

北祁连清水沟红帘石变硅质岩矿物学、原岩特征 及地质意义

郭晶^{1,2}, 张建新², 李云帅^{2,3}, 武亚威², 李国倩³, 周开³, 郭祺², 毛小红²

(1. 天津商业大学 管理学院, 天津 300134; 2. 自然资源部大陆动力学重点实验室, 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037; 3. 天津大学 地球系统科学学院, 表层地球系统科学研究院, 天津 300072)

摘要: 北祁连早古生代大洋俯冲带以发育早古生代的蛇绿(混杂)岩带及高压低温变质带为特征。在清水沟高压低温混杂岩片中出露蛇纹岩以及榴辉岩、蓝片岩、红帘石硅质岩和多硅白云母石英片岩等典型高压低温变质岩石。本文对北祁连清水沟含红帘石的变硅质岩进行了详细的岩相学、矿物化学及地球化学分析,发现该岩石主要由石英、多硅白云母、红帘石、石榴子石、蓝闪石、单斜辉石以及砷硅锰矿、赤铁矿等矿物组成,结合矿物化学及围岩变质条件,推测该岩石可能也经历了高压低温榴辉岩相变质作用。全岩地球化学分析结果表明,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩的原岩为远洋环境沉积的含泥硅质岩,由于热液活动的参与,使得Fe、Mn富集沉积,进而与大陆活动边缘或大陆岛弧物质被卷入到俯冲带中,共同经历了高压低温变质作用。变硅质岩中红帘石、砷硅锰矿以及石榴子石中大量的赤铁矿包裹体表明该岩石形成于高氧逸度条件,而石榴子石中的Fe³⁺从核部到边部的降低趋势,也表明俯冲变质过程中氧逸度的变化,这一过程释放的氧所形成的流体对于探究岩石圈地幔氧逸度变化、岛弧岩浆生成以及俯冲带氧循环等方面具有重要的意义。

关键词: 红帘石; 富锰变硅质岩; 高氧逸度; 榴辉岩相变质; 北祁连

中图分类号: P588.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)02-0238-12

Mineralogy, protolith and geological implication of piemontite-bearing metacherts in Qingshuigou, North Qilian

GUO Jing^{1,2}, ZHANG Jian-xin², LI Yun-shuai^{2,3}, WU Ya-wei², LI Guo-qian³, ZHOU Kai³, GUO Qi² and MAO Xiao-hong²

(1. School of Management, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China; 2. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Earth System Science, Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The North Qilian is characterized by the early Paleozoic ophiolite and high-pressure/low-temperature metamorphic rocks, such as serpentinite, eclogite, blueschist and metasedimentary rocks. In this study, a detailed petrographic, mineral-chemical, and geochemical analysis is presented on the piemontite-bearing metacherts in Qingshuigou, North Qilian. The piemontite-bearing metacherts are mainly composed of quartz, phengite, piemontite, garnet, glaucophane, clinopyroxene, ardennite, and hematite. Based on the mineral assemblage, mineral chemistry, and the *p-T* conditions of the country rocks, the piemontite-bearing metacherts may have undergone low-temperature and high-pressure eclogite-facies metamorphism. Whole-rock geochemistry suggested that the protolith of the piemontite-bearing metacherts was argilliferous cherts deposited in the oceanic environment with the participation

收稿日期: 2023-12-18; 接受日期: 2024-01-22; 编辑: 宋会侠

基金项目: 国家自然科学基金(U2344214, 42072237); 自然资源部大陆动力学重点实验室开放课题基金(J2306)

作者简介: 郭晶(1989-), 女, 讲师, 研究方向为矿物学(含宝石矿物学)与岩石学, E-mail: guojing5322@126.com。

of hydrothermal activities which resulted in the deposition of Fe and Mn. They were involved in the subduction zone with the materials from the continental active margin or continental island arc, and then experienced low-temperature and high-pressure metamorphism. The piemontite, ardennite, spessartite, and many inclusions of hematite in garnet indicated that the piemontite-bearing metacherts experienced a condition of high oxygen fugacity, which also recorded by the decreases of the Fe^{3+} from core to rim of the garnet. Oxygen released in this process played a significant role in the exploration of oxygen fugacity in the lithosphere mantle, the generation of island arc magma, and the oxygen cycle in a subduction zone.

Key words: piemontite; Mn-rich metachert; high oxygen fugacity; eclogite-facies metamorphism; North Qilian

Fund support: National Natural Science Foundation of China (U2344214, 42072237); Fund of the Key Laboratory of Continental Dynamics of Ministry of Natural Resources (J2306)

作为解译地球物质循环与深部地球动力学过程的重要场所,俯冲带对研究岛弧火山岩成因和地幔氧逸度变化具有重要的作用(Kelly and Cottrell, 2009)。大量研究证据表明,大洋地壳在高压条件下的变质脱水所产生的流体对于改变俯冲带地幔楔的氧逸度状态和岛弧拉斑玄武岩的形成具有重要的影响(Song *et al.*, 2009; Evans, 2012)。而大洋岩石圈上覆的泥质、硅质沉积物在俯冲过程中发生变质脱水作用,可提供丰富的流体来源。前人对于泥质岩在俯冲过程中的流体变化做了深入的研究(Song *et al.*, 2007; 王伟等, 2009; 苟龙龙等, 2009),然而硅质沉积物的影响尚不清晰。

硅质岩常见于造山带俯冲增生杂岩中,并记录了大洋板块从洋中脊产生到海沟消亡的沉积过程,从而为探究地质历史时期海洋演化提供关键的信息(张立杨, 2023)。此外,由于大洋硅质沉积物通常含有大量的Fe、Mn氧化物,在发生脱水变质作用的同时还可发生系列的氧化还原反应,因而,其在探究岩石圈地幔氧逸度变化、岛弧岩浆生成以及俯冲带物质循环等方面具有重要的意义(Ague *et al.*, 2022; Song *et al.*, 2022)。红帘石[分子式: $\text{Ca}_2(\text{Mn, Fe})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$]作为帘石矿物族中的重要成员,是帘石中的Al在低温、高压和高氧逸度条件下被Mn、Fe替代而生成的,因而红帘石可作为低温、高压条件下变质的标型矿物,它在研究造山带变质作用和寻觅古残余洋壳俯冲带和古大陆碰撞缝合带等方面具有重要的意义(Keskinen and Liou, 2010; 王道轩等, 2011)。

北祁连造山带以发育不同时代、不同构造环境的层序完整的蛇绿岩套、高压低温变质岩(蓝片岩和低温榴辉岩)、混杂堆积及俯冲增生楔为特征(肖序常等, 1978; 吴汉泉, 1980; 许志琴等, 1994; 冯益

民等, 1995),经历了早古生代洋壳俯冲及其之后的陆-陆碰撞,是一个具有典型沟-弧-盆体系的加里东期造山带(许志琴等, 1994; 许志琴, 1997)。清水沟地区位于青海省祁连县县城八宝镇以西约40 km,是研究北祁连山高压变质作用的经典地区之一,该地区出露有蛇纹岩、榴辉岩、蓝片岩、多硅白云母片岩、变硅质岩等不同类型的高压低温变质岩。前人在该区富锰硅质岩中发现了富As矿物——砷硅锰矿(叶诗婷等, 2019),并对变质过程中Mn价态变化所导致的氧逸度变化进行了探究(Song *et al.*, 2022),但是硅质岩在俯冲变质过程中的变质条件及其原岩特征尚不清晰。本文拟对北祁连清水沟含红帘石的变硅质岩进行详细的岩相学、矿物化学及地球化学分析,并探讨其形成的构造环境,从而为进一步确定北祁连造山带的深部地球动力学过程提供重要信息。

1 地质背景

北祁连造山带位于阿拉善地块与祁连地块之间,呈NWW-SEE走向,被认为是典型的早古生代板块缝合带,其西端被阿尔金断裂切割,并可能继续向西延至北阿尔金,东与西秦岭北部相连,属横贯中国东西的秦-祁-昆巨型造山带的一部分。该缝合带宽约80~120 km,主要由产于不同时代、不同构造环境的层序完整的蛇绿岩套、高压低温变质岩(蓝片岩和低温榴辉岩)、混杂岩及俯冲增生楔组成(肖序常等, 1978; 吴汉泉, 1980; 许志琴等, 1994; 冯益民等, 1995)。北祁连造山带发育有典型的洋壳俯冲形成的早古生代(490~460 Ma)高压低温变质带(吴汉泉, 1980; Liou *et al.*, 1989; Wu *et al.*, 1993; 宋述光, 1997; 张建新等, 1997; Song *et al.*,

2007; Zhang *et al.*, 2007), 还识别出硬柱石榴辉岩和含纤柱石的高压变沉积岩(张建新等, 2006; Zhang *et al.*, 2007; Song *et al.*, 2007; Wei and Song, 2008), 表明俯冲洋壳可能把大量的水带到地幔深处。对高压低温变质带的变形构造的研究也显示其经历了与大洋俯冲有关的变形作用(张建新等, 1995, 1998; Zhang *et al.*, 2012, 2019), 保存有俯冲界面(隧道)的变形构造样式(张建新, 2020)。与高压低温变质带伴生的早古生代增生杂岩(楔)、火山岛弧、弧后盆地及不同类型的蛇绿岩(MOR 和 SSZ 型)(许志琴等, 1994; Xia *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2014; Yan *et al.*, 2021), 具有典型增生造山带的物质组成。

北祁连早古生代大洋俯冲带分布在阿拉善地块和祁连地块之间, 以发育早古生代的蛇绿(混杂)岩带及高压低温变质带为特征。与北祁连早古生代大洋俯冲带相关的地质单元以北祁连中段最为典型(图 1a), 其中除具有典型的蛇绿(混杂)岩和高压低温变质岩外, 还发育早古生代火山弧及弧后盆地, 形成类似于现今西太平洋的“沟-弧-盆”板块构造体系(许志琴等, 1994; 夏林圻等, 1996; 张建新等, 1997, 1998; Xia *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2009; Song *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2019), 已有的研究把与北祁连早古生代俯冲作用及随后的碰撞造山主要相关的地质体划分成不同的构造单元, 自南而北分别为蛇绿岩-蛇绿混杂岩带、高压低温变质带、火山岛弧带、弧后盆地和叠置在以上单元之上的晚志留纪-泥盆纪磨拉石盆地。

清水沟高压变质单元位于青海省祁连县县城八宝镇以西约 40 km, 是北祁连山高压变质作用的经典研究地区之一。在清水沟剖面, 可观察到蛇纹岩和榴辉岩、蓝片岩、红帘石变硅质岩、多硅白云母片岩等典型的高压低温变质岩石(图 1b)。

2 岩相学

含红帘石的变硅质岩新鲜面呈紫红色, 具有明显的面理和拉伸线理, 并发育不对称褶皱(图 2a、2b)。采样坐标为 N38°19.518', E99°50.92'。

含红帘石变硅质岩的组成矿物粒度细小, 呈细粒变晶结构, 主要由石英、多硅白云母、红帘石、石榴子石、蓝闪石、单斜辉石以及少量富锰和砷的矿

物、赤铁矿、磷灰石等矿物组成(图 2)。其中石英含量大于 70%, 呈拉长定向排列, 具有波状消光和动态重结晶结构, 反映了明显的晶内塑性变形。石榴子石呈粒状结构, 粒度较小, 自形程度高, 部分石榴子石具有丰富的赤铁矿包裹体。红帘石粒度较小, 粉红色, 分布不均匀, 大部分沿片理定向排列, 且多发育垂直片理的微节理或被拉断, 局部可见红帘石集合体。多硅白云母和蓝闪石自形程度较好, 其中多硅白云母呈片状, 蓝闪石呈板柱状, 部分截面呈菱形的柱状。单斜辉石以粒状结构散落于石英颗粒之间, 周围分布有多硅白云母和赤铁矿, 部分颗粒蚀变强烈。需要注意的是, 此类岩石含有一种富锰和砷的矿物, 前人的研究确定其为 ardenite, 并将其中文名称命名为砷硅锰矿(叶诗婷等, 2019), 该矿物呈长条状或粗纤维状的集合体, 淡黄色到亮黄色, 且多色性较好(图 2e)。

3 矿物化学

矿物的电子探针成分分析在天津地调中心实验室完成, 仪器型号为日本岛津公司出产的 EPMA-1600 型电子探针仪, 加速电压为 15 kV, 束流 20 nA, 电子束斑直径为 5 μm , 并采用 ZAF 校正方法。 Fe^{3+} 的计算据 Droop (1987)。各矿物代表性的电子探针分析结果见表 1。

3.1 石榴子石

3 个含红帘石变硅质岩样品中的石榴子石成分差异不大, 均以富含锰铝榴石端员分子为主, 而钙铁榴石、钙铝榴石和镁铝榴石分子含量相对较少。其中 MnO 含量为 35.04%~37.41%, 相应的锰铝榴石端员组分为 82.61%~89.73%。石榴子石成分剖面图(图 3)显示这些石榴子石无明显的成分环带, 即在石榴子石的核部和边部成分相对均匀, 各端员分子相对变化不大。需要说明的是, 这 3 个含红帘石变硅质岩样品中的石榴子石的 Fe^{3+} 含量呈现规律性的变化: 从核部到边部 Fe^{3+} 含量略微降低(图 3), 且电子探针数据计算结果表明石榴子石核部的 Fe 几乎全部为 Fe^{3+} 。

3.2 红帘石

电子探针分析结果表明, 清水沟含红帘石变硅质岩中的红帘石主要以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 CaO 等成

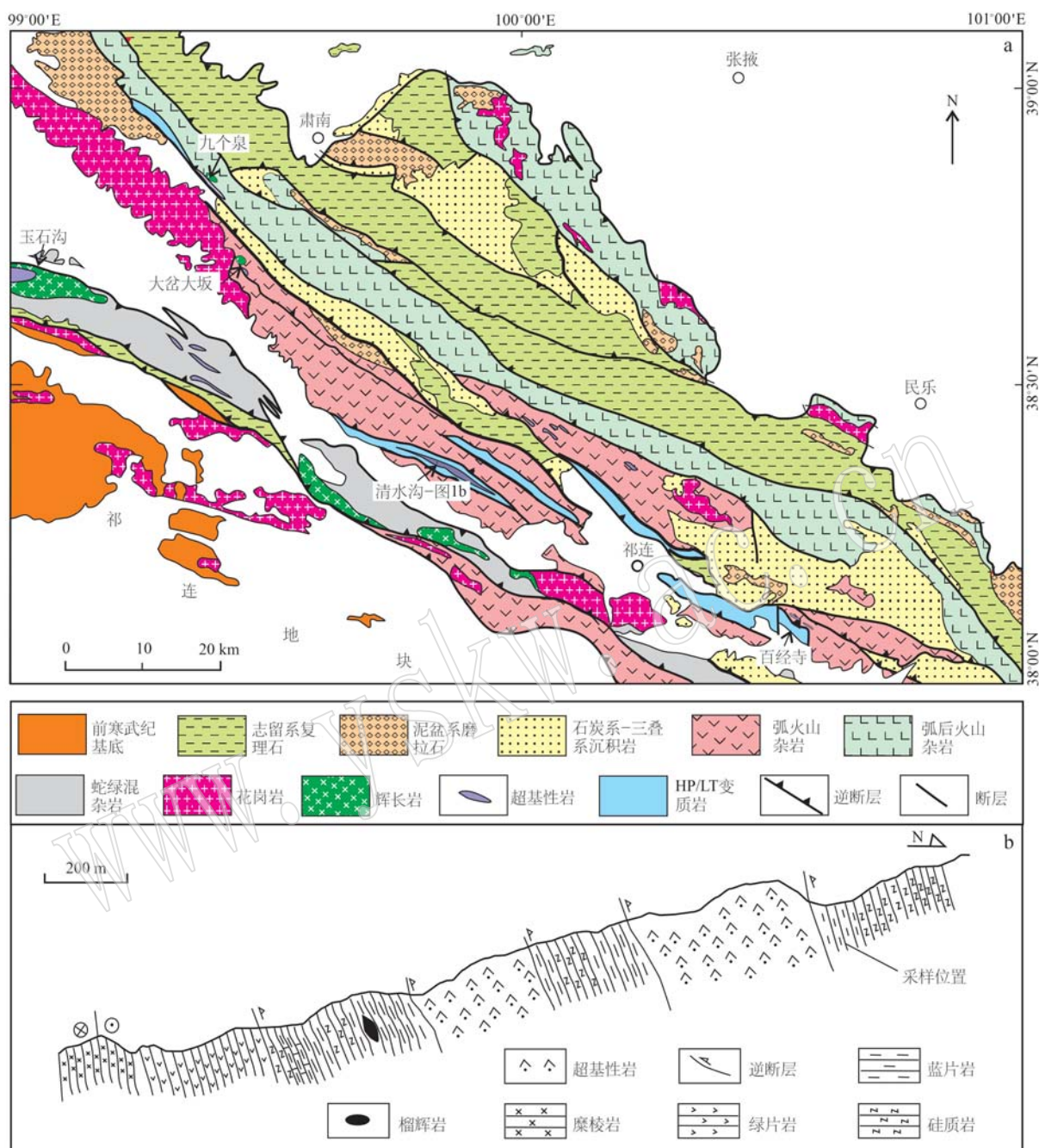


图1 北祁连造山带中段地质简图(a, 据 Zhang *et al.*, 2012, 2019)和北祁连清水沟野外观察剖面(b)

Fig. 1 Simplified geological map of the middle part in the North Qilian orogen (a, after Zhang *et al.*, 2012, 2019) and geological profile in Qingshuigou, North Qilian (b)

分为主, 其中 SiO_2 含量为 35.59%~37.45%, Al_2O_3 含量为 17.78%~19.54%, FeO 含量为 6.98%~8.51%, CaO 含量为 17.96%~19.57%。此外, 红帘石含有不等量的 MnO , 含量变化于 9.68%~11.45% 之间。

3.3 多硅白云母

多硅白云母主要以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 FeO 、 MgO 等成分为主, 同时含有不等量的 Na_2O (0.24%~2.24%)。其中 SiO_2 含量变化于 49.97%~56.65% 之间, 相应的 Si 含量为 3.37~3.72。 Al_2O_3 含量为

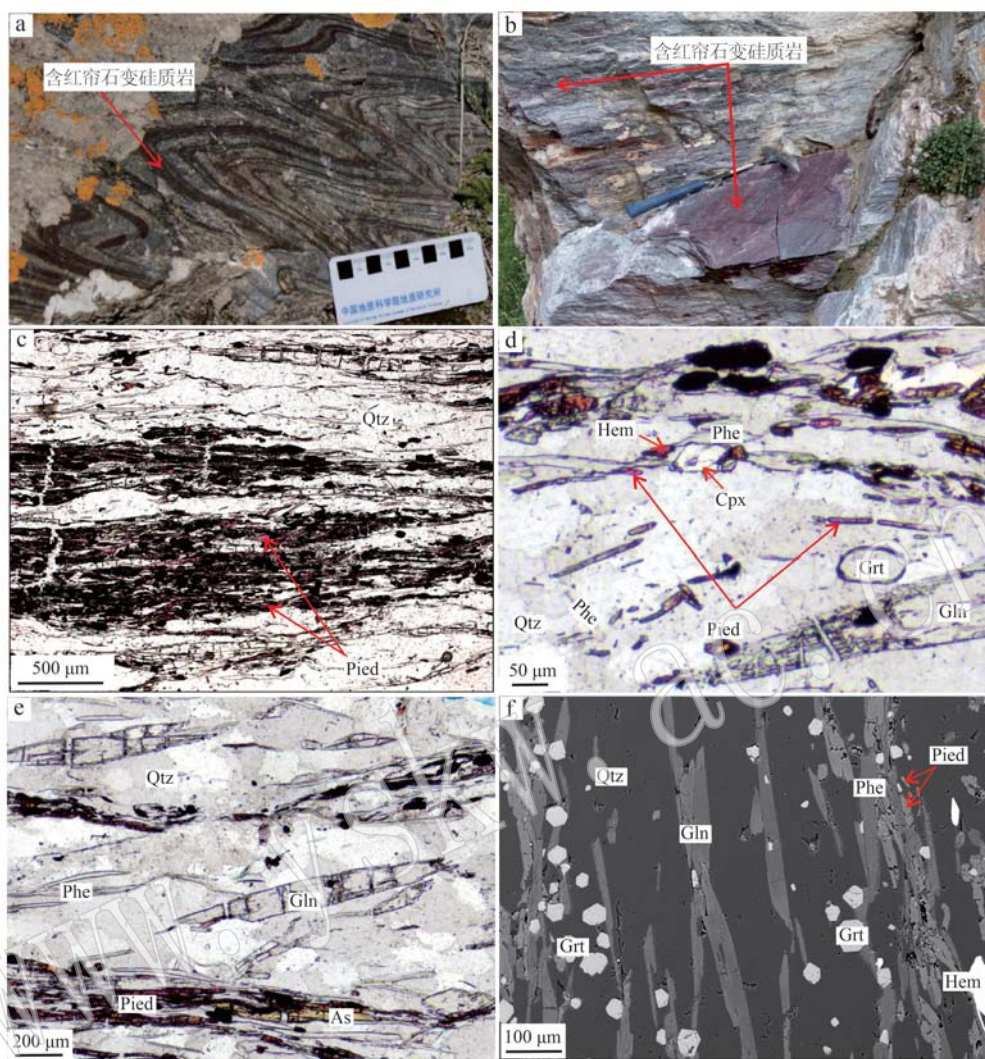


图 2 清水沟含红帘石变硅质岩野外(a,b) 及显微照片(c~e; 单偏光; f: 背散射)

Fig. 2 Field photos(a, b) and photomicrographs(c~e: plane polarized light; f: back-scattered electron image) of the piemontite-bearing metacherts in Qingshuigou

Qtz—石英; Pied—红帘石; Gln—蓝闪石; Grt—石榴子石; Cpx—单斜辉石; Phe—多硅白云母; As—砷硅锰矿; Hem—赤铁矿
Qtz—Quartz; Pied—piemontite; Gln—glaucophane; Grt—garnet; Cpx—clinopyroxene; Phe—phengite; As—ardennite; Hem—hematite

22.59% ~ 28.76%, FeO 含量为 2.55% ~ 3.62%, K_2O 含量为 7.81% ~ 10.58%, MgO 含量为 2.55% ~ 3.55%。

3.4 单斜辉石

电子探针数据分析结果表明, 北祁连清水沟含红帘石变硅质岩中的单斜辉石的硬玉分子变化于 33.8% ~ 42.3% (摩尔分数) 之间, 在 WEF-Jd-Ae 三角图中落在绿辉石-霓辉石之间的区域(图 4a)。

3.5 蓝闪石

电子探针分析结果表明, 蓝闪石在成分上属于

蓝闪石-青铝闪石(图 4b), $Mg/(Mg+Fe^{2+})$ 值变化于 28.08 ~ 30.96 之间, 其中 TiO_2 含量变化于 0.02% ~ 0.06% 之间, MnO 含量变化于 0.46% ~ 0.64% 之间。

3.6 砷硅锰矿

前人对该矿物已进行了详细的研究, 电子探针分析结果表明, 砷硅锰矿[分子式: $Mn_4Al_4(AlMg)(Si_3O_{10})(SiO_4)_2(AsO_4, VO_4)(OH)_6$]主要以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MnO 等为主, 还含有少量的 Cu、V、F 等微量元素(叶诗婷等, 2019)。

表 1 北祁连清水沟含红帘石变硅质岩各矿物代表性的电子探针分析结果

 $w_B/\%$

Table 1 Representative mineral composition of the piemontite-bearing metacherts in Qingshuigou, North Qilian

矿物	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	单斜辉石		石榴子石		蓝闪石		多硅白云母		红帘石	
SiO ₂	55.04	55.49	35.49	35.48	58.94	58.82	54.51	56.65	36.95	37.15
TiO ₂	0.05	0.04	0.12	0.16	0.04	0.06	0.14	0.11	0.05	0.01
Al ₂ O ₃	9.39	9.13	20.16	19.89	7.73	7.27	26.64	22.60	19.09	18.78
Cr ₂ O ₃	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.02	0.05	0.01
FeO	17.45	17.34	1.73	2.07	6.27	6.78	3.12	3.07	7.24	8.13
MnO	0.53	0.71	35.87	36.11	0.49	0.46	0.28	0.23	9.88	10.52
MgO	2.30	2.59	0.90	0.77	15.18	15.12	3.55	3.22	0.08	0.07
CaO	2.63	2.91	5.51	4.52	0.51	0.48	0.00	0.00	19.27	18.36
Na ₂ O	11.99	12.50	0.04	0.04	7.23	7.23	0.44	0.24	0.00	0.03
K ₂ O	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	9.15	10.24	0.01	0.02
Total	99.42	100.77	99.85	99.06	96.40	96.26	97.83	96.38	92.62	93.08
Si	2.904	2.924	1.989	1.978	8.008	8.020	3.502	3.715	3.165	3.172
Ti	0.007	0.010	0.001	0.001	0.004	0.006	0.007	0.005	0.003	0.001
Al	1.945	1.933	0.400	0.384	1.238	1.169	2.018	1.747	1.928	1.890
Cr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.117	0.141	0.461	0.491	0.499	0.541	0.059	0.000	0.513	0.575
Fe ²⁺	0.001	0.001	0.066	0.026	0.214	0.232	0.109	0.168	0.005	0.009
Mn	2.486	2.521	0.016	0.021	0.056	0.053	0.015	0.013	0.717	0.761
Mg	0.110	0.094	0.124	0.138	3.074	3.072	0.340	0.315	0.010	0.009
Ca	0.484	0.399	0.102	0.111	0.074	0.070	0.000	0.000	1.769	1.679
Na	0.007	0.006	0.840	0.864	1.905	1.911	0.055	0.031	0.000	0.005
K	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.750	0.857	0.001	0.002

4 变质温压条件的确定

由于缺少合适的地质温压计和富锰的热力学数据,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩的变质温压条件难以精确限定。大量研究表明北祁连造山带清水沟-香子沟地区的榴辉岩、绿帘石蓝片岩及变泥质岩经历了榴辉岩相的低温高压变质作用(Zhang *et al.*, 2007, 2012; Song *et al.*, 2007; Wei and Song, 2009; 林宜慧等, 2012; 喻星星等, 2016)。上述提及,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩主要由石英、石榴子石、红帘石、多硅白云母、蓝闪石、赤铁矿、砷硅锰矿和单斜辉石等矿物。其中单斜辉石的成分落在绿辉石-霓辉石之间,石榴子石+绿辉石的组合表明该寄主岩石可能经历了榴辉岩相变质作用,同时与石榴子石、辉石和石英共生的多硅白云母中硅含量高达 3.72,亦可指示高压条件。此外,红帘石作为低温、高压区域变质作用的标型矿物,是绿帘石中的 Al 在低温、高压条件下的区域变质条件下被 Fe、Mn 替代而生成。研究表明,红帘石的形成通常与高压、高氧逸度等物化条件有关(Keskinen and Liou, 2010; 王道轩等, 2011)。因此,我们推测北祁

连清水沟含红帘石变硅质岩可能也经历了低温高压榴辉岩相的变质条件。

5 全岩主微量地球化学

全岩主量及微量元素的测试在自然资源部国家地质实验测试中心进行。主量元素通过 XRF(X 荧光光谱仪 3080E)方法测试,其中氧化物 FeO、H₂O⁺、LOI 和 CO₂ 的检测方法依据分别为 GB/T14506.14-1993、GB/T14506.2-1993、LYT1253-1999 和 GB1835-1988,其他主量元素的检测依据为 GB/T14506.28-1993。微量元素和稀土元素通过等离子质谱仪(ICP-MS)分析,检测方法依据 DZ/T0223-2001,其中 Nb、Ta、Zr 和 Hf 用碱溶法和沉淀酸提取,用等离子质谱法测定。

含红帘石变硅质岩的全岩主微量和稀土元素的地球化学分析结果见表 2,5 个含红帘石变硅质岩样品的 SiO₂ 含量变化在 83.04%~85.47%之间,Al₂O₃ 含量变化于 4.65%~5.72%之间,FeO* 含量变化于 3.47%~5.16%之间,MnO 含量变化于 0.62%~0.84%之间。在 Fe₂O₃/TiO₂-Al₂O₃/(Fe₂O₃+Al₂O₃)图解上,1 个样品落在了远洋盆地,4 个样品落在远洋

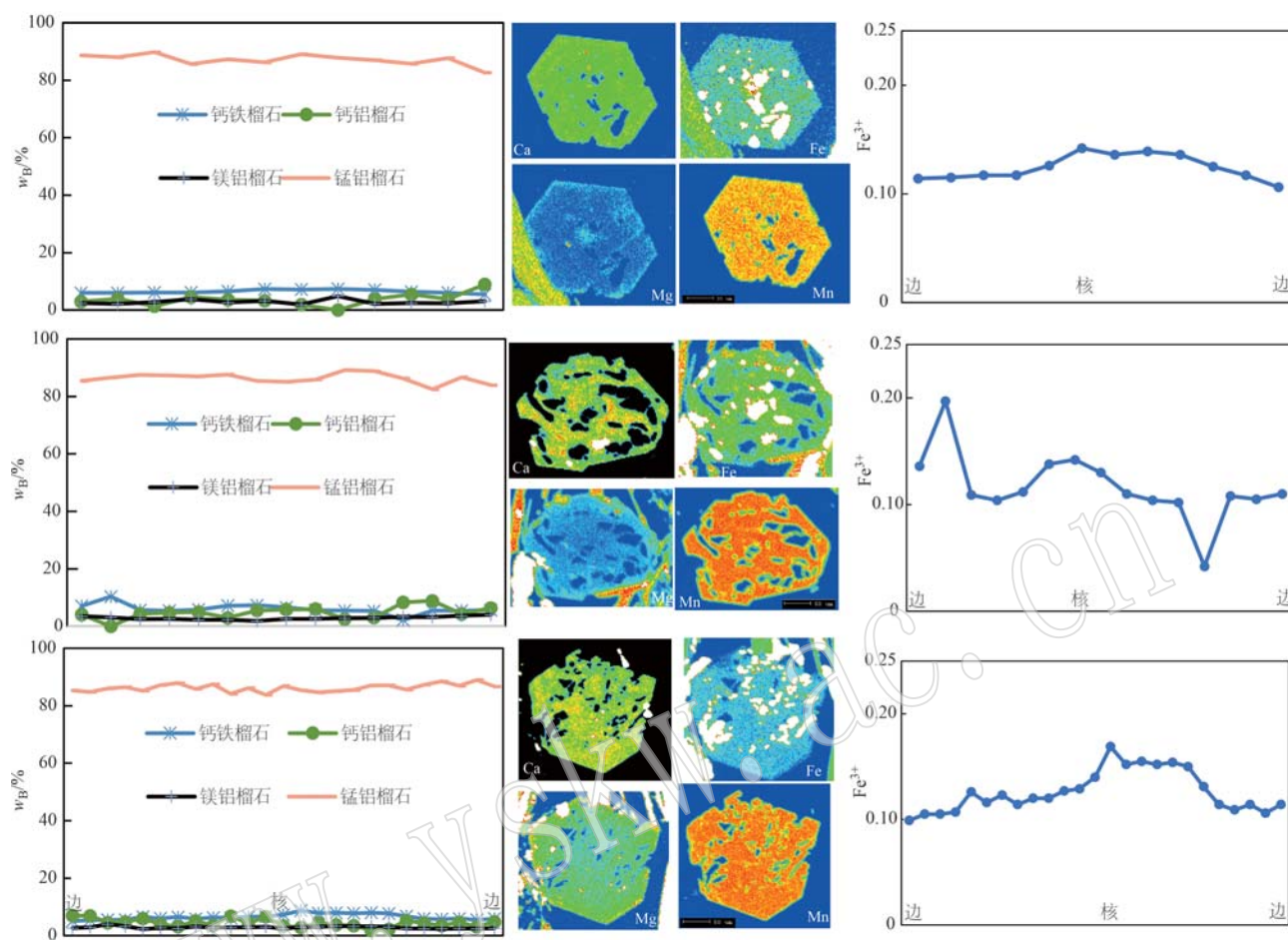


图 3 清水沟含红帘石变硅质岩中石榴子石成分剖面

Fig. 3 Garnet compositional profiles for the piemontite-bearing metacherts in Qingshuigou

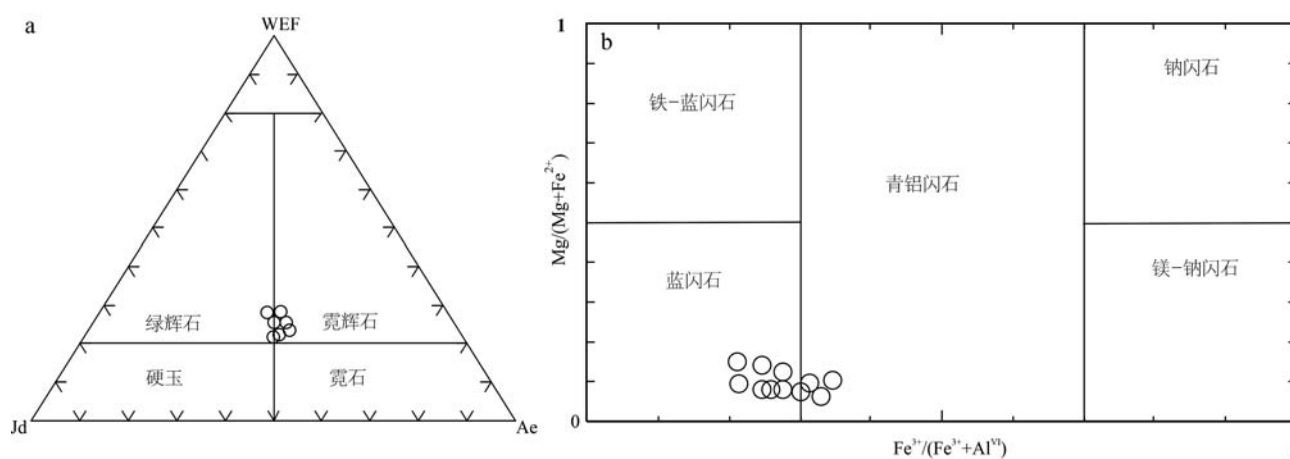


图 4 清水沟含红帘石变硅质岩中单斜辉石 WEF-Jd-Ae 图(a)和蓝闪石成分投图(b)

Fig. 4 Clinopyroxene compositions plotted on WEF-Jd-Ae diagram(a) and glaucophane composition diagrams(b) for the piemontite-bearing metacherts in Qingshuigou

表2 北祁连清水沟含红帘石变硅质岩全岩主量($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 2 Whole-rock major ($w_B/\%$) and trace ($w_B/10^{-6}$) elements analysis results of the piemontite-bearing metacherts in Qingshuigou

样品编号	AQ14- 22-5. 1	AQ14- 22-5. 1-2	L15- 12-4. 1	L15- 12-4. 2	DL15- 16-6. 1
SiO ₂	85.47	84.56	84.68	83.04	83.17
TiO ₂	0.15	0.20	0.18	0.29	0.19
Al ₂ O ₃	4.65	5.72	5.14	5.62	5.06
FeO	0.64	0.32	0.54	0.48	0.61
Fe ₂ O ₃	3.15	3.83	4.25	4.51	5.07
MnO	0.77	0.62	0.76	0.84	0.72
MgO	1.07	1.24	1.01	1.19	1.27
CaO	0.66	0.71	0.68	0.81	0.79
Na ₂ O	0.59	0.62	0.49	0.67	0.71
K ₂ O	0.97	0.89	1.08	1.11	1.32
P ₂ O ₅	0.13	0.18	0.14	0.11	0.21
LOI	0.99	0.89	0.91	0.95	0.84
Total	99.24	99.78	99.86	99.62	99.96
Li	9.00	10.21	8.54	9.12	11.21
Cr	20.60	30.12	21.12	26.54	26.56
Mn	5 813.00	5 432.00	5 890.00	6 312.00	5 324.00
Co	23.00	31.00	48.52	28.81	26.87
Ni	29.40	32.54	40.01	37.24	35.64
Cu	180.00	201.00	216.00	194.00	203.00
Zn	38.60	40.21	38.35	43.64	29.51
Rb	29.40	27.42	29.74	32.88	30.58
Sr	187.00	279.00	311.00	302.00	263.00
Cs	2.26	2.94	1.87	2.35	2.68
Ba	649.00	568.00	535.00	672.00	753.00
Pb	43.10	60.25	51.45	56.02	74.02
Th	3.18	2.98	3.24	3.68	4.01
U	0.07	0.10	0.19	0.08	0.11
Nb	2.75	3.45	3.98	5.33	2.97
Ta	0.19	0.21	0.34	0.42	0.29
Zr	28.00	33.57	28.97	33.27	37.70
Hf	0.94	1.06	1.21	1.06	1.12
Sn	1.06	1.23	1.37	1.20	1.03
Sb	1.55	1.48	2.00	1.75	1.71
Ti	829.00	919.00	1 065.00	937.00	966.00
W	1.90	2.07	2.45	2.15	2.02
As	97.50	109.23	125.57	110.36	103.34
V	7.14	8.78	9.20	8.08	9.30
La	11.40	13.22	14.68	12.90	13.35
Ce	23.41	26.22	30.02	26.51	27.19
Pr	2.75	3.08	3.54	3.11	3.31
Nd	11.80	12.58	15.20	13.36	13.62
Sm	2.05	2.44	2.64	2.32	2.42
Eu	0.55	0.68	0.72	0.63	0.65
Gd	2.13	2.41	2.45	2.27	2.46
Tb	0.35	0.39	0.46	0.39	0.37
Dy	2.32	2.47	2.99	2.63	2.58
Ho	0.46	0.54	0.59	0.52	0.51
Er	1.46	1.72	1.88	1.65	1.77
Tm	0.21	0.23	0.27	0.24	0.29
Yb	1.44	1.74	1.85	1.63	1.69
Lu	0.21	0.25	0.27	0.24	0.29
Sc	5.41	6.35	6.97	6.12	6.22
Y	10.40	16.84	10.58	13.45	20.25

盆地和大陆边缘岛弧重叠的区域(图5a)。在 $(La/Ce)_N-Al_2O_3/(Fe_2O_3+Al_2O_3)$ 图解上,3个样品落在了洋岛和海山区域,2个样品落在了洋岛和海山、大陆边缘岛弧和岛弧的重叠区域(图5b)。

含红帘石变硅质岩的稀土元素总量(ΣREE)变化于 $60.54 \times 10^{-6} \sim 77.56 \times 10^{-6}$ 之间,在北美页岩标准化稀土元素配分曲线图中,含红帘石变硅质岩呈现不明显的Ce负异常和轻微的Eu正异常(图5c), Ce/Ce^* 和 Eu/Eu^* 分别变化于0.89~0.91和1.16~1.24之间。

6 讨论

6.1 变硅质岩的原岩特征与形成环境

前人研究结果表明,硅质岩中的Mn和Fe的富集主要与热液作用有关,Al和Ti的富集则与陆源物质的输入有关,因而,大洋中脊环境下生成的硅质岩相对富Mn和Fe,而大陆边缘环境下生成的硅质岩相对富Al和Ti(Adachi *et al.*, 1986; Murrayet, 1994)。全岩地球化学分析结果显示,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩的SiO₂含量变化在83.04%~85.47%之间,Al₂O₃含量变化于4.65%~5.72%之间,该结果与纯硅质岩的化学成分(Murrayet *et al.*, 1991; Murrayet, 1994)存在一定的差异,不排除该变硅质岩的原岩可能有少量陆源物质的输入,而且在该区域还存在经历榴辉岩相变质作用的变泥质岩(Song *et al.*, 2007)。此外,在 $Fe_2O_3/TiO_2-Al_2O_3/(Fe_2O_3+Al_2O_3)$ 和 $(La/Ce)_N-Al_2O_3/(Fe_2O_3+Al_2O_3)$ 图解上,这些样品落在了大洋环境或大洋与大陆活动边缘岛弧重叠的区域(图5a、5b)。

岩相学和矿物化学分析结果表明,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩中含有较多的富Fe、Mn和As的矿物,这些元素与热液活动有关,表明该变硅质岩的原岩中应该有热液物质的贡献。在北美页岩标准化图解中,含红帘石变硅质岩呈现不明显的Ce负异常($Ce/Ce^* = 0.89 \sim 0.91$)和轻微的Eu正异常($Eu/Eu^* = 1.16 \sim 1.24$),而Ce和Eu的正、负异常与其形成时的氧化-还原条件有关。前人研究表明这种Ce负异常和Eu正异常可能指示海水组分和热水流体的参与(宋史刚等, 2008)。此外,微量元素分析结果表明,该变硅质岩含有相对较低的Co、V含量,这些特征与大洋盆地所生成的典型硅质岩(Murrayet, 1994; 丁林等, 1995)存在一定的差异。需

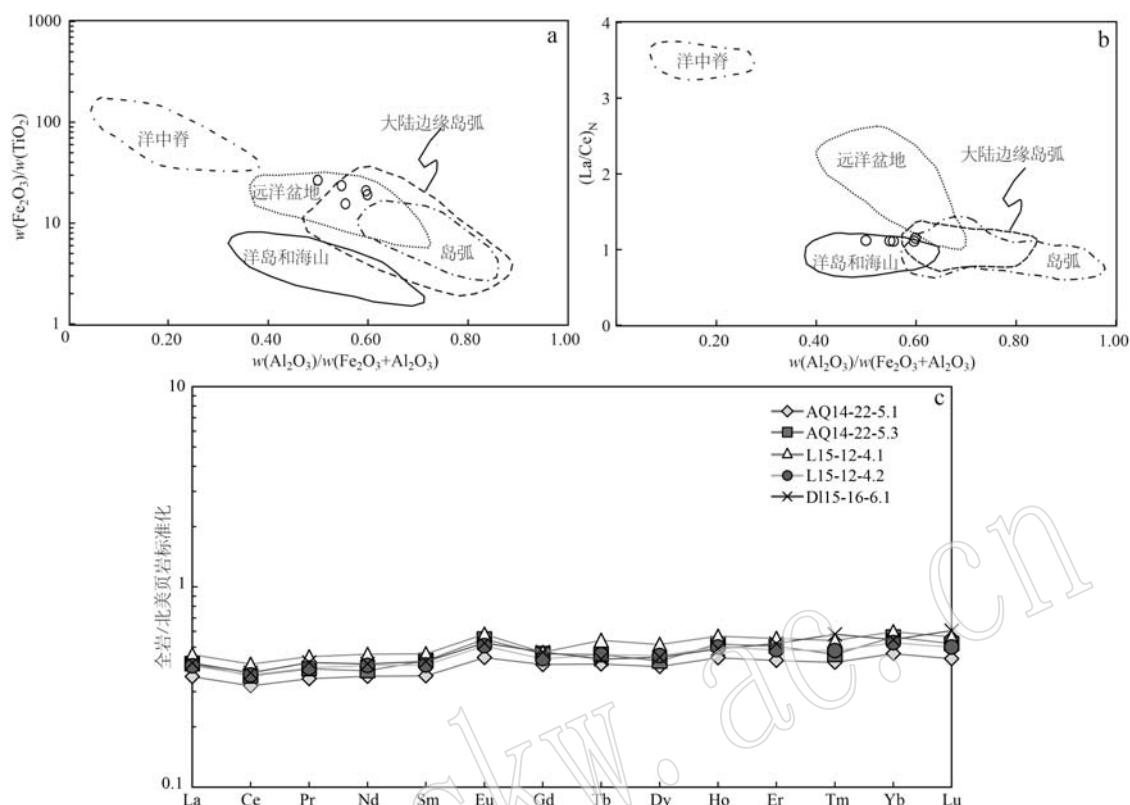


图5 清水沟含红帘石变硅质岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图解(a)、 $(\text{La}/\text{Ce})_N-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图解(b)和北美页岩标准化稀土元素配分曲线图(c)

Fig. 5 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3)$ (a) and $(\text{La}/\text{Ce})_N-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3)$ (b) diagrams, and North American Shale-normalized REE distribution pattern(c)

要说明的是,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩 Fe/Ti 平均值接近 20、 Eu/Eu^* 值平均值接近 1.1 以及负的 Ce/Ce^* 值等地球化学特征,与太平洋大洋钻探所获得的部分始新世硅质沉积岩特征相似,并据此认为大洋主洋盆已发育几乎不受陆源和热液物质影响的深海平原硅质岩(张立杨, 2023)。

综上所述,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩的原岩应该为泥质硅质岩,其形成环境可能为远洋盆地环境,并有洋底热液活动的贡献。当然,不排除在俯冲隧道中壳源流体的改造使得地球化学特征显示陆源物质加入的结果,这需要进一步的深入研究。

6.2 地质意义

北祁连高压低温变质岩石被认为是典型的洋壳俯冲作用的产物(Song *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2007)。北祁连造山带清水沟-香子沟和百经寺地区均发现不同类型的变沉积岩,前人根据岩相学及温压条件计算、碎屑锆石年代学以及地球化学研究,认为这些变沉积岩的原岩可能形成于活动大陆边缘

或弧前盆地环境(李金平等, 2009; Zhang *et al.*, 2012; 喻星星等, 2016)。本文研究结果表明,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩的原岩应该为含泥质硅质岩,其形成环境可能为远洋盆地环境,并有洋底热液活动的参与,使得该泥质硅质岩富 Mn、Fe 和 As 等元素,这些也与清水沟剖面所发现的条带状富铁锰硅质岩和锰结核硅质岩相吻合,这些物质可能和洋壳以及大陆边缘或大陆(岛)弧物质在早古生代时期随着祁连洋的俯冲一起被卷入俯冲带中,构成与早古生代洋壳俯冲有关的俯冲隧道的物质组成(张建新, 2020)。

上述提及,该变硅质岩中含有红帘石、砷硅锰矿等特殊矿物,这些矿物需要在低温高压、富锰和较高的氧逸度状态下形成。此外,该岩石中含有较多的赤铁矿,同时在石榴子石中也可见大量的赤铁矿包裹体,这些现象说明石榴子石是在低温高压、富锰和高氧逸度的环境中生成的,这也与因 Mn 价态变化导致高氧逸度的研究结果相符(Song *et al.*, 2022)。从另一个角度来理解,这些含红帘石的深

海硅质岩可能是一个比较重要的氧储库。需要说明的是,石榴子石矿物化学分析结果表明,北祁连清水沟含红帘石变硅质岩中石榴子石的 Fe^{3+} 均呈现出从核部到边部降低的趋势(图3)。 Fe 作为变价元素, Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 的含量反映了生成环境特定的氧化-还原条件,因而,石榴子石 Fe^{3+} 从核部到边部的变化趋势反映了石榴子石生长过程中氧化条件的变化。从石榴子石的 Fe^{3+} 的变化情况可知,俯冲带中氧逸度条件在俯冲变质过程发生了变化,从核部到边部 Fe^{3+} 向 Fe^{2+} 转化的过程中可能会释放一定量的氧,这些氧与流体所形成的富氧流体对于探究岩石圈地幔氧逸度变化、岛弧岩浆生成以及俯冲带氧循环等方面具有重要的意义。

7 结论

(1) 北祁连清水沟含红帘石变硅质岩主要由石英、多硅白云母、红帘石、石榴子石、蓝闪石、单斜辉石以及砷硅锰矿、赤铁矿等矿物组成。这些硅质岩可能和围岩一起经历了低温高压榴辉岩相的变质作用。

(2) 根据矿物组合、矿物成分特征以及全岩成分特征,我们推测该含红帘石变硅质岩的原岩为远洋盆地沉积的含泥质硅质岩。由于热液活动的参与,使得 Fe 、 Mn 等物质沉积,进而共同经历了低温高压变质作用。

(3) 北祁连清水沟含红帘石变硅质岩中红帘石、砷硅锰矿以及石榴子石中大量的赤铁矿包裹体表明该岩石形成于高氧逸度条件,而石榴子石中的 Fe^{3+} 从核部到边部的降低趋势,表明俯冲变质过程中氧逸度的变化,这一过程释放的氧对于探究岩石圈地幔氧逸度变化、岛弧岩浆生成以及俯冲带氧循环等方面具有重要的意义。

致谢 感谢两位审稿人中国地质科学院的冀磊博士和陈言飞博士提出的建设性修改意见。

References

Adachi M, Yamamoto K and Sugisaki R. 1986. Hydrothermal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity[J]. *Sedimentary Geology*, 47(1~2): 125~148.

Ague J J, Tassara S, Holycross M E, *et al.* 2022. Slab-derived devolatilization fluids oxidized by subducted metasedimentary rocks [J]. *Nature Geoscience*, 15: 320~326.

Ding Lin and Zhong Dalai. 1995. Rare earth elements and cerium anomalies in Paleo-Tethys oceanic siliceous rocks in Changning-Menglian zone, western Yunnan[J]. *Science in China(Series B)*, 25(1): 93~100(in Chinese).

Droop G T R. 1987. A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria[J]. *Mineralogical Magazine*, 51: 431~435.

Evans K A. 2012. The redox budget of subduction zones[J]. *Earth Science Reviews*, 113: 11~32.

Feng Yimin and He Shiping. 1995. Research for geology and geochemistry of several ophiolites in the North Qilian Mountains, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(Suppl): 125~146(in Chinese).

Gou Longlong and Zhang Lifei. 2009. Petrology and U-Th-Pb chemical monazite dating of the low-P metapelitic granulites at the region of Muzhaerte River in southwestern Tianshan, NW China, and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2 271~2 280(in Chinese with English abstract).

Kelly K A and Cottrell E. 2009. Water and the oxidation State of subduction zon magmas[J]. *Science*, 325: 605~607.

Keskinen M and Liou J G. 2010. Stability relations of Mn-Fe-Al piemontite[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 5(4): 495~507.

Li Jinping, Zhang Jianxin, Yu Shengyao, *et al.* 2009. Characteristic of eclogitic metasedimentary rocks in the North Qilian Mountains and its geodynamic implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(11): 1 667~1 686(in Chinese with English abstract).

Lin Yihui and Zhang Lifei. 2012. Petrolog and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the lawsonite-bearing blueschist and eclogite from the Qingshuigou blueschist belt in North Qilian mountains in NW China and their tectonic implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1 503~1 524(in Chinese with English abstract).

Liou J G, Wang X and Coleman R G. 1989. Blueschists in major suture zones of China[J]. *Tectonics*, 8: 609~619.

Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Gerlach D C, *et al.* 1991. Rare earth major and trace elements in chert from the Franciscan Complex and Monterey group: Assessing REE sources to fine-grained marine sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 1 875~1 895.

Murray R W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications[J]. *Sedimentary Geology*, 90: 213~232.

Song Shigang, Ding Zhenju, Yao Shuzhen, *et al.* 2008. REE and Nd-Sr isotopic compositions of the iron-rich siliceous rock in Bikou Terane:

- Implication to ancient sedimentary environment[J]. *Mineralogy and Petrology*, 3: 57~63(in Chinese with English abstract).
- Song S G, Niu Y L, Su L, *et al.* 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 378~1 401.
- Song S G, Niu Y L, Su L, *et al.* 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *Earth-Science Reviews*, 129: 59~84.
- Song S G, Niu Y L, Zhang L F, *et al.* 2009. Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 334~353.
- Song S G, Ye S T, Allen M B, *et al.* 2022. Oxidation of arcs and mantle wedges by reduction of manganese in pelagic sediments during seafloor subduction[J]. *American Mineralogist*, 107: 1 850~1 857.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, *et al.* 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data[J]. *Journal of Petrology*, 47(3): 435~455.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, *et al.* 2007. Eclogite and carpholite-bearing metasedimentary rocks in the North Qilian suture zone, NW China: Implications for Early Palaeozoic cold oceanic subduction and water transport into mantle[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 547~563.
- Song Shuguang. 1997. Tectonic evolution of subductive complex belts in the North Qilian Mountains[J]. *Advances in Earth Science*, 12: 351~365(in Chinese with English abstract).
- Wang Daoxuan, Ding Daogui, Sun Shiqun, *et al.* 2011. Discovery and geological significance of a piemontite quartzite of the Aoyitag of Aketao County, Kezilesu kerkezi autonomous state of Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 46(2): 415~425(in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Wei Chunjing, Wang Tao, *et al.* 2009. Confirmation of pelitic granulite in the Altai orogen and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 54(14): 2 543~2 548(in Chinese with English abstract).
- Wei C J and Song S G. 2008. Chloritoid-glaucophane schist in the north Qilian orogen, NW China: Phase equilibria and *p-T* path from garnet zonation[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(3): 301~316.
- Wei C J, Yang Y, Su X L, *et al.* 2009. Metamorphic evolution of low-*T* eclogite from the North Qilian orogen, NW China: Evidence from petrology and calculated phase equilibria in the system NCKFMASHO[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(1): 55~70.
- Wu Hanquan. 1980. The glaucophane-schist in the East Qiling and North Qilian[J]. *Acta Geologica Sinica*, 54(3): 195~207(in Chinese).
- Wu H Q, Feng Y M and Song S G. 1993. Metamorphic and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian mountains, China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 523~536.
- Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1996. The Petrogenesis of Marine Volcanic Rocks from the Northern Qilian Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~153(in Chinese).
- Xia L Q, Xia Z C and Xu X Y. 2003. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the Northern Qilian Mountains, China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 115(12): 1 510~1 522.
- Xiao W J, Windley B F, Yong Y, *et al.* 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 323~333.
- Xiao Xuchang, Chen Guoming and Zhu Zhizhi. 1978. A preliminary study on the tectonics of ancient ophiolites in the Qilian Mountain, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 52(4): 281~295(in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin. 1997. The Ductile Shear Zone and Dynamics in the Main Continental Mountain Chains, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Xu Zhiqin, Xu Huifen, Zhang Jianxin, *et al.* 1994. The Zoulangnashan Caledonian subductive complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 1~15(in Chinese with English abstract).
- Yu Xingxing and Zhang Jianxin. 2016. Zircon U-Pb geochronology and Hf-isotope compositions of the eclogitic metasedimentary rocks in Xiangzigou, North Qilian Mountains and their geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 437~1 451(in Chinese with English abstract).
- Yan Z, Xiao W J, Aitchison J C, *et al.* 2021. Age and origin of accreted ocean plate stratigraphy in the North Qilian belt, NE Tibet Plateau: Evidence from microfossils and geochemistry of cherts and siltstones[J]. *Journal of the Geological Society*, (6): 178.
- Ye Shiting, Song Shuguang and Chen Jing. 2019. Mineralogy of ardenite-(As) from HP metamorphic Mn-rich silica rocks in North Qilian Mountain[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 38(1): 90~96(in Chinese with English abstract).
- Zhang J X. 2020. The study of subduction channels: Progress, controversies, and challenges[J]. *Science China Earth Sciences*, 63(12): 1 831~1 851.
- Zhang J X, Li J P, Yu S Y, *et al.* 2012. Provenance of eclogitic meta-sediments in the north Qilian HP/LT metamorphic terrane, western

- China: Geodynamic implications for early Paleozoic subduction-erosion[J]. *Tectonophysics*, 570~571, 78~101.
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, *et al.* 2019. Two contrasting accretion v. collision orogenies: Insights from Early Paleozoic polyphase metamorphism in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic system, NW China[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 474: 153~181.
- Zhang Jianxin and Meng Fancong. 2006. Lawsonite-bearing eclogites from north Qilian and north Altyn: Evidence for the cold oceanic crust subduction[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(14): 1 683~1 688 (in Chinese).
- Zhang J X, Meng F C and Wan Y S. 2007. A cold Early Paleozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: Petrological and U-Pb geochronological constraints[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 285~304.
- Zhang Jianxin and Xu Zhiqin. 1995. Caledonian subduction-accretionary complex /volcanic arc zone and its deformation features in the middle sector of North Qilian Mountains[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 16(2): 153~163 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Chen Wen, *et al.* 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex /volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 112~119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Xu Huifen, *et al.* 1998. Framework of North Qilian Caledonian subduction-accretionary wedge and its deformation dynamics[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 290~299 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liyang. 2023. Origin and depositional environment of cherts and their application in reconstructing ocean plate stratigraphy[J]. *Advances in Earth Science*, 38(5): 453~469 (in Chinese with English abstract).
- 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铀异常特征[J]. *中国科学(B辑)*, (1): 93~100.
- 冯益民, 何世平. 1995. 北祁连山蛇绿岩地质和地球化学研究[J]. *岩石学报*, 11(增刊): 125~146.
- 苟龙龙, 张立飞. 2009. 新疆西南天山木扎尔特河一带低压泥质麻粒岩岩石学特征、独居石 U-Th-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 25(9): 2 271~2 280.
- 李金平, 张建新, 于胜尧, 等. 2009. 北祁连榴辉岩相变沉积岩的特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 83(11): 1 667~1 686.
- 林宜慧, 张立飞. 2012. 北祁连山清水沟蓝片岩带中含硬柱石蓝片岩和榴辉岩的岩石学、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及其意义[J]. *地质学报*, 86(9): 1 503~1 524.
- 宋史刚, 丁振举, 姚书振, 等. 2008. 碧口地块富铁硅岩 REE 及 Nd-Sr 同位素组成及其古环境意义[J]. *矿物岩石*, (3): 57~63.
- 宋述光. 1997. 北祁连俯冲杂岩带的构造演化[J]. *地球科学进展*, 12(4): 351~365.
- 王道轩, 丁道桂, 孙世群, 等. 2011. 新疆阿克陶县奥依塔格红帘石英英岩的发现及其意义[J]. *地质科学*, 46(2): 415~425.
- 王 伟, 魏春景, 王 涛, 等. 2009. 阿尔泰山地区泥质麻粒岩的确定及其地质意义[J]. *科学通报*, 54(7): 918~923.
- 吴汉泉. 1980. 东秦岭和北祁连山的蓝闪片岩[J]. *地质学报*, 54(3): 195~207.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因[M]. 北京: 地质出版社.
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 北祁连古蛇绿岩带的地质构造意义[J]. *地质学报*, 4(3): 281~195.
- 许志琴. 1997. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京: 地质出版社.
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J]. *地质学报*, 68(1): 1~15.
- 叶诗婷, 宋述光, 陈 晶, 2019. 祁连山高压变质富锰硅质岩中砷硅锰矿的矿物学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 38(1): 90~96.
- 喻星星, 张建新. 2016. 北祁连香山沟榴辉岩相变沉积岩的锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 32(5): 1 437~1 451.
- 张建新. 2020. 俯冲隧道研究: 进展、问题及挑战[J]. *中国科学: 地球科学*, 50(12): 1 671~1 691.
- 张建新, 孟繁聪. 2006. 北祁连和北阿尔金含硬柱石榴辉岩: 冷洋壳俯冲作用的证据[J]. *科学通报*, 51(14): 1 683~1 688.
- 张建新, 许志琴. 1995. 北祁连中段加里东俯冲-增生杂岩/火山弧带及其变形特征[J]. *地球学报*, 16(2): 153~163.
- 张建新, 许志琴, 陈 文, 等. 1997. 北祁连中段俯冲-增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 16(2): 112~119.
- 张建新, 许志琴, 徐惠芬, 等. 1998. 北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学[J]. *地质科学*, 33(3): 290~299.
- 张立杨. 2023. 硅质岩的成因与沉积环境及其在重建洋板块地层中的应用[J]. *地球科学进展*, 38(5): 453~469.

附中文参考文献