

班公湖-怒江缝合带西段沙木罗组泥质岩地球化学特征及意义

刘 文, 吴建亮, 尹显科, 雷传扬, 王 波

(四川省地质调查院, 四川 成都 610081)

摘 要: 沙木罗组分布于班公湖-怒江缝合带内部, 其沉积背景、源区性质与班-怒特提斯洋的演化息息相关。为了研究班怒带西段沙木罗组泥质岩的物源特征, 探讨沉积盆地的构造背景和班-怒特提斯洋的俯冲消减时限, 对泥质岩开展了全岩主量元素、微量元素地球化学的研究。地球化学组成特征显示, 泥质岩的 ICV、CIA、 Al_2O_3/TiO_2 、Th/Sc、Rb/Cs、 $(Gd/Yb)_N$ 、La、Ce、 $\sum REE$ 、La/Yb、 $(La/Yb)_N$ 、Eu/Eu^{*} 和 LREE/HREE 均值分别为 0.80、72、21、0.88、13.5、1.58、 42.47×10^{-6} 、 84.81×10^{-6} 、 200.02×10^{-6} 、14.22、9.61、0.65 和 9.04, 具有中等的 Th、U、Hf 含量(分别为 16.34×10^{-6} 、 2.85×10^{-6} 和 4.81×10^{-6})和 Th/U、La/Th 值(分别为 5.78 和 2.61)。泥质岩的 K_2O/Na_2O-SiO_2 、La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10、 TiO_2-Zr 、Co/Y-Ti/Zr、La-Th-Sc、Th-Sc、La/Sc-Co/Th、REE-La/Yb、A-CN-K 等关系图解具较好的指示意义, 稀土元素特征亦具有一定的规律性。上述地球化学特征表明, 泥质岩为成熟的泥质岩, 源区矿物组成以斜长石、碱性长石为主, 源区母岩主要为后太古宙花岗岩闪长岩、花岗岩、安山岩等酸性岩浆岩和碎屑岩。泥质岩源区母岩经历了中等程度的化学风化作用, 沉积物沉积时气候较温暖、湿润。不同层位的泥质岩地球化学特征指示了班怒带西段沙木罗组沉积于活动大陆边缘的构造背景, 从剖面下部到上部可能反映了板块俯冲加剧、岩浆活动加强的地质过程, 至少在 141 Ma 左右班-怒特提斯洋西段正在向北俯冲消减。

关键词: 泥质岩; 地球化学; 沙木罗组; 班公湖-怒江缝合带

中图分类号: P588.21⁺2.1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)01-0047-16

Geochemical characteristics and geological significance of Shamuluo Formation argillaceous rocks in the western part of the Bangong Co-Nujiang suture zone

LIU Wen, WU Jian-liang, YIN Xian-ke, LEI Chuan-yang and WANG Bo

(Sichuan Geological Survey, Chengdu 610081, China)

Abstract: The Shamuluo Formation is distributed in Bangong Co-Nujiang suture zone, and its sedimentary background and source characteristic were closely linked with the evolution of Bangong Co-Nujiang Tethys Ocean. In order to discuss sediment provenance, weathering, tectonic setting of sedimentary basin and subduction of Bangong Co-Nujiang Tethys Ocean, the authors made a systematic analysis of petrology and geochemistry of Shamuluo Formation argillaceous rocks in the western part of the Bangong Co-Nujiang suture zone. The mean values of ICV, CIA, Al_2O_3/TiO_2 , Th/Sc, Rb/Cs, $(Gd/Yb)_N$, La, Ce, $\sum REE$, La/Yb, $(La/Yb)_N$, Eu/Eu^{*}, LREE/HREE are 0.80, 72, 21, 0.88, 13.5, 1.58, 42.47×10^{-6} , 84.81×10^{-6} , 200.02×10^{-6} , 14.22, 9.61, 0.65 and

收稿日期: 2017-09-19; 接受日期: 2018-11-18; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局调查项目(DD20160026)

作者简介: 刘 文(1990-), 男, 汉族, 硕士, 工程师, 从事区域地质、矿产地质调查工作, E-mail: liuwen2009.hi@163.com。

网络首发时间: 2018-12-13; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20181211.1656.003.html>

9.04 respectively, while the mean values of Th, U, Hf, Th/U, La/Th are 16.34×10^{-6} , 2.85×10^{-6} , 4.81×10^{-6} , 5.78 and 2.61 respectively. The diagrams of $K_2O/Na_2O - SiO_2$, La-Th-Sc, Th-Co-Zr/10, Th-Sc-Zr/10, $TiO_2 - Zr$, Co/Y-Ti/Zr, La-Th-Sc, Th-Sc, La/Sc-Co/Th, REE-La/Yb, A-CN-K and REEs also show certain regularity. The argillaceous rocks are mature and the source rock are granodiorite, granite, andesite and sedimentary clastic rock which have much plagioclase and alkali feldspar. The source region of argillaceous rocks has suffered from medium degree of chemical weathering, suggesting a warm and moist climate. The geochemical characteristics of argillaceous rocks indicate that argillaceous rocks tended to occur in active continental margin setting, where its tectonic activity became intensified from the bottom to the top. These results provide sedimentary geochemical evidence for the evolution of Bangong Co-Nujiang Tethys Ocean, which indicates that Bangong Co-Nujiang Tethys Ocean experienced northward subduction about 141 million years ago.

Key words: argillaceous rocks; geochemistry; Shamuluo Formation; Bangong Co-Nujiang suture

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20160026)

班公湖-怒江缝合带(下文简称班怒带)西起印控克什米尔地区,在中国西藏境内经班公湖、改则、东巧、丁青等地呈弧形转向东南,沿着怒江延伸到滇西,东西向延伸2 000余千米,南北宽十几至近百千米(Chang *et al.*, 1986; 王希斌等, 1987; Yin and Harrison, 2000),是一条规模巨大、地质构造复杂的构造带,对探讨青藏高原特提斯洋的构造演化具有重要意义(潘桂棠等, 2006)。班-怒特提斯洋盆的构造演化引起了众多学者的广泛关注,至今对其一些基础地质问题还存在许多争议,如俯冲时间与俯冲极性、闭合时间等。关于班-怒特提斯洋的开合时限,至少存在以下观点: ① Zhu等(2013)认为班-怒特提斯洋盆晚二叠世(约260 Ma)开始向南俯冲,晚三叠世(约210 Ma)开始双向俯冲,早白垩世早期(约140 Ma)仅向南俯冲,直至晚白垩世(约80 Ma)已完全闭合,而黄启帅等(2012)通过对班公湖 MOR型蛇绿岩年代学的研究,认为晚二叠世至早三叠世班公湖-怒江特提斯洋正开始裂解。② 杜道德等(2011)提出班公湖中特提斯洋盆存在双向俯冲,洋盆向北俯冲发生在晚侏罗世(142.15 ± 0.35 Ma),向南的俯冲发生在早白垩世(134.07 ± 0.77 Ma),两者相差约8 Ma,向北俯冲的时限与 Kapp等(2003)的观点大体一致。③ 邱瑞照等(2004)认为班-怒特提斯洋盆中侏罗世开始向南俯冲,俯冲过程伴随洋内弧的形成和地幔橄榄岩、玻安岩、岛弧拉斑玄武岩的空间共生,洋盆最终在早白垩世末期封闭。④ 梁桑等(2017)认为班-怒特提斯洋盆西段早侏罗世开始北向俯冲,中侏罗世(约160 Ma)达到峰期,晚侏罗世演化成南北双向俯冲,俯冲持续到早白垩世,直到晚白垩世洋盆彻底关闭。

沙木罗组在班怒带分布广泛,形成于晚侏罗世至早白垩世,记录了班-怒特提斯洋演化的重要信息。前人对沙木罗组的岩性组合、岩相特征以及火山岩夹层的年代学研究取得了一定成果,但对沙木罗组泥质岩元素地球化学方面的研究较少。例如,谢冰晶等(2010)在班怒带西段发现了沙木罗组,为一套以滨浅海为特征、以碎屑岩为主夹少量碳酸盐岩的沉积建造。陈国荣等(2004)在班戈地区发现沙木罗组角度不整合覆盖于木嘎岗日群之上,进而确定了班怒带的闭合时限。岩石地球化学是研究沉积岩的物源、沉积物的分选与成岩过程、重建沉积盆地的古气候与古构造环境以及探讨陆壳的组成与演化的重要手段(Bhatia and Crook, 1986; Naqvi *et al.*, 1988; Condie, 1993; McLennan *et al.*, 1993; Banerjee and Bhattacharya, 1994)。由于大多数泥质岩形成于特定的构造环境,其微量元素、稀土元素的地球化学特征可反映源区母岩的物质组成和构造背景(Cox and Lowe, 1995)。成分变化指数(ICV)可用于衡量碎屑岩原始成分的变化,判断碎屑岩是代表初始沉积的产物还是源于再循环的产物,衡量沉积岩的物源及成熟度(Cox *et al.*, 1995)。化学蚀变指数(CIA)可以很好地评价长石向粘土矿物(如高岭石)转化的程度,是化学蚀变强度的评价指标,可用于重建古气候(Nesbitt and Young, 1982; Scheffler *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2007; Passchier and Krissek, 2008; Yang *et al.*, 2008)。本文在西藏日土县昂龙岗日地区3幅区域地质调查的基础上,运用元素地球化学手段,研究班怒带西段沙木罗组的物源及风化作用,重建沉积盆地的构造背景,为班-怒特提斯洋西段的俯冲时限研究提供新的证据。

1 区域地质特征

1.1 地质概况

研究区位于西藏革吉县北约 70 km 处,大地构造位置处于班怒带西段南缘,北接羌塘“三江”转换构造伸展带,南抵冈底斯主俯冲造山带。自晚古生代以来,研究区经历了大洋扩张、俯冲、弧-陆(弧)碰撞造山、高原隆升等多阶段多期次的构造演化过程,形成了以北西向构造为主体,多方向、多期次构造并存的复杂构造格局(图 1)。区内出露的地层包括上三叠统一侏罗系东巧蛇绿岩群($T_3JD.$)、下侏罗统一

中侏罗统木嘎岗日岩群($J_{1,2}M.$)、上侏罗统一白垩统沙木罗组(J_3K_1s)、下白垩统去申拉组(K_1q)、上白垩统竟柱山组(K_2j)、古近系牛堡组($E_{1,2}n$)和美苏组(E_2m)、新近系喷呐湖组(Ns)、第四系(Qh)。东巧蛇绿岩群构造变形强烈,主要出露超基性、基性岩块,呈透镜状产出。木嘎岗日岩群为一套复理石建造,主要为变质岩屑长石砂岩、粉砂质泥质岩。去申拉组为一套碎屑岩-火山岩建造,下部以碎屑岩为主,上部以基性火山岩为主,夹两层泥质硅质岩。竟柱山组为一套红色磨拉石建造,主要为紫红色砾岩、含砾砂岩、砂岩,夹粉砂岩、泥质岩。牛堡组、喷呐湖组为一套碎屑岩建造。美苏组为一套基性-中性-酸

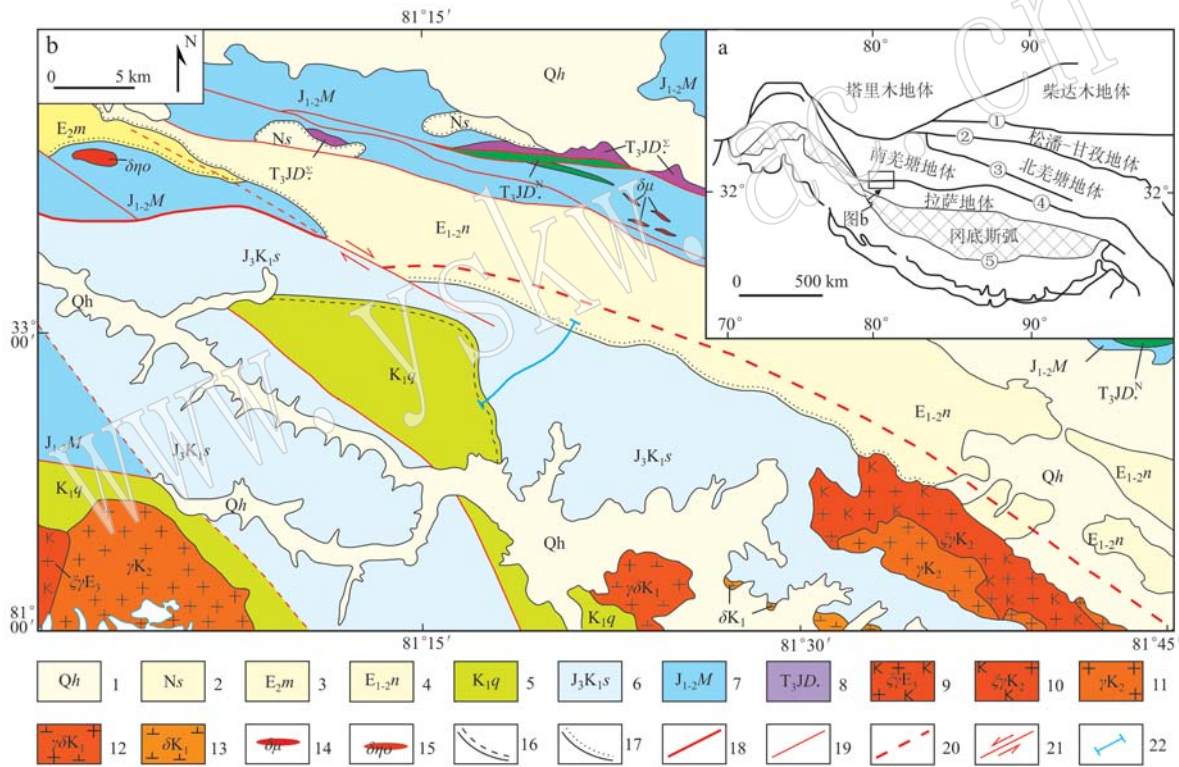


图 1 研究区地质图

Fig. 1 Geological map of the study area

a—青藏高原大地构造格架图(据 Zhang *et al.*, 2004): ①—昆仑缝合带; ②—金沙江缝合带; ③—双湖缝合带; ④—班公湖-怒江缝合带; ⑤—雅鲁藏布江缝合带; b—研究区地质简图[据江西省地质调查研究院(2004)^①和四川省地质调查院(2003)^②修改]: 1—第四系; 2—喷呐湖组; 3—美苏组; 4—牛堡组; 5—去申拉组; 6—沙木罗组; 7—木嘎岗日群; 8—东巧蛇绿岩群; 9—渐新世正长花岗岩; 10—晚白垩世正长花岗岩; 11—晚白垩世花岗岩; 12—早白垩世花岗岩闪长岩; 13—早白垩世闪长岩; 14—闪长玢岩脉; 15—石英二长闪长岩脉; 16—平行不整合; 17—角度不整合界线; 18—区域性断裂; 19—一般断裂; 20—性质不明断层; 21—平移断层; 22—实测剖面位置
a—sketch tectonic map of the Tibetan Plateau (after Zhang *et al.*, 2004): ①—Kunlun suture; ②—Jinshajiang suture; ③—Shuanghu suture; ④—Bangong Co-Nujiang suture; ⑤—Yarlung Zangbo suture; b—geological map of the study area (after Jiangxi Geological Survey, 2004)^① and Sichuan Geological Survey, 2003)^②: 1—Quaternary; 2—Suonahu Formation; 3—Meisu Formation; 4—Niubao Formation; 5—Qushenla Formation; 6—Shamuluo Formation; 7—Muggar Kangri Group; 8—Dongqiao ophiolite Group; 9—Oligocene syenogranite; 10—Late Cretaceous syenogranite; 11—Late Cretaceous granite; 12—Early Cretaceous granodiorite; 13—Early Cretaceous diorite; 14—diorite-porphyrite vein; 15—quartz monzodiorite vein; 16—parallel unconformity; 17—angular unconformity; 18—regional fault; 19—general fault; 20—unknown fault; 21—strike-slip fault; 22—sampling location

① 江西省地质调查研究院. 2004. 1:25 万日土县幅地质图.
② 四川省地质调查院. 2003. 1:25 万革吉县幅地质图.

性-碱性火山熔岩建造。区内受岩浆岩活动影响强烈,主要表现为白垩纪、古近纪中酸性侵入岩呈岩基产出,古近纪火山岩呈层状产出。区内断裂较发育,以NW向为主,NNW向次之。NW向断裂断层面总体北倾,倾角中等,为一系列逆冲断层,是班怒带北向俯冲留下的构造痕迹。NNW向断裂为右行走滑断裂,断裂切割了古近系,它们可能是碰撞造山期后走滑调整阶段的产物,将先期断层切割错位,区域上形成北北西向走滑拉分盆地。

1.2 实测地质剖面

测区沙木罗组分布广泛,沿班怒带南侧呈北西-南东向展布,与相邻地层常呈断层接触。笔者在测区亚卓一带开展了沙木罗组野外实测剖面,剖面起点坐标: N81°20'30", E33°00'00", 剖面基岩出露良好,顶界与去申拉组呈平行不整合接触,底界被牛堡组角度不整合覆盖(图2a)。剖面特征简述如下:

- 上侏罗统一白垩统沙木罗组(J₃K_{1s}) >4 251.2 m
与去申拉组呈平行不整合接触
19. 深灰色泥质岩偶夹青灰色薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 12:1。 128 m
 18. 灰色泥质岩偶夹青灰色透镜状岩屑石英砂岩,二者岩比约 10:1。 186.5 m
 17. 灰色-深灰色泥质岩夹青灰色薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 6:1~8:1,偶见石英脉。 209.3 m
 16. 青灰色中层状岩屑石英砂岩、青灰色薄层状岩屑石英砂岩、深灰色-灰色泥质岩不等厚韵律互层,发育水平层理。 323.2 m
 15. 深灰色泥质岩夹青灰色薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 4:1~9:1。 241.3 m
 14. 深灰色泥质岩与灰色粉砂质泥质岩韵律互层,发育水平层理,偶见石英脉。 156.7 m
 13. 灰色泥质岩偶夹青灰色中层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 10:1~12:1。 310.5 m
 12. 青灰色中-薄层状岩屑石英砂岩与深灰色泥质岩互层,发育水平层理。 141.1 m
 11. 灰色安山质晶屑凝灰岩。 44.4 m
 10. 深灰色泥质岩夹青灰色薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 3:1~7:1。 153.1 m
 9. 杂色安山质火山角砾岩-灰色(含角砾)安山质晶屑凝灰岩组成的 1 个喷发韵律。 94.2 m
 8. 深灰色泥质岩偶夹青灰色薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 10:1~12:1。 144.7 m
 7. 灰色安山质火山角砾岩-灰色(含角砾)安山质晶屑凝灰岩-灰色安山岩(或灰色安山质沉凝灰岩)组成的 17 个喷发韵律。 855.2 m

6. 深灰色-灰色泥质岩夹青灰色中-薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 8:1。 184.2 m

5. 深灰色泥质岩偶夹灰色粉砂质泥质岩、青灰色薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 12:1~15:1。偶见石英脉。 366.9 m

4. 深灰色泥质岩夹青灰色薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 5:1~10:1。 284.3 m

3. 深灰色-灰色泥质岩。 213.1 m

2. 深灰色泥质岩夹青灰色中-薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 3:1,偶见石英脉。 158.2 m

1. 深灰色泥质岩偶夹青灰色薄层状岩屑石英砂岩,二者岩比约 10:1。 >42.2 m

未见底,被牛堡组角度不整合覆盖

沙木罗组整体受变形变质作用影响小,岩石原岩组构清晰可见,为一套以泥质岩、粉砂质泥质岩、岩屑石英砂岩等为主的深水斜坡相碎屑岩建造,岩屑石英砂岩中发育水平层理。该组基本层序可划分为 3 类:基本层序 A 由灰色粉砂质泥质岩、灰色-深灰色泥质岩不等厚韵律互层,层序厚度约 20~70 m;基本层序 B 由青灰色中-薄层状岩屑石英砂岩、灰色-深灰色泥质岩组成,具有下粗上细的正粒序,层序厚度约 50 m;基本层序 C 由青灰色中层状岩屑石英砂岩、青灰色薄层状岩屑石英砂岩和灰色-深灰色泥质岩组成的三元层序结构组成,具有较明显的下粗上细的正粒序,层序厚度约 60~90 m(图 2b)。

本文样品 PM16-1~PM16-12 均采自沙木罗组实测剖面,按照从剖面底部到顶部逐层采样的原则进行样品采集,岩性为泥质岩(图 2c~2e)。岩石呈灰色-深灰色,泥质结构,薄-中层状构造。岩石主要由泥质组分和粉砂质组分组成,可见少量金属矿物(<1%)和方解石(2%±)。其中,泥质组分包括绢云母(36%±)、微粒石英(34%±)、粘土(22%±)和少量绿泥石;粉砂质组分包括石英(5%±)和少量长石(<1%)。泥质组分中微粒石英、云母均有重结晶,呈混合的定向分布,具板状构造。粉砂质组分中石英多有重结晶,多数呈条带状分布。金属矿物呈细小的它形粒状、点状分布。方解石呈点状、不规则团状分布。

2 分析测试

为便于讨论并结合实际采样层位,将研究样品沙木罗组泥质岩分为下部泥质岩(PM16-1~PM16-5)、中部泥质岩(PM16-6~PM16-8)、上部泥质岩

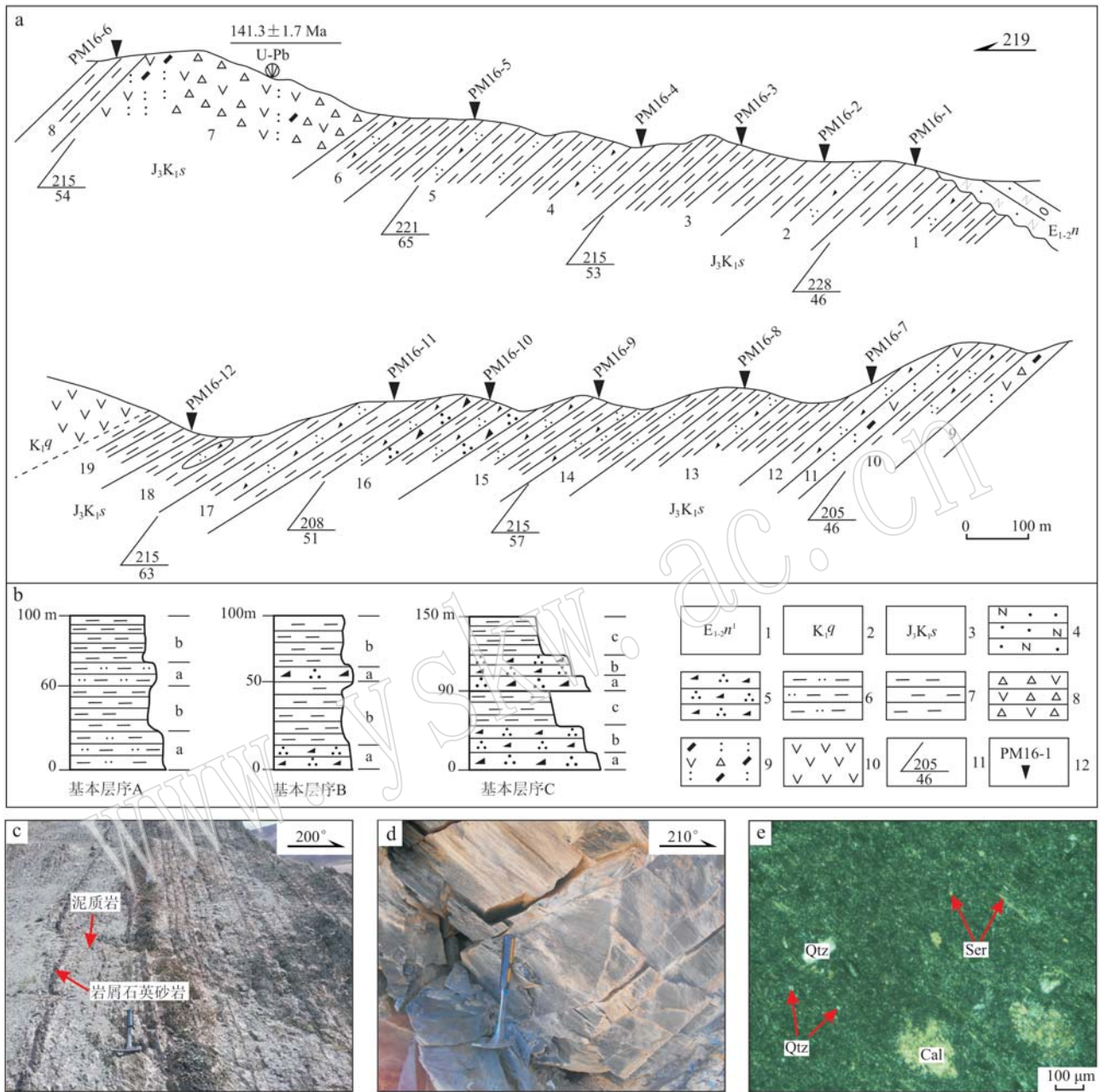


图 2 实测剖面图、野外露头及镜下照片

Fig. 2 The measured section, outcrops and characteristics under microscope

a—实测剖面图；b—基本层序；1—牛堡组；2—去申拉组；3—沙木罗组；4—长石砂岩；5—岩屑石英砂岩；6—粉砂质泥质岩；7—泥质岩；8—安山质火山角砾岩；9—安山质晶屑凝灰岩；10—安山岩；11—产状；12—采样位置及编号；c、d—泥质岩野外露头；e—泥质岩镜下照片（正交偏光）；Ser—绢云母；Cal—方解石；Qtz—石英

a—measured section；b—basic sequence；1—Niubao Formation；2—Qushenla Formation；3—Shamuluo Formation；4—feldspar sandstone；5—lithic quartz sandstone；6—silty mudstone；7—mudstone；8—andesitic volcanic breccia；9—andesitic crystal tuff；10—andesite；11—attitude；12—sampling location and number；c and d—outcrops of argillaceous rocks；e—microphoto of argillaceous rocks (crossed nicols)；Ser—sericite；Cal—calcite；Qtz—quartz

(PM16-9 ~ PM16-12) 3 个部分。所有样品在野外进行了预处理，经粗碎、中碎、细碎、粉碎等过程至 200 目后委托澳实矿物实验室(广州)完成测试。所有样

品进行主量元素、微量元素以及稀土元素的分析。

主量元素用 X 荧光光谱仪测定。在试样中加入含有硝酸锂的助熔剂，充分混合后，高温熔融。熔融

物倒入铂金模子形成扁平玻璃片后,再用 X 荧光光谱仪分析。同时称取另一份试样放入马弗炉中,于 1 000℃ 加热 1 h。冷却后称重。样品加热前后的质量差即是烧失量。

微量元素用电感耦合等离子体发射光谱仪测定。试样用高氯酸、硝酸、氢氟酸消解。蒸至近干后的样品用稀盐酸溶解定容,再用等离子体发射光谱与等离子体质谱进行分析。

稀土元素用电感耦合等离子体质谱仪测定。将样品加入到偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂中,混合均匀,在 1 025℃ 以上的熔炉中熔化。熔液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸定容,再用等离子体质谱仪分析。

3 测试结果

研究区泥质岩主量元素、微量元素和稀土元素的测试结果(表 1)显示,除个别样品(PM16-2)外,沙木罗组泥质岩 SiO_2 含量中等,为 55.10% ~ 64.65%,均值 59.97%, BaO 、 Cr_2O_3 、 MnO 、 P_2O_5 、 SrO 、 TiO_2 的含量相对较低。 Co_x 等(1995)提出沉积物 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 0 ~ 0.3 时,代表原始沉积物主要由粘土矿物组成, $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 0.3 ~ 0.9 时,代表原始沉积物主要由长石组成。研究区泥质岩 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 0.13 ~ 0.25,均值 0.19,指示沉积物原始组分以粘土矿物为主。相对于全球俯冲沉积物的化学丰度(Plank and Langmuir, 1998; 赵振华, 2016),研究区泥质岩整体相对富集 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 TiO_2 组分,富集系数 > 1; 相对亏损 CaO 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 组分,富集系数 < 1; SiO_2 的富集系数等于 1(图 3)。

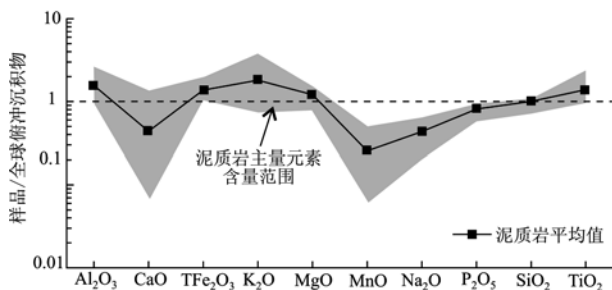


图 3 泥质岩主量元素平均值蛛网图

Fig. 3 Spider diagrams of median values of major element concentrations of argillaceous rocks

由表 1 可知,与全球俯冲沉积物的化学丰度(Plank and Langmuir, 1998; 赵振华, 2016)相比,研

究区泥质岩中富集的元素有 V、Cr、Zn、Rb、Cs、Zr、Nb、Ta、Th, 富集系数接近于 1 的元素有 Ni、Hf、Pb, 亏损的元素有 Co、Cu、Sr、Ba、Y、U。

沙木罗组泥质岩 ΣREE 变化较大,介于 $129.05 \times 10^{-6} \sim 341.28 \times 10^{-6}$ 之间,均值 200.02×10^{-6} 。 Eu/Eu_n^* 值为 0.87 ~ 1.02,均值 0.95,无 Eu 异常,从剖面下部到上部有先增后减的现象,但变化范围很小。 $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 值为 1.27 ~ 1.67,均值 1.38,轻稀土元素相对富集。经北美页岩标准化后,研究区泥质岩稀土元素配分曲线为略微右倾的轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损型,重稀土元素曲线较为平坦(图 4)。

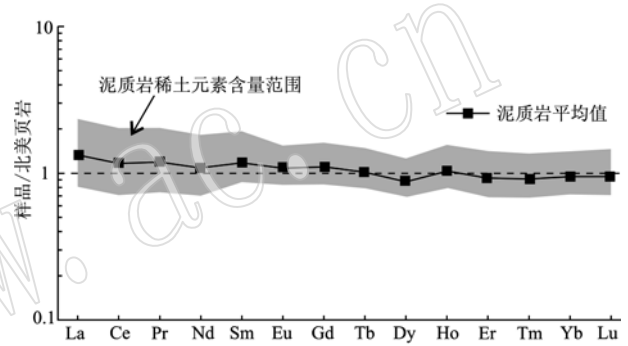


图 4 泥质岩稀土元素分布模式图

Fig. 4 NASC-normalized rare earth element plots for argillaceous rocks

4 讨论

4.1 构造背景判别

不同环境下的沉积物具有不同的地球化学特征。将本次测试样品的数据在 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 判别图中进行分析,可见除个别样品(PM16-2,岩石中 SiO_2 含量偏低)偏离外,沙木罗组泥质岩的其他投点均位于活动大陆边缘区域及附近(图 5)。在泥质岩的 La - Th - Sc 判别图解中,沙木罗组泥质岩投点均落于与岩浆弧有关的沉积物区域,并且剖面中下部样品投点与后太古宙澳大利亚页岩范围一致,至剖面上部岩浆弧的特征更为明显(图 6),由剖面下部至上部可能指示板块俯冲加剧、岩浆活动加强的地质过程。

REE 参数和分布特征可用于判别沉积物源区的构造背景(Bhatia, 1985)。在 Bhatia 提出的判别模式中,研究区沙木罗组泥质岩总体具有活动大陆边缘的构造背景(表 2)。在剖面下部泥质岩对应的

表 1 研究区泥质岩的主量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果
Table 1 Analyses of main elements ($w_B/\%$), trace elements and REE ($w_B/10^{-6}$) of argillaceous rocks

| 样品号 | 下部 | | | | | 中部 | | | 上部 | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | PM16-1 | PM16-2 | PM16-3 | PM16-4 | PM16-5 | PM16-6 | PM16-7 | PM16-8 | PM16-9 | PM16-10 | PM16-11 | PM16-12 |
| Al ₂ O ₃ | 18.83 | 31.44 | 15.97 | 19.19 | 18.58 | 19.02 | 11.18 | 13.67 | 17.19 | 19.38 | 19.50 | 18.98 |
| BaO | 0.05 | 0.08 | 0.03 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.05 |
| CaO | 2.33 | 0.51 | 2.71 | 1.99 | 2.77 | 0.40 | 7.96 | 4.39 | 4.51 | 0.75 | 1.07 | 1.73 |
| Cr ₂ O ₃ | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| TFe ₂ O ₃ | 7.46 | 10.48 | 6.83 | 7.86 | 6.55 | 7.30 | 5.60 | 5.45 | 7.15 | 7.13 | 6.65 | 7.17 |
| K ₂ O | 3.88 | 7.71 | 3.18 | 3.80 | 3.35 | 3.25 | 1.50 | 2.55 | 3.49 | 3.61 | 3.98 | 3.73 |
| MgO | 2.77 | 3.66 | 2.61 | 2.85 | 2.62 | 2.00 | 2.87 | 3.35 | 3.22 | 3.29 | 3.36 | 3.27 |
| MnO | 0.09 | 0.03 | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 0.16 | 0.07 | 0.10 | 0.04 | 0.02 | 0.07 |
| Na ₂ O | 1.16 | 0.49 | 1.16 | 1.42 | 1.57 | 0.57 | 1.22 | 1.20 | 0.69 | 1.25 | 1.00 | 0.91 |
| P ₂ O ₅ | 0.16 | 0.18 | 0.17 | 0.17 | 0.12 | 0.11 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 |
| SiO ₂ | 60.51 | 41.78 | 64.65 | 59.12 | 61.08 | 62.57 | 61.03 | 60.38 | 55.10 | 59.02 | 57.99 | 58.22 |
| SrO | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| TiO ₂ | 0.92 | 1.47 | 0.81 | 0.91 | 0.88 | 0.78 | 0.60 | 0.71 | 0.78 | 0.87 | 0.88 | 0.86 |
| LOI | 2.52 | 2.28 | 1.83 | 2.55 | 2.37 | 4.15 | 7.83 | 7.67 | 7.38 | 4.66 | 5.00 | 5.42 |
| Ga | 23.80 | 39.70 | 20.20 | 25.00 | 24.90 | 23.90 | 13.05 | 17.65 | 21.70 | 24.20 | 26.50 | 24.00 |
| Sr | 110.0 | 85.5 | 124.0 | 116.0 | 128.5 | 84.8 | 205.0 | 173.5 | 173.0 | 118.5 | 53.2 | 85.1 |
| Th | 17.20 | 28.00 | 15.60 | 16.80 | 16.75 | 18.95 | 9.75 | 11.95 | 15.75 | 14.75 | 15.25 | 15.50 |
| U | 3.14 | 5.01 | 2.76 | 3.00 | 2.97 | 2.86 | 2.02 | 2.19 | 2.46 | 2.42 | 2.53 | 2.60 |
| V | 175 | 287 | 145 | 173 | 165 | 133 | 95 | 131 | 159 | 204 | 199 | 184 |
| Zr | 176 | 262 | 181 | 167 | 157 | 165 | 164 | 188 | 150 | 171 | 171 | 158 |
| Ag | 0.01 | <0.01 | 0.03 | 0.09 | 0.04 | 0.04 | 0.08 | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.08 | 0.05 |
| As | 10.3 | 113.0 | 13.6 | 42.3 | 23.3 | 6.8 | 6.1 | 27.5 | 13.6 | 23.1 | 7.6 | 8.7 |
| Cd | 0.05 | 0.03 | 0.07 | 0.06 | 0.05 | 0.03 | 0.17 | 0.06 | 0.08 | 0.03 | <0.02 | 0.04 |
| Co | 19.4 | 33.6 | 19.0 | 19.9 | 16.2 | 16.2 | 15.2 | 14.8 | 15.0 | 13.3 | 12.0 | 13.3 |
| Cu | 16.4 | 5.5 | 3.6 | 24.4 | 6.1 | 22.5 | 35.7 | 40.3 | 40.4 | 32.4 | 38.6 | 33.3 |
| Mo | 0.24 | 0.30 | 0.43 | 0.27 | 0.18 | 0.31 | 0.55 | 0.43 | 0.09 | 0.18 | 28.60 | 0.13 |
| Hf | 4.8 | 7.3 | 4.9 | 4.6 | 4.4 | 4.7 | 4.2 | 5.0 | 4.3 | 4.7 | 4.6 | 4.4 |
| Rb | 162.0 | 259.0 | 156.0 | 185.0 | 163.5 | 178.0 | 78.7 | 101.5 | 145.0 | 141.0 | 160.0 | 151.5 |
| Cs | 11.25 | 23.20 | 10.60 | 12.30 | 10.55 | 12.85 | 6.99 | 7.99 | 10.65 | 10.35 | 11.60 | 10.40 |
| Sc | 18.5 | 29.9 | 16.0 | 19.0 | 19.5 | 17.9 | 11.7 | 14.5 | 14.3 | 22.6 | 21.4 | 18.9 |
| Y | 30.8 | 43.0 | 28.7 | 30.5 | 27.4 | 32.2 | 25.3 | 23.1 | 27.0 | 27.2 | 29.8 | 27.6 |
| La | 46.4 | 75.0 | 39.2 | 47.8 | 44.7 | 44.1 | 25.9 | 31.3 | 38.4 | 36.7 | 40.7 | 39.5 |
| Ce | 91.3 | 148.0 | 79.9 | 95.3 | 89.4 | 88.2 | 51.7 | 63.2 | 78.7 | 72.8 | 80.7 | 78.5 |
| Pr | 10.25 | 16.05 | 8.89 | 10.35 | 9.87 | 9.97 | 5.86 | 7.12 | 8.62 | 7.85 | 9.09 | 8.73 |
| Nd | 38.8 | 60.2 | 33.8 | 38.8 | 37.1 | 37.9 | 23.2 | 27.0 | 33.2 | 30.5 | 34.1 | 32.5 |
| Sm | 7.31 | 11.00 | 6.66 | 7.39 | 6.76 | 7.38 | 5.17 | 4.94 | 6.27 | 5.38 | 6.10 | 5.99 |
| Eu | 1.39 | 1.91 | 1.38 | 1.49 | 1.42 | 1.37 | 1.18 | 1.03 | 1.30 | 1.13 | 1.25 | 1.19 |
| Gd | 6.08 | 8.39 | 5.79 | 6.24 | 5.61 | 6.40 | 4.99 | 4.37 | 5.52 | 4.68 | 5.39 | 5.28 |
| Tb | 0.92 | 1.26 | 0.87 | 0.94 | 0.81 | 0.99 | 0.75 | 0.67 | 0.81 | 0.71 | 0.85 | 0.78 |
| Dy | 5.44 | 7.30 | 4.99 | 5.51 | 4.72 | 5.62 | 4.19 | 3.99 | 4.76 | 4.42 | 5.04 | 4.69 |
| Ho | 1.17 | 1.62 | 0.99 | 1.16 | 1.03 | 1.18 | 0.88 | 0.83 | 0.99 | 0.98 | 1.09 | 1.00 |
| Er | 3.38 | 4.81 | 3.04 | 3.26 | 3.03 | 3.48 | 2.33 | 2.48 | 2.91 | 3.00 | 3.12 | 2.84 |
| Tm | 0.49 | 0.68 | 0.43 | 0.47 | 0.43 | 0.50 | 0.34 | 0.37 | 0.43 | 0.42 | 0.45 | 0.45 |
| Yb | 3.07 | 4.36 | 2.88 | 3.05 | 3.04 | 3.26 | 2.22 | 2.32 | 2.69 | 2.79 | 2.91 | 2.79 |
| Lu | 0.48 | 0.70 | 0.43 | 0.48 | 0.46 | 0.47 | 0.34 | 0.37 | 0.42 | 0.43 | 0.43 | 0.44 |
| ΣREE | 216.48 | 341.28 | 189.25 | 222.24 | 208.38 | 210.82 | 129.05 | 149.99 | 185.02 | 171.79 | 191.22 | 184.68 |
| K ₂ O/Al ₂ O ₃ | 0.21 | 0.25 | 0.20 | 0.20 | 0.18 | 0.17 | 0.13 | 0.19 | 0.20 | 0.19 | 0.20 | 0.20 |
| Al ₂ O ₃ /TiO ₂ | 20.47 | 21.39 | 19.72 | 21.09 | 21.11 | 24.38 | 18.63 | 19.25 | 22.04 | 22.28 | 22.16 | 22.07 |
| CIA | 70.14 | 76.82 | 68.75 | 70.22 | 68.26 | 80.05 | 66.48 | 67.08 | 73.97 | 74.79 | 74.11 | 72.97 |
| ICV | 0.77 | 0.59 | 0.83 | 0.78 | 0.79 | 0.53 | 1.03 | 0.96 | 0.75 | 0.70 | 0.71 | 1.11 |
| Th/Sc | 0.93 | 0.94 | 0.98 | 0.88 | 0.86 | 1.06 | 0.83 | 0.82 | 1.10 | 0.65 | 0.71 | 0.82 |
| Th/U | 5.48 | 5.59 | 5.65 | 5.60 | 5.64 | 6.63 | 4.83 | 5.46 | 6.40 | 6.10 | 6.03 | 5.96 |
| La/Th | 2.70 | 2.68 | 2.51 | 2.85 | 2.67 | 2.33 | 2.66 | 2.62 | 2.44 | 2.49 | 2.67 | 2.55 |
| Rb/Cs | 14.40 | 11.16 | 14.72 | 15.04 | 15.50 | 13.85 | 11.26 | 12.70 | 13.62 | 13.62 | 13.79 | 14.57 |
| LREE/HREE | 9.29 | 10.72 | 8.75 | 9.53 | 9.89 | 8.63 | 7.05 | 8.74 | 8.98 | 8.86 | 8.92 | 9.11 |
| Eu/Eu _n [*] | 0.91 | 0.87 | 0.98 | 0.96 | 1.01 | 0.87 | 1.02 | 0.97 | 0.97 | 0.99 | 0.96 | 0.93 |
| Ce/Ce _n [*] | 0.91 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0.93 | 0.92 | 0.91 | 0.92 | 0.94 | 0.93 | 0.91 | 0.92 |
| (La/Yb) _N | 10.21 | 11.62 | 9.20 | 10.59 | 9.94 | 9.14 | 7.88 | 9.12 | 9.65 | 8.89 | 9.45 | 9.57 |
| Eu/Eu _N [*] | 0.62 | 0.59 | 0.66 | 0.65 | 0.69 | 0.60 | 0.70 | 0.66 | 0.66 | 0.67 | 0.65 | 0.63 |
| (Gd/Yb) _N | 1.61 | 1.56 | 1.63 | 1.66 | 1.50 | 1.59 | 1.82 | 1.53 | 1.66 | 1.36 | 1.50 | 1.53 |

从左至右代表从剖面底部到顶部的采集顺序; $Ce/Ce_n^* = 2 Ce_n / (La_n + Pr_n)$, $Eu/Eu_n^* = 2 Eu_n / (Sm_n + Gd_n)$, $Eu/Eu_N^* = 2 Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$, 其中 n 代表北美页岩标准化, N 代表球粒陨石标准化; 北美页岩据 Haskin 和 Haskin(1966), 球粒陨石据 Taylor 和 McLennan(1985)。

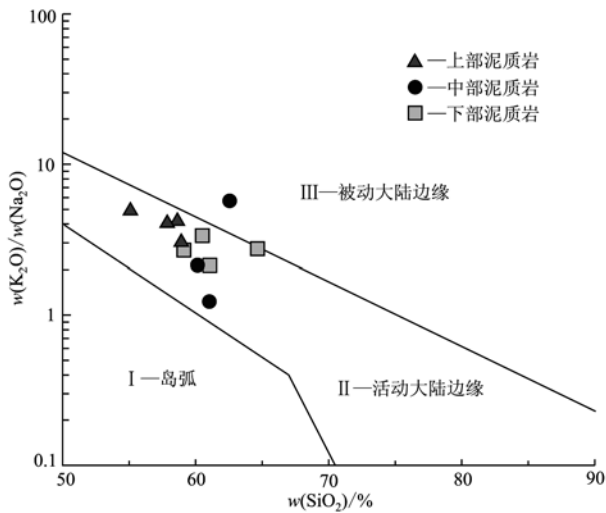


图5 $K_2O/Na_2O - SiO_2$ 构造背景判别图解(底图据 Roser and Korsch, 1986)

Fig. 5 $K_2O/Na_2O - SiO_2$ diagram for tectonic setting (base map after Roser and Korsch, 1986)

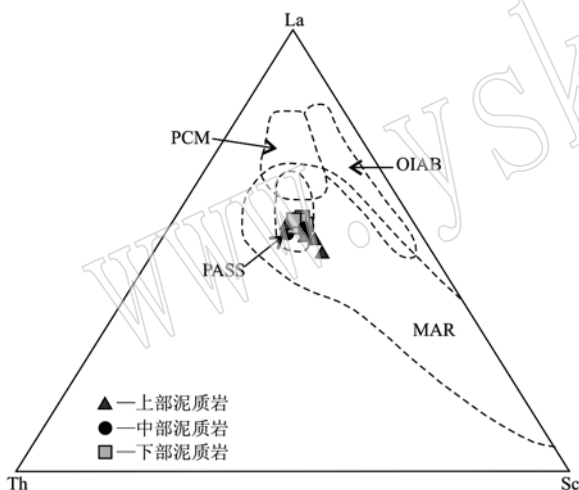


图6 泥质岩 La-Th-Sc 三角判别图(底图据 Savoy *et al.*, 2000)

Fig. 6 La-Th-Sc diagram of argillaceous rocks (base map after Savoy *et al.*, 2000)

PCM—被动大陆边缘沉积物; OIAB—洋岛碱性玄武岩;
PASS—后太古宙澳大利亚页岩; MAR—与岩浆弧有关的沉积物
PCM—passive continental margin; OIAB—oceanic island alkali
basalt; PASS—post-Archean Australian shale; MAR—magmatic
arc related sediments

稀土元素特征具有活动大陆边缘-被动大陆边缘过渡的沉积物特征,剖面上部泥质岩对应的稀土元素特征指示较明显的活动大陆边缘构造背景,可能代表班-怒特提斯洋俯冲消减作用加剧的地质过程(表2)。

经北美页岩标准化后,沙木罗组泥质岩 Ce/Ce^*

值为0.91~0.94,均值0.92,具弱Ce负异常,从剖面下部到上部变化范围小,稀土元素配分曲线为略微右倾的轻稀土元素富集和重稀土元素相对亏损型,重稀土元素曲线较为平坦(图4)。多数活动大陆边缘构造背景下形成的沉积物稀土元素丰度低,无Eu异常,轻稀土元素富集程度可变(赵振华, 2016)。Murray等(1990)对加利福尼亚海岸圣弗兰西斯科湾侏罗纪-白垩纪页岩和燧石的研究表明,距洋脊顶400 km 之内的扩张脊附近区 Ce/Ce^* 值约为0.29,大洋盆地底 Ce/Ce^* 值约为0.55,大陆边缘区(陆块约1 000 km 之内) Ce/Ce^* 值为0.90~1.30。综上所述,沙木罗组泥质岩具有活动大陆边缘沉积物的稀土元素特征,因此,本文认为研究区沙木罗组泥质岩形成于活动大陆边缘环境。

4.2 物源与风化作用

沙木罗组泥质岩 Al_2O_3/TiO_2 值变化于18~25之间,平均21,介于铁镁质-长英质过渡系列火成岩 Al_2O_3/TiO_2 值(8~21)与长英质端员火成岩 Al_2O_3/TiO_2 值(21~70)之间(Hayashi *et al.*, 1997),表明研究区泥质岩初始源区母岩主要为长英质端员火成岩。在 $TiO_2 - Zr$ 关系图中,沙木罗组泥质岩投点落在长英质火成岩物源区(图7a)。由 $Co/Y - Ti/Zr$ 关系图可知,沙木罗组泥质岩投点位于太古宙英云闪长岩(TTG)-安山岩区域范围内(图7b)。考虑到随着地层时代的变新, $(Gd/Yb)_N$ 值逐渐变小(邵磊等, 2001),沉积物的 $(Gd/Yb)_N$ 值、 Eu/Eu^* 值(球粒陨石标准化)分别以2和1为界,大于此值则代表物源区的母岩时代主要为太古宙,小于此值则代表母岩时代主要为后太古宙(Wani and Mondal, 2011)。沙木罗组泥质岩 $(Gd/Yb)_N$ 值为1.36~1.82,均值1.58; Eu/Eu^* 值为0.58~0.70,均值0.65,指示泥质岩源区母岩时代主要为后太古宙。因此,TTG作为泥质岩源区母岩予以排除,安山岩作为源区母岩指示了活动大陆边缘的沉积背景。在La-Th-Sc三角图(图8)中,相对于花岗岩而言,沙木罗组泥质岩投点更靠近花岗闪长岩,从剖面下部至上部源区母岩具有由中酸性岩浆岩(花岗闪长岩)向中性岩浆岩(安山岩)的演化趋势,可能暗示板块俯冲加剧、岩浆活动加强的地质过程。这些证据表明沙木罗组泥质岩的初始源区母岩以花岗闪长岩、安山岩为主,花岗岩次之。

沙木罗组泥质岩Th/Sc值变化于0.65~1.10之间,平均值0.88,高于中国东部地壳0.6的界线值(迟清华等, 2007),接近于上地壳0.97的界限值

表 2 不同构造背景沉积盆地沉积岩的稀土元素特征

$w_B/10^{-6}$

Table 2 REE characteristics of sedimentary rocks of different tectonic settings of sedimentary basins

| 大地构造背景 | 物源区类型 | La | Ce | Σ REE | La/Yb | $(La/Yb)_N$ | LREE/HREE | Eu/Eu _N * |
|--------|-----------|--------------|--------------|----------------|--------------|-------------|-------------|----------------------|
| 大洋岛弧 | 未切割的岩浆弧 | 8.00 ± 1.7 | 19.00 ± 3.70 | 58.00 ± 10.00 | 4.20 ± 1.30 | 2.80 ± 0.90 | 3.80 ± 0.90 | 1.04 ± 0.11 |
| 大陆岛弧 | 切割的岩浆弧 | 27.00 ± 4.50 | 59.00 ± 8.20 | 146.00 ± 20.00 | 11.00 ± 3.60 | 7.50 ± 2.50 | 7.70 ± 1.70 | 0.79 ± 0.13 |
| 活动大陆边缘 | 抬升基底 | 37 | 78 | 186 | 12.5 | 8.5 | 9.1 | 0.6 |
| 被动大陆边缘 | 克拉通内部构造高地 | 39 | 85 | 210 | 15.9 | 10.8 | 8.5 | 0.56 |
| 研究区 | 下部泥质岩 | 50.62 | 100.78 | 235.53 | 15.26 | 10.31 | 9.64 | 0.64 |
| | 中部泥质岩 | 33.77 | 67.70 | 163.29 | 12.90 | 8.71 | 8.14 | 0.65 |
| | 上部泥质岩 | 38.83 | 77.68 | 183.18 | 13.89 | 9.39 | 8.97 | 0.65 |
| | 泥质岩均值 | 42.47 | 84.81 | 200.02 | 14.22 | 9.61 | 9.04 | 0.65 |

非研究区数据据 Bhatia(1985)。

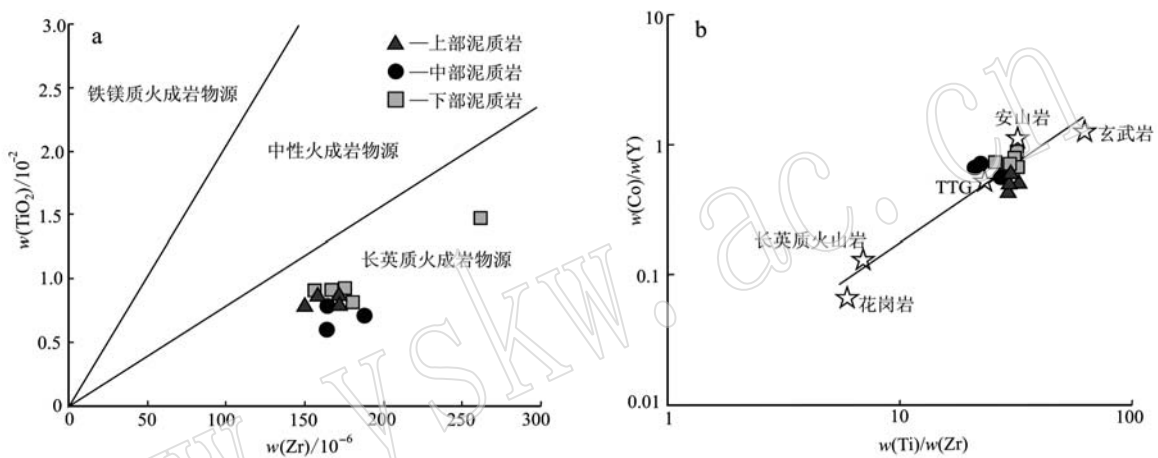


图 7 泥质岩 $TiO_2 - Zr$ (a, 据 Hayashi *et al.*, 1997) 与 $Co/Y - Ti/Zr$ (b, 据 Ishiga and Dozen, 1997) 判别图解
Fig. 7 $TiO_2 - Zr$ (a, after Hayashi *et al.*, 1997) and $Co/Y - Ti/Zr$ (b, after Ishiga and Dozen, 1997) diagrams of argillaceous rocks

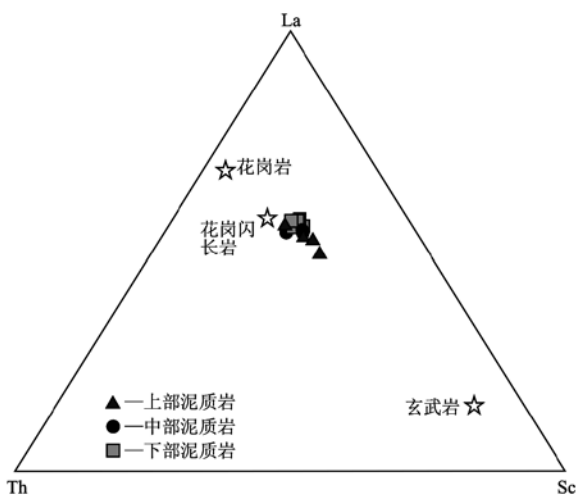


图 8 泥质岩 La - Th - Sc 三角判别图(底图据 Cullers and Podkovyrov, 2000)

Fig. 8 La - Th - Sc diagram of argillaceous rocks (base map after Cullers and Podkovyrov, 2000)

(Taylor and McLennan, 1985)。泥质岩 Rb/Cs 值变化于 11 ~ 16 之间, 平均值 13.5, 低于北美页岩混合样的平均值(24), 与上地壳 Rb/Cs 值(19)最为接近 (Taylor and McLennan, 1985)。 $Th - Sc$ 图解可用于识别不同源区的母岩, 在 $Th - Sc$ 图解中沙木罗组泥质岩的投点位于 Th/Sc 值等于 1 趋势线附近(图 9a), 具有典型大陆上地壳的特征 (Totten *et al.*, 2000), 指示沉积物初始源区母岩具有大陆上地壳的特征, 母岩中含有较多的硅铝质组分。在 $Co/Th - La/Sc$ 图解(图 9b)中, 沙木罗组泥质岩投点落于平均上地壳、酸性火山岩、显生宙克拉通砂岩之间, 其平均成分更接近于平均上地壳和酸性火山岩。以上证据表明沙木罗组泥质岩源区母岩具有上地壳的特征, 母岩中含有较多的硅铝质组分。

Bhatia 和 Taylor 通过对澳大利亚 Tasman 地槽沉积物的元素地球化学研究认为, La, Th, U, Hf 含量

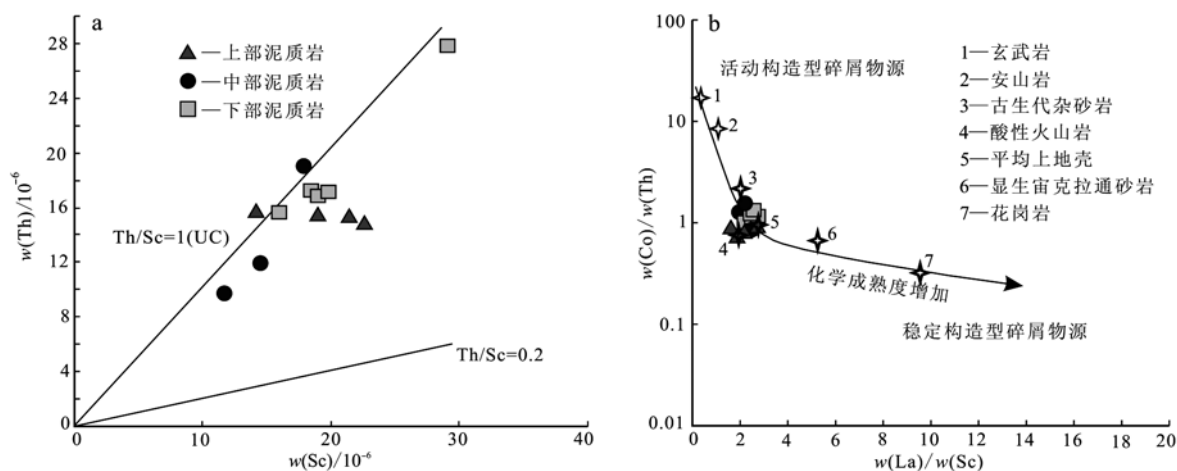


图9 泥质岩 Th-Sc 和 La/Sc-Co/Th 图解(底图据徐文礼等, 2014)

Fig.9 Th-Sc and La/Sc-Co/Th diagrams of argillaceous rocks(after Xu Wenli *et al.*, 2014)

和 Th/U 值可以指示沉积物的源区母岩 (Bhatia and Taylor, 1981)。研究区沙木罗组泥质岩相应元素的含量及比值反映泥质岩的源区具有构造高地和再循环造山带、切割的岩浆弧的特征, 源岩性质为中酸性

岩浆岩和沉积岩(表3), 由剖面下部至上部, 样品相应元素的含量及比值特征与切割的岩浆弧的拟合程度逐渐增大, 指示岩浆弧对泥质岩物源的贡献作用逐渐增大。

表3 不同性质盆地中沉积岩的元素地球化学特征

 $w_B/10^{-6}$

Table 3 Geochemical characteristics of sedimentary rocks from different basins

| 构造性质 | 源区 | 源岩性质 | La | Th | U | Hf | Th/U | La/Th |
|---------|-------------|---------|-------|-------|------|------|------|-------|
| 前弧盆地 | 未切割的岩浆弧 | 安山岩 | 25 | 4 | 1.2 | 3.5 | 3.1 | 6.9 |
| 弧间盆地 | 切割的岩浆弧 | 英安岩和沉积岩 | 42 | 14.4 | 2.9 | 6.6 | 4.9 | 3 |
| 裂开的大陆边缘 | 构造高地和再循环造山带 | 花岗岩和沉积岩 | 45 | 20 | 3.8 | 5.4 | 5.5 | 2.1 |
| 研究区 | 下部泥质岩 | | 50.62 | 18.87 | 3.38 | 5.20 | 5.59 | 2.68 |
| | 中部泥质岩 | | 33.77 | 13.55 | 2.36 | 4.63 | 5.64 | 2.53 |
| | 上部泥质岩 | | 38.83 | 15.31 | 2.50 | 4.5 | 6.12 | 2.54 |
| | 泥质岩均值 | | 42.47 | 16.34 | 2.85 | 4.81 | 5.78 | 2.61 |

非研究区数据据 Bhatia 和 Taylor(1981)。

在 La/Yb- Σ REE 图解中, 泥质岩所有数据点落在碱性玄武岩、沉积岩和花岗岩三者的交汇区(图10)。张金亮等(2006)研究认为, 以花岗岩为源区母岩时泥质岩多具有 Eu 负异常($Eu/Eu^* < 0.90$, 球粒陨石标准化), 以玄武岩为源区母岩时泥质岩多无 Eu 负异常($0.90 < Eu/Eu^* < 1.0$)。沙木罗组泥质岩 Eu/Eu^* 平均值分别为 0.65, 小于 0.9, 因此, 玄武岩作为源区母岩应予排除, 源区母岩应为花岗岩和沉积岩。

成分变化指数(ICV)的计算公式为: $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO^* + MgO + TiO_2) / Al_2O_3$, 式中各氧化物含量的单位均为摩尔分数 (McLennan, 1993; Cox and Lowe, 1995; Cox *et al.*,

1995), CaO^* 指硅酸盐组分中 Ca 的摩尔分数, 本文采用 McLennan(1993)提出的硅酸盐中 Ca/Na 值一定的方法计算样品中 CaO^* 的摩尔分数。未成熟的泥质岩非粘土质矿物含量较高, ICV 值 > 1 ; 成熟的泥质岩伊利石族等粘土矿物含量较高, ICV 值 < 1 (Cullers and Podkovyrov, 2000)。沙木罗组泥质岩中 Al_2O_3 与 K_2O 具明显的正相关性($R^2 = 0.96$) (图11a), 指示岩石中伊利石等含铝的粘土矿物含量较高。泥质岩 ICV 值变化于 0.53 ~ 1.11 之间, 均值 0.80, 指示泥质岩为成熟的泥质岩。泥质岩的 ICV 值与斜长石的 ICV 值(0.6)、碱性长石的 ICV 值(0.8 ~ 1.0) (Cox *et al.*, 1995) 最为接近, 表明泥质岩源区矿物组成以斜长石、碱性长石为主。

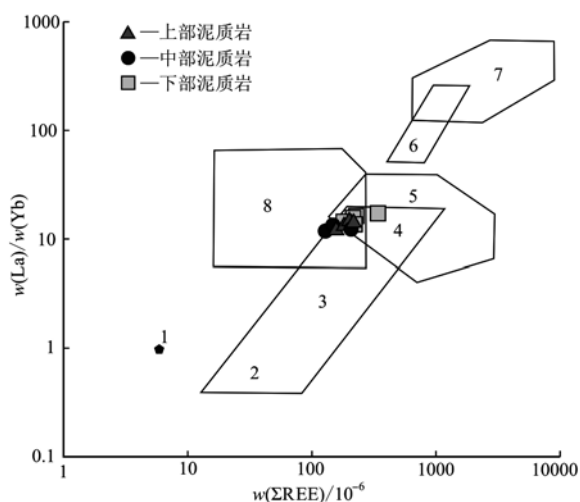


图 10 泥质岩 La/Yb - ΣREE 关系图解(底图据 Allegre and Minster, 1978)

Fig. 10 La/Yb - ΣREE diagram of argillaceous rocks (base map after Allegre and Minster, 1978)

- 1—球粒隕石; 2—大洋拉斑玄武岩; 3—大陆拉斑玄武岩; 4—碱性玄武岩; 5—花岗岩; 6—金伯利岩; 7—碳酸盐岩; 8—沉积岩
- 1—chondrite; 2—oceanic tholeiite; 3—continental tholeiite;
- 4—alkali basalt; 5—granite; 6—kimberlite; 7—carbonate;
- 8—sedimentary rock

化学蚀变指数(CIA)的计算公式为: $CIA = 100 \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O}$, 式中各氧化物含量的单位均为摩尔分数(Nesbitt and Young, 1982), CaO^* 的含义及计算方法同上。沙木罗组泥质岩 CIA 值变化于 66 ~ 80 之间, 平均值 72, 介于温暖、湿润条件下中等化学风化程度 CIA 值(65 ~ 85) 范围内(Nesbitt and Young, 1982, 1989), 表明泥质岩沉积时具中等程度的化学风化作用, 沉积物沉积时气候较温暖、湿润。泥质岩中 Al_2O_3 与 TiO_2 具明显的正相关性($R^2 = 0.94$) (图 11b), 也指示源区可能存在较强的化学风化作用, 导致 Al、Ti 等元素的残余富集。A - CN - K 图解可以用来判断源岩成分、揭示钾交代作用对源岩的影响(Nesbitt and Young, 1989; Fedo *et al.*, 1995; Nesbitt *et al.*, 1996; Fedo *et al.*, 1997; Young and Nesbitt, 1999)。在化学风化作用初期主要风化斜长石, 风化产物的组分演化趋势线与 A - CN 连线平行; 在风化作用中期, 主要风化黑云母、钾长石、伊利石等矿物; 在风化作用晚期, 主要风化次生粘土矿物, 最终向定点 A 靠近(Nesbitt and Young, 1984)。如果在化学风化过程中

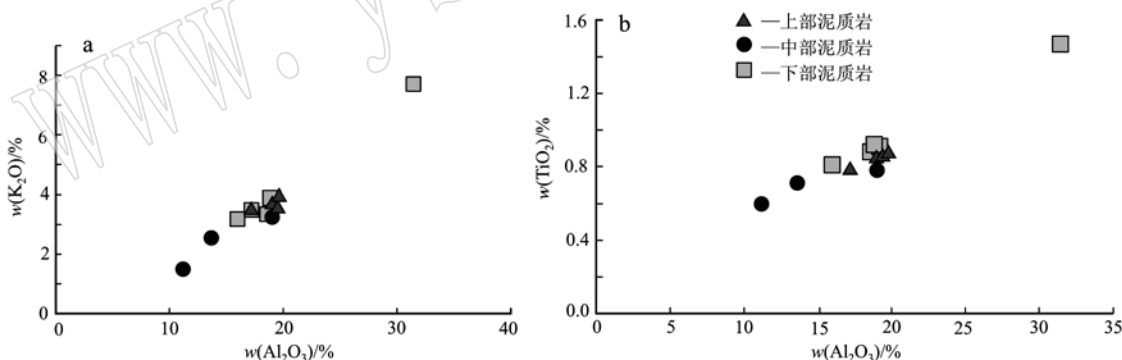


图 11 泥质岩 $K_2O - Al_2O_3$ 和 $TiO_2 - Al_2O_3$ 图解

Fig. 11 $K_2O - Al_2O_3$ and $TiO_2 - Al_2O_3$ plots of argillaceous rocks

沉积物发生了钾交代作用, 风化产物的组分演化趋势线会向自然风化趋势线的右侧偏离(冯连君等, 2003)。在 A - CN - K 三角图中(图 12), 沙木罗组泥质岩投点落于花岗岩与花岗闪长岩自然风化趋势线附近, 与 A - CN 连线平行, 表明泥质岩成岩后未发生钾交代作用, 保留了原始沉积物的信息, 指示泥质岩初始源区母岩为中酸性岩浆岩。

4.3 班-怒特提斯洋西段的俯冲时限

由于在青藏高原演化史上的特殊地位, 班怒带

长期以来受到了广泛的关注和研究, 但对于洋盆的开合时限至今仍没有统一的认识。对于班怒缝合带西段, 有学者认为不存在侏罗纪俯冲, 原因是缺少侏罗纪岛弧岩浆岩(Zhang, 1988)。也有学者据蛇绿岩和花岗岩类岩体的同位素年代学资料认为班-怒特提斯洋西段在中晚侏罗世才俯冲消减(史仁灯, 2007; 张玉修, 2007; 曲晓明等, 2009; 周涛等, 2014; Liu D *et al.*, 2014; Liu W *et al.*, 2014)。Kapp 等(2003)据沉积地层的掩盖关系, 把班-怒特

提斯洋西段的闭合时间限定在晚侏罗世—早白垩世,即 145 Ma 左右。本文研究结果显示,沙木罗组泥质岩形成于活动大陆边缘的构造背景,由底部到上部可能反映了板块俯冲加剧、岩浆活动加强的地质过程,进而从沉积岩地球化学方面提供了班-怒特提斯洋西段俯冲消减的信息。

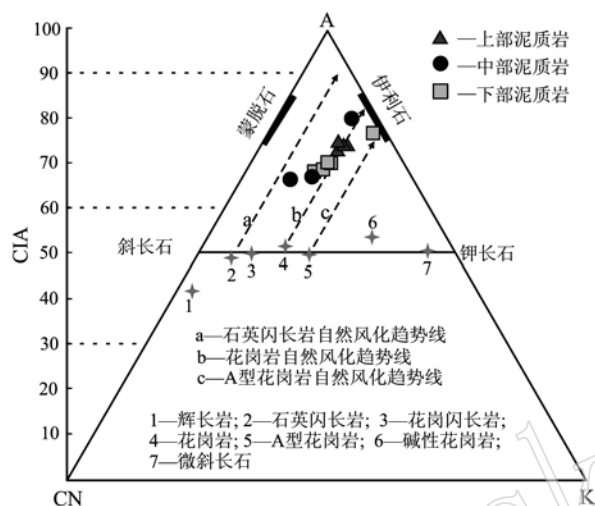


图 12 泥质岩 A-CN-K 三角图(底图据 Nesbitt and Young, 1984, 1989; Fedo *et al.*, 1995)
Fig. 12 A-CN-K diagram of argillaceous rocks (base map after Nesbitt and Young, 1984, 1989; Fedo *et al.*, 1995)

沙木罗组泥质岩源区母岩的时代主要为后太古宙,具上地壳的特征,源区矿物组成以斜长石、碱性长石为主,源区母岩为花岗闪长岩、花岗岩、安山岩等中酸性岩浆岩和碎屑岩。班怒带沙木罗组分布范围有限,主要集中于班怒带中西段日土—班戈一带,指示残余海盆的沉积环境。区域上,班怒带西段出露有木嘎岗日群(位于班怒带内部)、日干配错群和欧拉组(位于南羌塘地体)等比沙木罗组时代更老的地层,均发育有碎屑岩建造,同时在南羌塘地体发育侏罗纪—白垩纪的岩浆弧,这与本文地球化学数据反映的沙木罗组泥质岩源区母岩为中酸性岩浆岩和再循环的碎屑岩信息一致。班怒带西段狮泉河一带可划分出 3 条俯冲带:北面一条位于班公湖—日土县城一带;中间一条位于狮泉河—改则一线的北侧,是班-怒带的主俯冲带;南面一条位于拉果错湖北岸

(Wang *et al.*, 2008; 曲晓明等,2010)。中侏罗世晚期(166.4 ± 2.0 Ma、165.5 ± 1.9 Ma)班公湖—日土和狮泉河两条俯冲带同时向北俯冲(曲晓明等,2009)。本文研究表明,研究区沙木罗组泥质岩夹粉砂质泥质岩、岩屑石英砂岩的岩性组合代表深水的沉积环境。在板块向北俯冲的过程中,木嘎岗日群、日干配错群、欧拉组等老地层以及南羌塘岩浆弧开始接受风化剥蚀,风化产物向南搬运至大陆斜坡环境沉积成岩,沙木罗组为该地质过程的直接响应。本次在沙木罗组中下部发现了安山岩夹层,属于岛弧安山岩中的高镁安山岩,锆石 U-Pb 年龄为 141.3 ± 1.7 Ma(吴建亮,审稿中)^①,表明至少在 141 Ma 左右班-怒特提斯洋西段正在向北俯冲消减。

5 结论

(1) 泥质岩地球化学特征表明,沙木罗组沉积于活动大陆边缘的构造背景,剖面下部至上部可能反映了板块俯冲加剧、岩浆活动加强的地质过程。

(2) 沙木罗组泥质岩为成熟的泥质岩,源区矿物组成以斜长石、碱性长石为主,源区母岩的时代主要为后太古宙,源区母岩为花岗闪长岩、花岗岩、安山岩等中酸性岩浆岩和上地壳再循环的碎屑岩。

(3) 泥质岩源区母岩经历了中等程度的化学风化作用,沙木罗组沉积时气候较温暖、湿润。

(4) 沙木罗组泥质岩岩石地球化学特征显示至少在 141 Ma 左右班-怒特提斯洋西段正在向北俯冲消减。

致谢 在野外地质调查和样品采集过程中,项目组成员提供了极大的帮助,匿名审稿老师及编辑部老师提出了建设性意见和细致的修改,在此表示衷心的感谢!

References

- Allègre C J and Minster J F. 1978. Quantitative models of trace element behavior in magmatic processes[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 38(1): 1~25.
- Banerjee D M and Bhattacharya P. 1994. Petrology and geochemistry of

① 吴建亮, 刘文, 尹显科, 等. 藏北班公湖-怒江缝合带西段沙木罗组火山岩年代学、Hf 同位素及地球化学特征. 岩石学报(复审中).

- greywackes from the Aravalli Supergroup, Rajasthan, India and the tectonic evolution of a Proterozoic sedimentary basin[J]. *Precambrian Research*, 67(1~2): 11~35.
- Bhat M I and Ghosh S K. 2001. Geochemistry of the 2.51 Ga old Rampur group pelites, western Himalayas: Implications for their provenance and weathering[J]. *Precambrian Research*, 108(1~2): 1~16.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45(1): 97~113.
- Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181~193.
- Bhatia M R and Taylor S R. 1981. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia [J]. *Chemical Geology*, 33(1): 115~125.
- Chang C F, Chen N, Coward M P, *et al.* 1986. Preliminary conclusions of the Royal Society and Academia Sinica 1985 geotraverse of Tibet [J]. *Nature*, 323: 501~507.
- Chen Guorong, Liu Hongfei, Jiang Guangwu, *et al.* 2004. Discovery of the Shamuluo Formation in the central segment of the Bangong Co-Nujiang River suture zone, Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 23(2): 193~194 (in Chinese with English abstract).
- Chi Qinghua and Yan Mingcai. 2007. *Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 148 (in Chinese with English abstract).
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales[J]. *Chemical Geology*, 104(1~4): 1~37.
- Cox R and Lowe D R. 1995. A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover[J]. *Journal of Sedimentary Research Section A—Sedimentary Petrology and Processes*, 65(1): 1~12.
- Cox R, Lowe D R and Cullers R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2 919~2 940.
- Cullers R L. 1994. The controls on the major and trace element variation of shales, siltstones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(22): 4 955~4 972.
- Cullers R L and Podkovyrov V N. 2000. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling[J]. *Precambrian Research*, 104(1): 77~93.
- Du Dedao, Qu Xiaoming, Wang Genhou, *et al.* 2011. Bidirectional subduction of the middle Tethys oceanic basin in the west segment of Bangonghu-Nujiang Suture, Tibet: Evidence from Zircon U-Pb LA-ICPMS dating and petrogeochemistry of arc granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1 993~2 002 (in Chinese with English abstract).
- Fedo C M, Nesbitt H W and Young G M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 23(10): 921~924.
- Fedo C M, Young G M, Nesbitt H W, *et al.* 1997. Potassic and sodic metasomatism in the Southern Province of the Canadian Shield: Evidence from the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada [J]. *Precambrian Research*, 84(1~2): 17~36.
- Feng Lianjun, Chu Xuelei, Zhang Qirui, *et al.* 2003. CIA (chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers* (China University of Geosciences, Beijing), 10(4): 539~544 (in Chinese with English abstract).
- Haskin M A and Haskin L A. 1966. Rare Earths in European Shales: A Redetermination[J]. *Science*, 154(3 748): 507~509.
- Hayashi K, Fujisawa H, Holland H D, *et al.* 1997. Geochemistry of similar to 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4 115~4 137.
- Huang Qishuai, Shi Rendeng, Ding Binghua, *et al.* 2012. Re-Os isotopic evidence of MOR-type ophiolite from the Bangong Co for the opening of Bangong-Nujiang Tethys Ocean[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 465~478 (in Chinese with English abstract).
- Ishiga H and Dozen K. 1997. Geochemical indications of provenance change as recorded in Miocene shales: opening of the Japan Sea, San'in region, southwest Japan [J]. *Marine Geology*, 144(1): 211~228.
- Kapp P, Murphy M A, Yin A, *et al.* 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet [J]. *Tectonics*, 22(4): 253.
- Liang Sang, Zhou Tao, Li Dewei, *et al.* 2017. Timing of southward subduction of Meso-tethys in Bangong Lake: Constraints from supra-subduction zone (SSZ)-type gabbro [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(5): 989~1 000 (in Chinese with English abstract).
- Liu D, Huang Q, Fan S, *et al.* 2014. Subduction of the Bangong-Nujiang Ocean: Constraints from granites in the Bangong Co area, Tibet [J].

- Geological Journal, 49(2): 188 ~ 206.
- Liu W, Xia B, Zhong Y, *et al.* 2014. Age and composition of the Rebang Co and Julu ophiolites, central Tibet: Implications for the evolution of the Bangong Meso-Tethys[J]. International Geology Review, 56(4): 430 ~ 447.
- Liu Z F, Colin C, Huang W, *et al.* 2007. Climatic and tectonic controls on weathering in south China and Indochina Peninsula: Clay mineralogical and geochemical investigations from the Pearl, Red, and Mekong drainage basins[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 8(5): Q5005.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation[J]. Journal of Geology, 101(2): 295 ~ 303.
- McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, *et al.* 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. Geological Society of America Special Papers, 284: 21 ~ 40.
- McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, *et al.* 1995. Early Proterozoic crustal evolution: Geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(6): 1 153 ~ 1 177.
- Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Jones D L, *et al.* 1990. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale[J]. Geology, 18(3): 268 ~ 271.
- Naqvi S M, Sawkar R H, Rao D, *et al.* 1988. Geology, geochemistry and tectonic setting of Archaean greywackes from Karnataka Nucleus, India[J]. Precambrian Research, 39(3): 193 ~ 216.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 299(5885): 715 ~ 717.
- Nesbitt H W and Young G M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. Journal of Geology, 97(2): 129 ~ 147.
- Nesbitt H W and Young G M. 1984. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 48(7): 1 523 ~ 1 534.
- Nesbitt H W, Young G M, McLennan S M, *et al.* 1996. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. Journal of Geology, 104(5): 525 ~ 542.
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal Framework of the Gangdese Orogenic Belt and Its Evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 521 ~ 533 (in Chinese with English abstract).
- Passchier S and Krissek L A. 2008. Oligocene-Miocene Antarctic continental weathering record and paleoclimatic implications, Cape Roberts drilling project, Ross Sea, Antarctica[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 260(1 ~ 2): 30 ~ 40.
- Plank T and Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. Chemical Geology, 145(3 ~ 4): 325 ~ 394.
- Qiu Ruizhao, Zhou Shu, Deng Jingfu, *et al.* 2004. Dating of gabbro in the Shemalagou ophiolite in the western segment of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt, Tibet: With a discussion of the age of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt[J]. Geology in China, 31(3): 262 ~ 268 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Wang Ruijiang, Xin Hongbo, *et al.* 2009. Geochronology and geochemistry of igneous along the Bangong Lake rocks related to the subduction of the Tethys oceanic plate arc zone, the western Tibetan Plateau[J]. Geochimica, 38(6): 523 ~ 535 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Zhao Yuanyi, *et al.* 2010. Opening time of Bangong Lake Middle Tethys Oceanic Basin of the Tibet Plateau: Constraints from petro-geochemistry and zircon U-Pb LAICPMS dating of mafic ophiolites[J]. Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing), 17(3): 53 ~ 63 (in Chinese with English abstract).
- Roser B P and Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suits using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio [J]. Journal of Geology, 94(5): 635 ~ 650.
- Savoy L E, Stevenson R K and Mountjoy E W. 2000. Provenance of Upper Devonian-Lower Carboniferous miogeoclinal strata, southeastern Canadian Cordillera: Link between tectonics and sedimentation[J]. Journal of Sedimentary Research, 70(1A): 181 ~ 193.
- Scheffler K, Buehmann D and Schwark L. 2006. Analysis of Late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies—Response to climate evolution and sedimentary environment[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 240(1 ~ 2): 184 ~ 203.
- Shao Lei, Li Xianhua, Wei Gangjian, *et al.* 2001. The slope of the South China Sea material sources of the deposit[J]. Science in China(Series D), 31(10): 828 ~ 833 (in Chinese with English abstract).
- Shi Rendeng. 2007. The geochronology of SSZ-type ophiolites: Constraints on the evolution time of the Bangong Lake-Nujiang ocean basin[J]. Chinese Science Bulletin, 52(2): 223 ~ 227 (in Chinese with English abstract).
- Sreenivas B and Srinivasan R. 1994. Identification of paleosols in the Precambrian metapelitic assemblages of peninsular India major element

- geochemical approach[J]. *Current Science*, 67(2): 89 ~ 94.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 312.
- Totten M W, Hanan M A and Weaver B L. 2000. Beyond whole-rock geochemistry of shales: The importance of assessing mineralogic controls for revealing tectonic discriminants of multiple sediment sources for the Ouachita Mountain flysch deposits[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 112(7): 1 012 ~ 1 022.
- Wang W, Aitchison J C, Lo C, *et al.* 2008. Geochemistry and geochronology of the amphibolite blocks in ophiolitic mélanges along Bangong-Nujiang suture, central Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(1 ~ 2): 122 ~ 138.
- Wang Xibin. 1987. *Lithospheric Evolution of Himalayan: Tibet Ophiolites* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 336 (in Chinese with English abstract).
- Wani H and Mondal M E A. 2011. Evaluation of provenance, tectonic setting, and paleoredox conditions of the Mesoproterozoic-Neoproterozoic basins of the Bastar craton, Central Indian Shield: Using petrography of sandstones and geochemistry of shales[J]. *Lithosphere*, 3(2): 143 ~ 154.
- Xie Bingjing, Cheng Jie and Huang Chuanguan. 2010. The found and the significance for the west area of Samul Luo Group in the Bangong Lake-Nu River suture[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 33(2): 159 ~ 164 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenli, Zheng Rongcai, Yan Xue, *et al.* 2014. Trace and rare earth element geochemistry of the Early Paleozoic black shales in the Lower Yangtze area and its geological significances[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(4): 1 108 ~ 1 122 (in Chinese with English abstract).
- Yang S Y, Yim W W S and Huang G Q. 2008. Geochemical composition of inner shelf quaternary sediments in the northern South China Sea with implications for provenance discrimination and paleoenvironmental reconstruction[J]. *Global and Planetary Change*, 60(3 ~ 4): 207 ~ 221.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211 ~ 280.
- Young G M and Nesbitt H W. 1999. Paleoclimatology and provenance of the glaciogenic Gowganda Formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada: A chemostratigraphic approach[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 111(2): 264 ~ 274.
- Zhang H. 1988. The structure of the 1985 Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud: Appendix, structures and fabrics in the Kunlun Shan: Evidence for Mid-Palaeozoic (Pre-Upper Devonian) deformation[J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 327(1 594): 334 ~ 336.
- Zhang Jingliang and Zhang Xin. 2006. The Element geochemical features of ancient oceanic sedimentary environments in the Silurian period in the Tarim Basin[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 36(2): 200 ~ 208 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K, Xia B, Wang G, *et al.* 2004. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 116(9): 1 202.
- Zhang Yuxiu. 2007. *Tectonic Evolution of the Middle-western Bangong-Nujiang Suture, Tibet*(PHD Dissertation) [D]. Guangzhou: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 2016. *The Elements of the Trace Element Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 534 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Tao, Chen Chao, Liang Sang, *et al.* 2014. Zircon U-Pb geochronology and geochemical characteristics of volcanic rocks in the ophiolite melange at the Bangong Lake, Tibet[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(1): 157 ~ 167 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D, Zhao Z, Niu Y, *et al.* 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 429 ~ 1 454.

附中文参考文献

- 陈国荣, 刘鸿飞, 蒋光武, 等. 2004. 西藏班公湖-怒江结合带中段沙木罗组的发现[J]. *地质通报*, 23(2): 193 ~ 194.
- 迟清华, 鄢明才. 2007. *应用地球化学元素丰度数据手册*[M]. 北京: 地质出版社, 148.
- 杜德道, 曲晓明, 王根厚, 等. 2011. 西藏班公湖-怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲: 来自岛弧型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和元素地球化学的证据[J]. *岩石学报*, 27(7): 1 993 ~ 2 002.
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 等. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. *地学前缘*, 10(4): 539 ~ 544.
- 黄启帅, 史仁灯, 丁炳华, 等. 2012. 班公湖 MOR 型蛇绿岩 Re-Os 同位素特征对班公湖-怒江特提斯洋裂解时间的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(4): 465 ~ 478.
- 梁 桑, 周 涛, 李德威, 等. 2017. 班公湖中特提斯洋向南俯冲的

- 时限: 来自 SSZ 型辉长岩的制约[J]. 大地构造与成矿学, 41(5): 989~1000.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 等. 2004. 西藏班公湖-怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定——兼论班公湖-怒江蛇绿岩带形成时代[J]. 中国地质, 31(3): 262~268.
- 曲晓明, 王瑞江, 辛洪波, 等. 2009. 西藏西部与班公湖特提斯洋盆俯冲相关的火成岩年代学和地球化学[J]. 地球化学, 38(6): 523~535.
- 曲晓明, 辛洪波, 赵元艺, 等. 2010. 西藏班公湖中特提斯洋盆的打开时间: 镁铁质蛇绿岩地球化学与锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年结果[J]. 地学前缘, 17(3): 53~63.
- 邵磊, 李献华, 韦刚健, 等. 2001. 南海陆坡高速堆积体的物质来源[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 31(10): 828~833.
- 史仁灯. 2007. 班公湖 SSZ 型蛇绿岩年龄对班-怒洋时限的制约[J]. 科学通报, 52(2): 223~227.
- 王希斌. 1987. 喜马拉雅岩石圈构造演化——西藏蛇绿岩[J]. 北京: 地质出版社, 336.
- 谢冰晶, 程捷, 黄传冠. 2010. 班公湖怒江结合带西段沙木罗组的发现及意义[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 33(2): 159~164.
- 徐文礼, 郑荣才, 颜雪, 等. 2014. 下扬子地区早古生代黑色岩系地球化学特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(4): 1108~1122.
- 张玉修. 2007. 班公湖-怒江缝合带中西段构造演化[D]. 广州: 广州地球化学研究所.
- 张金亮, 张鑫. 2006. 塔里木盆地志留系古海洋沉积环境的元素地球化学特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 36(2): 200~208.
- 赵振华. 2016. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 534.
- 周涛, 陈超, 梁桑, 等. 2014. 西藏班公湖蛇绿混杂岩中火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. 大地构造与成矿学, 38(1): 157~167.

www.yskw.docin.com