陆边缘的硅质岩的 $\delta\text{Ce}$ 平均为 0.67~1.35, 受陆源物质影响, 局限海盆或洋盆(如地中海、红海)也没有明显的 Ce 负异常显示. 但典型开放洋盆中海水的 Ce 极度亏损. 深海沉积物表面 Ce 异常明显亏损,  $\delta\text{Ce}=0.25$  左右, 如东太平洋洋隆 2000~3000 m 深处的海水 $\delta\text{Ce}$ 为 0.04. 由此可以看出, Ce 的明显负异常特征可指示远洋环境.

### 3.2.1 寒武系稀土元素特征

由于热液成因的硅质岩稀土元素受热液影响改变了稀土元素构成难以反映硅质岩的构造背景. 因此将上述热液成因的硅质岩剔除, 进行硅质岩的稀土元素特征分析. 北祁连永登甘露池, 天祝石青洞、向前山寒武系黑茨沟组硅质岩稀土元素除个别样品外, 总量总体较低. 其中永登甘露池 3 个样品分别为 93.8, 16.7 和 59.1. 天祝石青洞 1 个样品为 56.7. 天祝向前山 3 个样品最大的为 20.8, 其他的均小于 20(表 4, 5). 上述寒武系黑茨沟组的稀土元素总量反映除甘露池接近大洋盆地外, 其他地区硅质岩为大陆边缘构造背景.

寒武纪 $\text{La}_n/\text{Yb}_n$ 反映的轻重稀土元素分异差别较大. 永登甘露池 3 个样品分别为 1.21, 2.11 和 1.69. 天祝石青洞 1 个样品为 0.74. 天祝向前山 3 个样品分别为 0.77, 0.28 和 0.11(表 5). 上述寒武系黑茨沟组的稀土元素 $\text{La}_n/\text{Yb}_n$ 反映的轻重稀土元素分异说明甘露池更接近于大陆边缘背景, 天祝石青洞、向前山接近于大洋盆地的构造背景. 与 $\text{La}_n/\text{Yb}_n$ 相反, 北祁连寒武纪硅质岩 $\text{La}_n/\text{Ce}_n$ 值除了受热液影响的样品外, 永登甘露池 3 个样品分别为 0.94, 1.04 和 1.44. 天祝石青洞 1 个样品为 1.14. 天祝向前山 3 个样品分别为 1.64, 1.04 和 0.90(表 5). 7 个样品的 $\text{La}_n/\text{Ce}_n$ 值 6 个样品在大陆边缘背景 0.5~1.5 之间, 反映主要为大陆边缘的构造背景. 1 个样品大于 1.5, 接近大洋盆地构造背景.

北祁连寒武纪硅质岩的 $\delta\text{Ce}$ 反映的 Ce 副异常不明显.  $\delta\text{Ce}$ 值 4 个样品介于 0.7~1 之间, 其他样品均大于 1, 不具备 Ce 副异常(表 5), 明显不同于大洋盆地的明显的 Ce 负异常, 接近于大陆边缘盆地的 Ce 异常特征. 甘露池、石青洞两地稀土元素配分模式呈平坦

状(图 5), 即不同于大陆边缘的明显轻稀土元素富集的配分模式, 也不同于开放洋盆的重富集的配分模式. 天祝向前山的硅质岩以北美页岩标准化的稀土元素配分模式图呈重稀土富集的配分特征, 接近于大洋盆地的重稀土富集的配分模式. 反映北祁连寒武纪总体处于距离陆源较远的大陆边缘及远洋盆地的构造背景.

### 3.2.2 奥陶系稀土元素特征

北祁连奥陶纪硅质岩稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )差别较大(表 5). 其中天祝大克岔 9 个样品 2 个样品小于 50, 2 个样品小于 80, 5 个样品大于 100. 天祝黑茨沟 3 个样品均小于 50. 古浪毛毛山中堡群硅质岩的稀土元素总量为 281.7. 景泰崔家墩阴沟组 4 件样品硅质岩稀土元素总量均大于 200. 而景泰老虎山中堡群硅质岩 2 个样品分别为 41.37 和 56.28. 永登石灰沟 14 件样品稀土元素总量有 5 个样品大于 100, 2 个样品在 50~80 之间, 7 个样品小于 50. 玉门肮脏沟阴沟组 2 件样品稀土元素总量小于 30. 肃南边马沟的 1 个硅质岩样品稀土元素总量为 137.30. 肃南九个泉的 2 件样品均小于 70. 白泉门的 8 件样品除样品 J505 为 103.2 外, 其他 7 件样品有 4 件介于 60~80 之间, 4 件小于 60. 大岔大坂 5 件样品 2 件大于 100, 1 件接近 100(Db29 为 94.85), 其他 2 件均小于 60. 反映古浪毛毛山、肃南边马沟、景泰崔家墩为远离陆源的大洋盆地背景, 天祝黑茨沟、景泰老虎山、玉门肮脏沟、九个泉、百泉门为大陆边缘的构造背景. 天祝大克岔、永登石灰沟、肃南大岔大坂介于大陆边缘和大洋盆地之间的构造背景.

北祁连奥陶纪硅质 $\text{La}_n/\text{Yb}_n$ 反映的轻重稀土元素分异也存在差别(表 5). 其中天祝大克岔 9 个样品平均为 0.94, 其中 2 个样品小于 0.5, 2 个样品在 0.5 和 1 之间, 5 个样品大于 1. 天祝黑茨沟 3 个样品为 0.66, 0.68 和 1.58, 平均为 0.97. 古浪毛毛山中堡群硅质岩的 $\text{La}_n/\text{Yb}_n$ 为 1.91. 景泰崔家墩阴沟组 4 件样品均大于 1, 小于 1.5. 而景泰老虎山中堡群硅质岩 2 个样品都大于或接近 1, 小于 1.5. 永登石灰沟 14 件样品平均为 1.24, 其中有 7 个样品大于 1.5, 1 个样品介于 1~1.5 之间, 3 个样品在 0.5~0.8 之间, 3 个样品小于 0.5. 玉门肮脏沟阴沟组 2 件样品均小于 0.5. 肃南边马沟的 1 个硅质岩样品 $\text{La}_n/\text{Yb}_n$ 为 0.95. 九个泉的 2 件样品分别为 0.25 和 0.84. 百泉门 8 件样品平均为 1.37,

表 4 北祁连山寒武纪-奥陶纪硅质岩稀土元素含量表(单位:  $\mu\text{g/g}$ )<sup>a)</sup>

样点	样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
北美	页岩	41	83	10.1	38	7.5	1.61	6.35	1.23	5.5	1.34	3.75	0.63	3.53	0.61
石青洞	S3	9.29	22.4	2.50	10.5	2.44	0.53	2.54	0.46	2.65	0.54	1.38	0.19	1.08	1.00
	G2-1	16.7	35.9	3.16	12.1	2.51	0.37	2.32	0.40	2.13	0.44	1.24	0.17	1.19	0.20
甘露池	G2-2	24.3	46.0	4.73	17.6	3.35	0.48	2.90	0.42	1.93	0.36	0.97	0.13	0.99	0.17
	G2-3	10.8	27.0	1.91	7.13	1.32	0.23	1.22	0.19	0.83	0.17	0.45	0.07	0.55	0.10
向前山	X1	4.29	5.30	0.61	2.89	0.79	3.97	1.10	0.10	0.58	0.12	0.36	0.06	0.48	0.08
	X2	1.42	2.77	0.29	1.39	0.29	0.18	0.42	0.09	0.61	0.14	0.44	0.08	0.43	0.08
	X3	2.06	4.65	0.47	2.25	0.61	0.20	0.67	0.16	1.22	0.33	0.17	0.22	1.68	0.29
	D3	23.0	51.1	4.94	17.8	3.54	0.59	3.15	0.57	3.30	0.68	1.92	0.29	1.91	0.30
	D4	9.64	41.5	2.03	7.10	1.42	0.53	1.40	0.34	2.62	0.66	2.05	0.35	2.32	0.38
	D5	24.0	56.6	5.37	19.4	3.67	0.54	3.10	0.56	3.21	0.69	1.96	0.32	2.17	0.35
大克岔	D6	49.2	104	11.8	41.0	7.34	1.38	6.22	1.01	5.60	1.19	3.26	0.52	3.51	0.57
	D8	29.1	65.2	6.36	23.5	4.54	1.03	4.09	0.71	4.32	1.02	3.06	0.50	3.46	0.56
	D12	9.88	21.6	2.09	7.47	1.48	0.35	1.26	0.21	1.11	0.22	0.61	0.10	0.74	0.12
	D13	40.3	81.4	8.80	30.4	5.44	0.67	4.59	0.79	4.44	0.92	2.52	0.37	2.49	0.38
	D14	2.17	4.46	0.44	1.88	0.41	0.17	0.45	0.09	0.49	0.11	0.32	0.06	0.39	0.06
	D15	15.6	32.2	3.20	11.6	2.20	0.43	2.00	0.33	1.83	0.41	1.12	0.17	1.17	0.19
崔家墩	CJ-2	47.8	91.3	9.78	36.1	6.74	1.36	6.08	0.96	5.27	1.02	2.95	0.37	2.71	0.42
	CJ-5	52.8	84.1	10.8	40.0	7.56	1.42	6.72	1.10	5.98	1.16	3.45	0.44	3.21	0.51
	CJ-8	92.1	169	16.7	58.9	9.46	1.55	8.37	1.14	5.74	1.03	2.91	0.33	2.39	0.37
	CJ-9	49.7	83.0	9.59	35.1	6.53	1.09	5.97	0.96	5.38	1.04	3.10	0.38	2.88	0.46
毛毛山	MM-6	57.6	117	11.5	41.6	7.54	1.64	6.70	0.99	5.18	0.96	2.72	0.34	2.58	0.41
	H7	5.53	12.8	1.44	6.43	1.45	0.54	1.45	0.26	1.44	0.30	0.78	0.11	0.72	0.11
黑茨沟	H8	4.21	9.27	1.04	4.81	1.14	0.43	1.07	0.17	0.90	0.18	0.51	0.08	0.53	0.08
	H9	10.8	20.3	2.01	7.19	1.21	0.34	1.00	0.17	0.89	0.20	0.56	0.09	0.59	0.10
	SH6-5	5.74	65.7	6.93	25.9	4.69	0.89	4.26	0.62	3.16	0.62	1.77	0.22	1.54	0.24
	SH6-7	33.5	63.0	6.70	24.9	4.53	0.84	4.09	0.61	3.11	0.59	1.69	0.21	1.47	0.23
	SH6-8	9.19	15.9	1.67	6.43	1.21	0.28	0.99	0.17	0.88	0.16	0.47	0.06	0.46	0.08
	SH-8	5.70	8.57	1.23	5.79	1.40	0.41	1.60	0.28	1.64	0.33	0.86	0.13	0.82	0.13
	Y301	3.29	6.28	0.79	3.16	0.90	0.27	1.03	0.17	1.27	0.31	0.93	0.15	1.12	0.21
石灰沟	Y302	6.20	10.2	1.29	5.20	1.09	0.32	1.20	0.20	1.27	0.30	0.81	0.12	0.94	0.16
	Y303	6.79	13.0	1.77	7.63	1.65	0.46	1.77	0.28	1.86	0.44	1.32	0.20	1.41	0.24
	Y305	8.56	15.0	1.84	7.59	1.66	0.35	1.90	0.29	1.77	0.40	1.06	0.14	0.99	0.15
	S24-1	27.2	43.6	5.13	18.7	3.26	0.66	2.84	0.44	2.29	0.48	1.38	0.18	1.30	0.20
	S24-3	19.4	28.3	3.19	11.7	2.09	0.44	1.85	0.31	1.50	0.33	0.83	0.12	0.87	0.14
	S26-1	40.5	90.5	8.54	31.1	5.69	1.22	4.98	0.77	4.08	0.81	2.36	0.31	2.30	0.34
	S26-4	27.0	63.2	5.74	20.3	3.56	0.68	2.95	0.40	1.80	0.34	0.89	0.12	0.92	0.14
	S28-1	9.83	17.8	1.90	7.17	1.37	0.34	1.18	0.20	1.10	0.21	0.60	0.09	0.59	0.09
老虎山	L07-3	8.92	18.5	1.57	6.26	1.32	0.59	1.23	0.22	1.16	0.24	0.59	0.09	0.59	0.09
	L11-2	12.1	24.1	2.41	9.66	1.96	0.47	1.70	0.26	1.34	0.30	0.85	0.13	0.85	0.15
肮脏沟	S034	2.69	3.70	0.44	1.87	0.46	0.15	0.53	0.09	0.65	0.15	0.49	0.09	0.67	0.12
	S032	3.47	4.59	0.65	2.75	0.51	0.12	0.53	0.11	0.80	0.20	0.60	0.09	0.68	0.12
九个泉	D b8	5.36	10.9	1.66	7.84	2.36	0.79	2.84	0.60	3.81	0.87	2.28	0.32	2.09	0.34
	Db14	9.74	18.2	2.11	8.53	1.70	0.41	1.97	0.30	1.81	0.40	1.09	0.17	1.13	0.19
边马沟	Db21	19.9	40.3	5.60	23.1	5.12	1.39	5.12	0.87	5.46	1.11	3.01	0.38	2.69	0.36
	Db29	15.2	33.1	3.99	14.6	2.78	0.67	2.65	0.42	2.73	0.59	1.76	0.26	1.98	0.28
大岔大坂	Db30	38.9	71.8	9.32	33.2	5.96	1.19	5.84	0.92	6.40	1.36	4.01	0.53	3.95	0.54
	Db31	19.6	26.1	4.74	19.8	4.30	1.21	5.05	0.86	6.44	1.32	3.93	0.53	3.85	0.52
	D101	6.06	10.5	1.43	6.38	1.60	0.43	1.80	0.35	2.66	0.57	1.90	0.29	2.00	0.30
	D102	5.51	9.89	1.40	6.31	1.69	0.41	1.92	0.35	2.40	0.57	1.73	0.27	1.90	0.29
	J103	9.52	15.4	2.12	8.41	1.86	0.50	2.04	0.33	2.12	0.50	1.38	0.19	1.39	0.21
	J201	10.4	17.9	2.69	11.1	2.60	0.52	2.46	0.43	2.42	0.54	1.41	0.19	1.19	0.19
	J203	8.15	14.2	1.85	7.20	1.59	0.38	1.71	0.28	1.70	0.41	1.05	0.16	1.04	0.16
百泉门	J303	3.00	6.58	0.60	2.52	0.64	0.18	0.71	0.12	0.70	0.16	0.46	0.08	0.63	0.11
	J401	10.3	15.9	2.03	7.73	1.65	0.41	1.58	0.26	1.61	0.36	0.95	0.13	0.91	0.15
	J402	9.21	12.7	1.71	6.69	1.23	0.34	1.30	0.22	1.26	0.27	0.77	0.11	0.83	0.14
	J403	13.5	23.7	2.94	11.2	2.15	0.49	2.31	0.34	2.23	0.47	1.37	0.20	1.37	0.21
	J505	16.8	33.8	4.13	15.8	3.35	0.74	3.15	0.51	3.33	0.71	2.08	0.29	1.91	0.30

a) 中国地质大学地质过程和矿产资源国家重点实验室 ICP-MS 测试

表 5 北祁连山寒武纪-奥陶纪硅质岩稀土元素特征值表

	北美页岩	S3	G2-1	G2-2	G2-3	X1	X2	X3	D3	D4	D5	D6	D8	D12	D13	D14
$\Sigma$ REE	204	56.7	93.8	116.7	59.1	20.8	8.7	15.0	113.1	72.3	121.9	236.6	147.5	47.2	183.5	11.5
$\delta$ Ce	1	1.14	1.20	1.04	1.44	0.77	1.05	1.16	1.17	2.29	1.22	1.06	1.17	1.16	1.06	1.11
La <sub>n</sub> /Ce <sub>n</sub>	1	0.84	0.94	1.07	0.81	1.64	1.04	0.90	0.91	0.47	0.86	0.96	0.90	0.93	1.00	0.98
La <sub>n</sub> /Yb <sub>n</sub>	1	0.74	1.21	2.11	1.69	0.77	0.28	0.11	1.04	0.36	0.95	1.21	0.72	1.15	1.39	0.48
	D15	CJ-2	CJ-5	CJ-8	CJ-9	MM-6	H7	H8	H9	SH6-5	SH6-7	SH6-8	SH-8	Y301	Y302	Y303
$\Sigma$ REE	72.5	213	219	370	205	281.7	33.4	24.4	45.5	151.3	145.5	37.9	38.5	20.9	30.0	38.8
$\delta$ Ce	1.11	1.03	0.86	1.04	0.93	1.11	1.10	1.09	1.06	1.03	1.03	0.98	0.79	0.95	0.88	0.92
La <sub>n</sub> /Ce <sub>n</sub>	0.98	1.06	1.27	1.10	1.21	1.00	0.87	0.92	1.08	0.60	0.61	0.66	1.35	0.71	0.69	0.59
La <sub>n</sub> /Yb <sub>n</sub>	1.15	1.06	1.27	1.10	1.21	1.91	0.66	0.68	1.58	1.95	1.96	1.72	0.60	0.25	0.57	0.41
	Y305	S24-1	S24-3	S26-1	S26-4	S28-1	L07-3	L11-2	5034	5032	Db8	Db14	Db21	Db29	Db30	Db31
$\Sigma$ REE	41.7	107.6	71.1	193.4	128.1	42.2	41.37	56.28	19.1	24.1	61.58	58.86	137.3	94.85	216.1	136.9
$\delta$ Ce	0.92	0.90	0.86	1.06	1.10	1.00	1.19	1.09	0.82	0.74	0.79	0.87	0.83	0.93	0.82	0.59
La <sub>n</sub> /Ce <sub>n</sub>	0.65	0.71	0.78	0.51	0.49	0.63	0.98	1.00	1.46	1.53	1.12	1.22	0.87	1.05	1.24	1.52
La <sub>n</sub> /Yb <sub>n</sub>	0.74	1.80	1.92	1.52	2.53	1.43	0.98	1.02	0.35	0.44	0.25	0.25	0.95	0.74	0.95	0.69
	D101	D102	J103	J201	J203	J303	J401	J402	J403	J505	大陆边缘	远洋盆地	洋中脊			
$\Sigma$ REE	50.24	49.65	60.30	66.68	50.81	21.77	52.95	44.01	74.14	103.2						
$\delta$ Ce	0.78	0.78	0.75	0.73	0.80	1.06	0.74	0.69	0.82	0.88	0.67-1.35	0.25	0.04			
La <sub>n</sub> /Ce <sub>n</sub>	0.77	0.97	1.11	0.95	0.98	0.80	1.48	1.37	0.79	0.87	0.5-1.5	1.0-2.5	3.5			
La <sub>n</sub> /Yb <sub>n</sub>	0.59	0.96	2.36	1.28	0.90	0.60	1.10	2.94	0.88	0.89	1.49-1.74	0.7	0.3			

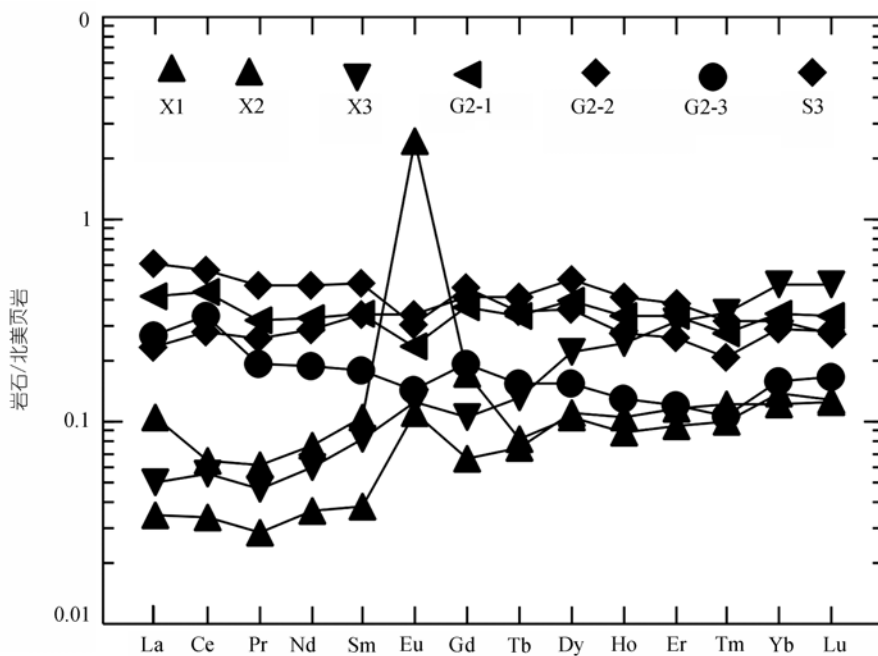


图 5 北祁连寒武系硅质岩稀土元素配分图

其中有 4 件样品小于 1, 2 件样品大于 1.5, 2 件样品在 1~1.5 之间. 大岔大坂 5 件样品平均为 0.79, 其中 2 件接近 1, 其他 3 件均大于 0.6, 小于 0.9. La<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> 值反

映玉门肮脏沟为远离大陆边缘的大洋盆地背景, 其他地区主要为受不同程度的陆源影响的大陆边缘背景. 北祁连奥陶纪硅质 La<sub>n</sub>/Ce<sub>n</sub> 值绝大部分在 0.5~1.5

之间(表 5), 总体属于大陆边缘构造成因。

北祁连奥陶纪硅质岩的  $\delta Ce$  反映的 Ce 副异常不明显. 其中 15 个样品  $\delta Ce$  值大于 1, 不具备 Ce 副异常. 其他样品均介于 0.6~1 之间(表 5), 明显不同于大洋盆地和洋中脊的明显的 Ce 负异常, 接近于大陆边缘盆地的 Ce 异常特征. 从北美页岩标准化的稀土元素配分模式图可以看出, 天祝大克岔、景泰崔家墩、永登石灰沟、古浪老虎山的样品和肃南大岔大坂、百泉门、九个泉的大部分样品稀土配分模式呈平坦状(图 6), 景泰崔家墩稀土配分模式略呈右倾的轻稀土元素富集的配分模式, 肃南边马沟、九个泉、玉门肮脏购和肃南大岔大坂、百泉门的少部分样品略呈左倾的重稀土元素富集的配分模式. 这种稀土配分模式即不同于大陆边缘的明显右倾的轻稀土元素富集配分模式, 也不同于开放洋盆的明显左倾的重稀土富集配分模式, 反映北祁连奥陶系主要处于远离陆源区的大陆边缘和深海盆地背景。

综上所述, 北祁连奥陶纪的硅质岩沉积地球化学特征具有明显不同于典型大陆边缘-远洋盆地的特征. 与海沟、岛弧、弧后盆地共生的不同地区的硅质岩的构造背景既缺乏典型的陆源供应充裕的大陆边缘特征, 也不是典型的远洋盆地特征, 反映总体为远离陆源区的大陆边缘-有限洋盆背景. 这种结果与徐学义等<sup>[24]</sup>、钱青等<sup>[25]</sup>对北祁连老虎山、石灰沟的分

析结果一致. 值得指出的是, 徐学义等<sup>[24]</sup>对玉石沟、川刺沟与洋脊伴生的硅质岩进行了研究. 玉石沟、川刺沟与洋脊伴生的硅质岩  $\delta Ce$  为 0.51~0.75, 平均值为 0.63,  $La_n/Yb_n$  为 0.32~0.51, 平均值为 0.37. 其构造背景即不是典型的大陆边缘, 更不是典型的远洋盆地。

### 4 讨论

北祁连加里东期的构造演化, 尤其是奥陶纪的构造背景, 一直存在裂谷盆地、坳拉槽盆地和大洋盆地的不同认识<sup>[1,2]</sup>. 一些学者认为, 北祁连从新元古代末期是在晚元古代Rodinia联合大陆基础上裂解, 经由寒武纪华北板块南缘开始裂陷形成裂谷盆地<sup>[3,26-28]</sup>, 早奥陶世形成了大洋和沟-弧-盆体系<sup>[2,5,29]</sup>. 冯益民、何世平<sup>[3]</sup>认为北祁连早古生代存在板块机制, 但早古生代的火山岩和基性超基性杂岩的构造背景为陆缘及陆内裂陷和裂谷环境. 葛肖虹和刘俊来<sup>[1]</sup>认为奥陶纪为坳拉槽盆地而非大洋盆地. 志留纪-早、中泥盆世华北板块和柴达木地块碰撞造山形成北祁连山加里东造山带的前陆盆地<sup>[26-28]</sup>. 对北祁连早古生代构造背景的不同认识的主要原因在于奥陶纪的盆地成因类型的认识不同. 从北祁连元古代到早古生代的构造演化及沉积地球化学特征可以看出北祁连早古生代可能不是典型的裂谷盆地, 也不是典型的大洋盆地, 而是一个宽阔的多岛洋盆地。

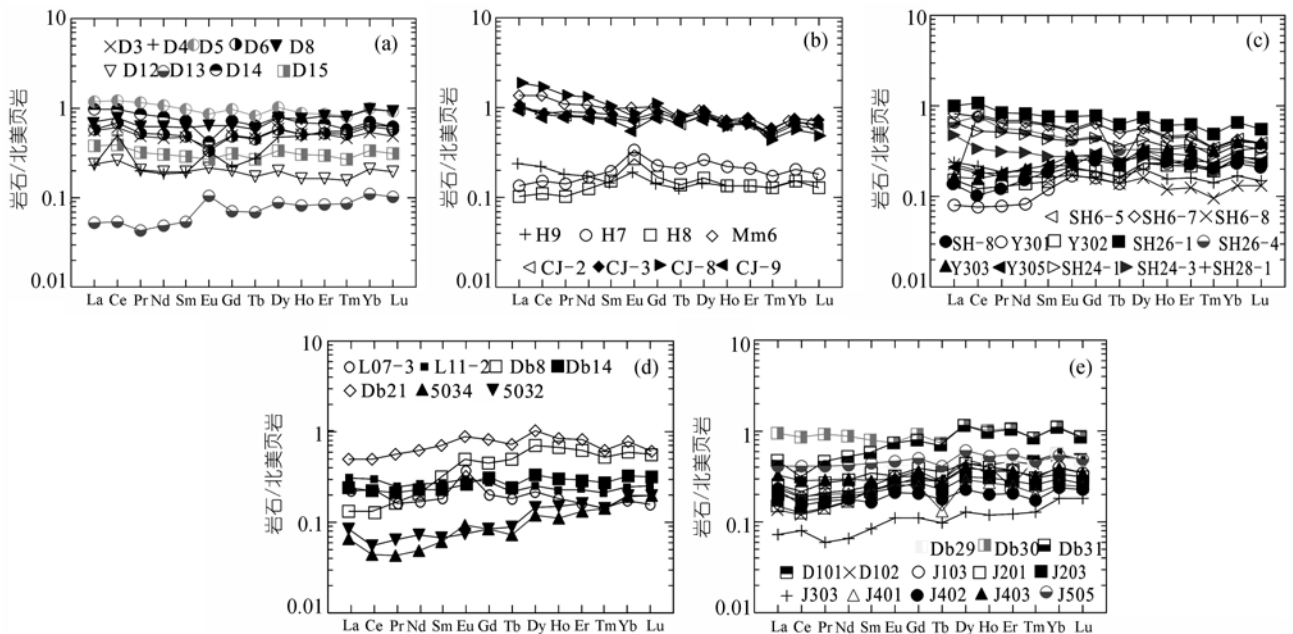


图 6 北祁连奥陶系稀土元素配分图

北祁连山早元古代的“北大河岩群”中、高级变质岩为该区的变质基底。北祁连和河西走廊的“阿拉善运动”和南、中祁连的“煌源运动”形成了中、上元古界底部的区域不整合。该区中元古界-上元古界碎屑岩、火山岩和火山碎屑岩、含叠层石和鲕粒的碳酸盐岩及泥质岩的地层序列与华北蓟县的中、上元古界及华南神农架的中、上元古界类似。北祁连震旦系大部缺失,发育于北祁连西段肃北地区的震旦系与青白口系角度不整合接触,其他地区寒武系不整合于上元古界青白口系之上,岩性以碎屑岩、白云岩、泥质岩、火山碎屑岩为主。因此在元古代后期,位于华南、华北之间的北祁连-北秦岭元古代洋盆已经萎缩或闭合,对应于 Rodinia 超大陆的形成。

北祁连寒武系黑茨沟组以火山岩、火山碎屑岩为主,夹少量细碎屑岩、硅质岩及灰岩透镜体。火山岩为海底火山熔岩、火山碎屑岩,双峰式火山喷发特征反映其为典型的大陆裂谷火山活动的产物<sup>[5]</sup>。寒武系香毛山组为浅变质的碎屑岩、泥质岩夹结晶灰岩,局部夹火山碎屑岩,反映北祁连裂谷扩展过程中,并没有形成一个统一、完整的裂谷体系,而是又由一系列裂隙槽和断隆起区组成的裂谷群。左国朝等<sup>[30]</sup>对北祁连中-西段陆壳残块群的研究认为,寒武纪北祁连存在一系列残余陆块群,也说明寒武纪北祁连并没有形成完整、统一的裂谷体系。寒武系黑茨沟组硅质岩的常量元素 Al/(Al+Fe+Mn) 值(除热液影响的样品)平均为 0.794, Al/(Al+Fe) 值平均为 0.627,  $\delta\text{Ce}$  值平均为 1.114,  $\text{La}_n/\text{Yb}_n$  值平均为 0.994,  $\text{La}_n/\text{Ce}_n$  平均为 1.034。天祝向前山的硅质岩以北美页岩标准化的稀土元素配分模式呈重稀土富集的配分特征,接近于大洋盆地的重稀土富集的配分模式。甘露池、石青洞两地稀土元素配分模式呈平坦状(图 5),即不同于大陆边缘的明显轻稀土元素富集的配分模式,也不同于开放洋盆的重富集的配分模式。这些稀土元素特征特征反映寒武纪硅质岩形成于靠近或远离陆源的大陆边缘裂谷盆地的构造背景。

北祁连奥陶纪的火山岩及蛇绿岩组合的研究均表明了大洋盆地的存在。北祁连早奥陶世阴沟组、车轮沟群)和早、中奥陶世中堡群火山岩以溢流相为主,局部发育喷发相,以块状和枕状熔岩为主。祁连玉石沟-川刺沟-小八宝、边马沟-清水沟-百经寺、肃南大岔大坂蛇绿岩带组成的深层俯冲杂岩代表奥陶纪大

洋-海沟俯冲杂岩组合;肃南白泉门、九个泉和景泰老虎山的蛇绿岩及浅层次俯冲杂岩代表奥陶纪弧后盆地的俯冲杂岩组合<sup>[6]</sup>。肃南大岔大坂北侧发育岛弧火山岩,岛弧火山岩的北侧的肃南九个泉、百泉门-景泰老虎山一线发育弧后盆地的火山岩<sup>[31,32,6,29]</sup>。九个泉、老虎山的弧后火山岩的常量元素、微量元素和稀土元素也具有弧后盆地火山岩特征<sup>[29]</sup>。因此似乎北祁连地区早奥陶世发育了典型的具沟、弧、盆体系的活动大陆边缘,其中大岔大坂为火山岛弧带,该带以南的边马沟、玉石沟的蛇绿岩带为海沟俯冲和洋脊蛇绿杂岩,该带北侧的百泉门、九个泉一带为弧后盆地。

然而奥陶纪硅质岩的研究却与上述结论不完全一致<sup>[33-35]</sup>。北祁连自西向东、由南向北深层次俯冲杂岩(玉石沟、川刺沟、边马沟、大岔大坂)、浅层次俯冲杂岩(九个泉、百泉门、肮脏沟、石灰沟、老虎山、毛毛山、崔家墩等)共生的硅质岩的沉积地球化学特征反映上述各带均不是典型的大洋盆地和洋中脊的构造背景。Al/(Al+Fe+Mn) 值(除热液影响的样品)平均为 0.72, Al/(Al+Fe) 值平均为 0.58,  $\delta\text{Ce}$  值平均为 0.99,  $\text{La}_n/\text{Yb}_n$  值平均为 1.09,  $\text{La}_n/\text{Ce}_n$  平均为 0.96。北祁连东段(天祝大克岔、景泰崔家墩、永登石灰沟、古浪老虎山)奥陶纪硅质岩以北美页岩标准化的稀土元素配分模式呈平坦状。西段(肃南大岔大坂、百泉门、九个泉)奥陶纪硅质岩的稀土元素配分模式既有平坦状也有略呈左倾的重稀土元素富集的配分模式,东段景泰崔家墩稀土配分模式略呈右倾的轻稀土元素富集的配分模式(图 6)。这些特征即不同于大陆边缘的明显轻稀土元素富集的配分模式,也不同于开放洋盆的重富集的配分模式,反映上述各种类型盆地硅质岩的构造背景不是典型的远洋盆地和洋中脊背景,而是部分靠近、部分远离陆源的大陆边缘深水盆地、多岛洋的构造背景。

值得指出的是,北祁连中奥陶世妖魔山组巨厚的块状灰岩覆盖在下奥陶世中堡群火山岩和火山碎屑岩之上,在古浪县古浪峡、天祝峡口驿、永登石灰沟等地,块状灰岩厚度达 50~80 m,灰岩除底部、顶部外,中部大部分岩层没有层面分隔,为一巨大的块体,横向上也呈一丘状隆起。因此为一典型的碳酸盐建隆。该建隆除局部发育少量的生物之外,没有发现由造架生物形成的骨架岩,也没有发育由粘结生物形成的粘结岩、由障积生物形成的障积岩及生物灰岩

等, 其主要岩性为灰泥岩及少量的含生物灰岩. 因此该碳酸盐建隆是一个灰泥丘. 除此之外, 青海境内的“乱石堆灰岩”也属于灰泥丘沉积. 因此, 在北祁连奥陶系的碳酸盐建隆应该是广泛分布的. 这些碳酸盐建隆正是形成于奥陶纪火山岛或水下隆起之上的浅水碳酸盐建隆, 也指示北祁连加里东期古洋盆是一个多岛洋盆.

晚加里东到早海西期(志留纪-早、中泥盆世)是北祁连沉积盆地与构造演化的转换时期. 奥陶纪的多岛洋盆地经中祁连地块、柴达木微板块与华北板块的碰撞而闭合, 形成前陆盆地早期的早、中志留世复理石沉积、前陆盆地晚期的晚志留世的海相磨拉石和早、中泥盆世的陆相磨拉石沉积, 组成了典型的前陆盆地沉积序列, 反映为北祁连经历了多岛洋盆地向前陆盆地转化过程<sup>[26-28]</sup>. 南祁连志留系下部巴龙贡噶尔组的复理石组合和上泥盆统的牦牛山组下部的陆相磨拉石组合及两组之间的角度不整合接触关系也反映了类似的沉积盆地和构造演化过程.

综上所述, 北祁连早古生代的古海洋是在

Rodinia 超大陆的基础上裂解而成的, 并经历了震旦纪-寒武纪非完整、统一的裂谷系, 早-中奥陶世的多岛洋, 中-晚奥陶世的残余盆地, 志留纪-早、中泥盆世的前陆盆地的演化过程.

从更大范围上讲, 柴达木微板块南北侧、中祁连地块和北祁连均处于原特提斯洋东缘的多岛洋背景(图 7). 柴达木微板块到中祁连地块之间, 还发育柴北缘、野马南山-木里-拉脊山两条蛇绿岩带. 其中柴北缘蛇绿岩带沿塞什腾山、锡铁山、埃姆尼克山、牦牛山一线分布, 北西走向, 内夹早古生代碳酸盐岩、浊积岩和蛇绿岩, 为陆相泥盆系不整合覆盖. 蛇绿岩共生的火山岩、花岗岩的Rb-Sr同位素年龄为 442~464 Ma<sup>[36]</sup>. 野马南山-木里-拉脊山蛇绿岩带沿大雪山、托莱南山、大通山南麓、拉脊山一带分布, 带内卷入地层包括早古生代深水碎屑岩、碳酸盐岩、及蛇绿岩块体, 其中拉脊山具有典型的蛇绿岩层序. 玄武岩的富Na、贫K、Ti特征及稀土元素配分型式表明其为陆间裂谷性小洋盆环境<sup>[36]</sup>. 柴达木盆地南侧东昆仑的康西瓦-木孜塔格-玛沁蛇绿岩带、中昆仑蛇

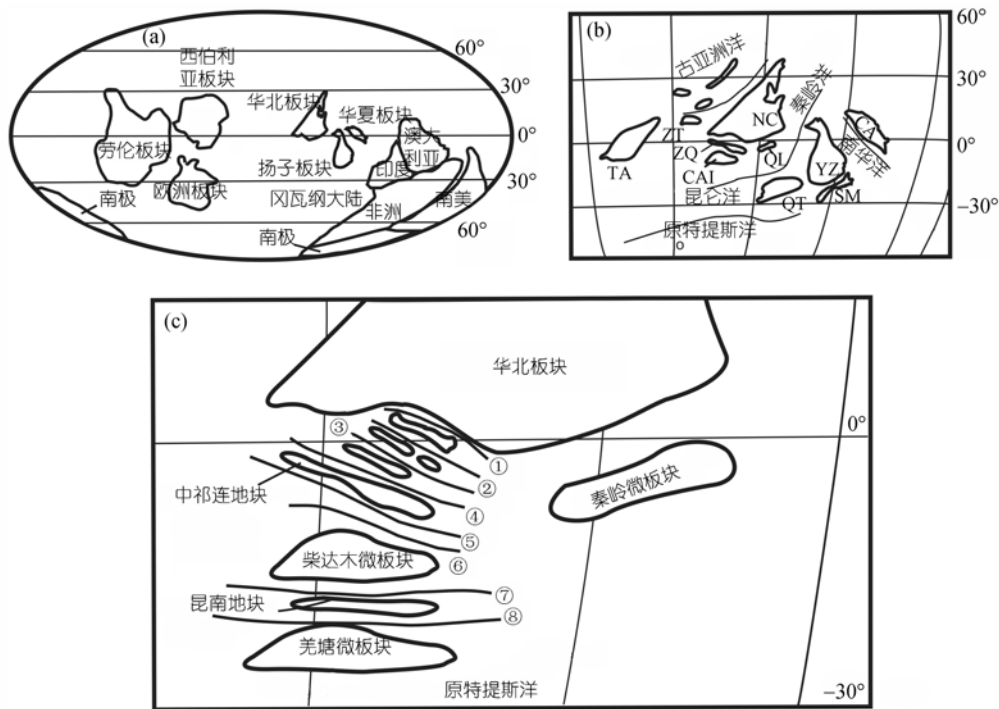


图 7 北祁连及邻区奥陶纪多岛洋示意图

(a) 奥陶纪全球古大陆分布图(据McKerrow和Scotes<sup>[37]</sup>修改); (b) 东特提斯早奥陶世古大陆分布图(据潘桂棠等<sup>[38]</sup>修改); (c) 北祁连及邻区早奥陶世多岛洋分布图; (b) TA-塔里木板块, NC-华北板块, YZ-扬子板块, CA-华夏板块, ZQ-中祁连地块, QL-秦岭微板块, CAI-柴达木微板块, ZT-中天山微板块, QT-羌塘微板块; (c) ① 榆树沟-九个泉、百泉门-老虎山蛇绿岩带, ② 大盆大坂蛇绿岩带, ③ 边马沟-百经寺蛇绿岩带, ④ 玉石沟-川刺沟-小八宝蛇绿岩带, ⑤ 野马南山-木里-拉脊山蛇绿岩带, ⑥ 柴北缘蛇绿岩带, ⑦ 中昆仑蛇绿岩带, ⑧ 康西瓦-木孜塔格-玛沁蛇绿岩带

绿岩带也包括加里东晚期的蛇绿岩<sup>[36]</sup>。因此从东昆仑、柴达木、南祁连、中祁连到北祁连组成了原特提斯东侧的多岛洋盆地(图 7)。位于康西瓦-木孜塔格-玛沁蛇绿岩带以南的羌塘微板块的羌北地区奥陶系饮水河群为一套石英砂岩夹砂页岩,志留系普尔错群以灰岩为主,上部有石英砂岩、岩屑石英砂岩和粉砂岩。而羌南地区没有早古生代地层出露。根据晚古生代羌塘微板块仍然与扬子板块具有亲缘关系<sup>[36]</sup>,推测主原特提斯洋应位于羌塘微板块南侧的班公湖-怒江缝合带。

## 5 结论

(1) 硅质岩常量元素  $Al/(Al+Fe+Mn)$ ,  $Al/(Al+Fe)$  及其他判别指标和稀土元素  $\Sigma REE$ ,  $La_n/Yb_n$ ,  $La_n/Ce_n$ ,  $\delta Ce$  等可以作为构造背景的判别指标,对东特提斯造山带沉积盆地构造背景的恢复具有重要意义。

(2) 北祁连甘露池、向前山、大克岔、黑茨沟、玉石沟、川刺沟、边马沟、大岔大坂、九个泉、百泉门、肮脏沟、石灰沟、老虎山、毛毛山、崔家墩等地寒武纪-奥陶纪硅质岩的  $Al/(Al+Fe)$ ,  $\Sigma REE$ ,  $La_n/Yb_n$ ,  $La_n/Ce_n$ ,  $\delta Ce$  等沉积地球化学特征,以及早古生代沉积特征与构造演化,反映北祁连寒武纪-奥陶纪的构造背景不是典型的远洋盆地和洋中脊背景,而是部分靠近、部分远离陆源的大陆边缘深水盆地、多岛洋的构造背景。

(3) 北祁连及相邻的南祁连、东昆仑及藏北地区存在的多条早古生代的蛇绿岩带也说明该区处于原特提斯洋东侧的多岛洋背景。

## 参 考 文 献

- 葛肖虹, 刘俊来. 北祁连造山带的形成与背景. 地学前缘, 1999, 6: 223-230
- 张旗, 王焰, 钱青. 北祁连早古生代洋盆是裂陷槽还是大洋盆-与葛肖虹讨论. 地质科学, 2000, 35(1): 121-128
- 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用. 北京: 地质出版社, 1996. 1-135
- 甘肃省地质矿产局. 甘肃省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997. 1-134
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社, 1996. 1-153
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山早古生代洋脊-洋岛和弧后盆地火山作用. 地质学报, 1998, 72(4): 301-312
- Aitchison J C, Flood P G. Geochemical constraints on the depositional setting of Palaeozoic cherts from the New England orogen, NSW, eastern Australia. Mar Geol, 1990, 94(2): 79-95[DOI]
- Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Jone D L, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments of chert and shale. Geology, 1990, 18: 268-271[DOI]
- Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Gerlach D C, et al. Rare earth, major, and trace element in chert from Franciscan complex and Monterey Group: assessing REE source to fine-grained marine sediments. Geochim Cosmochim Acta, 1991, 55: 1875-1895[DOI]
- Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Gerlach D C, et al. Rare earth, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis. Geochim Cosmochim Acta, 1992, 56: 2657-2671[DOI]
- Murray R W, Jone D L, Buchholtz Ten Brink M R. Diagenetic formation of bedded chert: evidence from chemistry of the chert-shale couplet. Geology, 1992, 20: 271-274[DOI]
- Murray R W. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications. Sediment Geol, 1994, 90: 213-232[DOI]
- 丁林, 钟大赉. 滇西昌宁-孟连带古特提斯洋硅质岩稀土元素和铀异常特征. 中国科学 B 辑, 1995, 25(1): 93-100
- Yasuhiro K, Kyoko N, Yukio I. Geochemistry of Late Permian to Early Triassic pelagic cherts from southwest Japan: implications for an oceanic redox change. Chem Geol, 2002, 182(1): 15-34
- 周永章, 涂光炽, Chown E H, 等. 粤西古水震旦系顶部层状硅岩的热成因属性. 沉积学报, 1994, 12(3): 1-9
- 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. Sediment Geol, 1986, 47: 125-148[DOI]
- Bostrom K, Peterson M N A. The origin of Al-poor ferromagnesian sediments in areas of high heat flow on the East Pacific Rise. Mar Geol, 1969, 7: 427-447
- Bostrom K, Kraaemer T, Gartner S. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments. Chem Geol, 1973, 11: 132-148
- Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shimanto Terranes. Sediment Geol, 1987, 52: 65-108[DOI]
- Sugisaki R, Yamamoto K, Adachi M. Triassic bedded cherts in central Japan are not pelagic. Nature, 1982, 268: 644-647[DOI]
- Hein J R, Vallier T L, Allan M A. chert petrology and geochemistry, Mid-Pacific Mountains Hess Rise, deep sea drilling project. Lnit Rep DSDP, 1981, 62: 711-748
- Elderfield H, Goddard R U, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal sea and their significance to the composition of ocean water. Geochim Cosmochim Acta, 1990, 54: 971-991[DOI]
- Ormiston A E, Lane H R. A unique radiolarian fauna from the Sycamore Limestone (Mississippiian) and its biostratigraphic significance. Palaeont Abt A, 1976, 154(4-6): 158-180

- 24 徐学义, 赵江天, 李向民, 等. 北祁连山早古生代硅质岩稀土元素特征及其构造意义. 地质科技情报, 2003, 22(3): 22—26
- 25 钱青, 张旗, 孙晓猛, 等. 北祁连老虎山玄武岩和硅岩的地球化学特征及形成环境. 地质科学, 2001, 36(4): 444—453
- 26 杜远生, 张哲, 周道华, 等. 北祁连-河西走廊志留纪和泥盆纪古地理及其同造山过程的沉积响应. 古地理学报, 2002, 4 (4): 1—8
- 27 Du Y, Wang J, Han X, et al. From flysch to molasse-the sedimentary and tectonic evolution of the late Caledonian-early Hercynian foreland basin in North Qilian Mountains. J China Univ of Geosci, 2003, 13(1): 1—7
- 28 杜远生, 朱杰, 韩欣, 等. 从弧后盆地到前陆盆地-北祁连造山带晚加里东-早海西期的沉积盆地与构造演化. 地质通报, 2004, (9-10): 911—917
- 29 夏林祁, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山奥陶纪弧后火山岩浆成因. 中国地质, 2003, 30 (1): 48—60
- 30 左国朝, 刘义科, 张崇. 北祁连造山带中-西段陆壳残块群的构造-地层特征. 地质科学, 2002, 37(3):302—312
- 31 张旗, 孙晓猛, 周德进. 北祁连蛇绿岩特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 1997, 12(4): 366—393
- 32 孙晓猛, 张旗, 钱青. 甘肃肃南白泉门地区蛇绿岩地质特征. 地球科学进展, 1997, 12(4): 340—350
- 33 杜远生, 朱杰, 顾松竹. 北祁连肃南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. 地球科学, 2006, 31(1): 101—109
- 34 杜远生, 朱杰, 顾松竹. 北祁连永登石灰沟奥陶纪硅质岩地球化学特征及大地构造意义. 地质论评, 2006, 52(2): 186—189
- 35 朱杰, 杜远生. 北祁连老虎山硅质岩特征及形成环境. 古地理学报, 2007, 9(1): 70—76
- 36 潘桂堂, 丁俊. 青藏高原及邻区地质图说明书. 北京: 地图出版社, 2004. 1—133
- 37 McKerrow W S, Scotcs C R. Palaeozoic paleogeography and biogeography. Geol Society Mem, 1990, 1—363
- 38 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社, 1997. 163—165