

漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的 构造背景和物源区分析*

和政军^{①**} 李锦轶^① 莫申国^① A. A. Sorokin^②

(^①中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; ^②俄罗斯科学院远东分院, 布拉戈维申斯克 675000, 俄罗斯)

摘要 砂岩岩石地球化学对沉积盆地形成时期构造背景的稳定性与否则有着较高的敏感性, 已成为地质构造复杂地区研究的有效手段. 分析表明, 中生代漠河盆地砂岩在化学成分特征上显示出活动大陆边缘盆地的特点; 同时又充分地揭示出, 碎屑物质主要来自北侧的造山带并接受了盆地南侧的大陆区碎屑来源, 具有前陆盆地的二元物源特征. 根据岩石地球化学分析并结合构造等方面的研究结果, 认为中国黑龙江省漠河盆地的堆积物应属于磨拉石沉积, 所反映出的盆地构造类型应为前陆盆地, 而不是以往认为的裂谷盆地. 这一研究结果为漠河前陆盆地与相邻蒙古-鄂霍茨克造山带在中生代的构造成因关系提供了重要的岩石地球化学依据.

关键词 漠河前陆盆地 砂岩岩石地球化学 构造背景 碎屑物源区 侏罗纪

漠河地区位于中国北方边陲黑龙江省, 地处大兴安岭山脉最北端, 地貌上属于低山丘陵. 在构造上, 漠河盆地位于额尔古纳地块北缘, 其北为蒙古-鄂霍茨克造山带(简称“蒙-鄂带”). 由于受地域偏远和植被发育等条件限制, 以往中生代漠河盆地研究基础较为薄弱, 相关的专题性地质研究几乎为空白. 目前, 蒙-鄂带对中国北方中生代时期构造演化所产生的影响, 已越来越引起人们的关注^[1-6]. 为了揭示中国北方中生代地质演化的动力学机制, 进一步了解蒙-鄂带的地质历史和造山过程是非常必要的. 蒙-鄂带的主体位于蒙古国东部及俄罗斯远东地区, 与中国境内没有直接接壤, 而漠河盆地与紧靠蒙-鄂带的俄罗斯上阿穆尔盆地, 在中生代时期同属一个盆地, 并且具有相同的特点和地质构造演化历史, 它们的形成演化都与蒙-鄂带的造山过程有密切的联系. 因此从某种意义上讲, 漠河盆地是中国学者直接了解蒙古-鄂霍茨克造山带中生代地质状况的惟一窗口.

20 世纪 80 年代的区域地质调查研究认为, 漠河盆地为中生代形成的裂谷盆地^[1]. 笔者近年来根据漠河盆地与蒙古-鄂霍茨克造山带的演化关系, 首次提出该盆地的构造性质应属于前陆盆地^[1]. 在国家自然科学基金资助下, 我们近年对中生代漠河盆地的成因进行了专项研究. 在研究过程中, 为了从整体上加深对漠河盆地形成演化的认识, 我们实地考察了俄罗斯阿穆尔州境内的中生代地质, 由斯特列尔卡向南至中俄边境处的加林达, 穿越了蒙-鄂带主体以及上阿穆尔盆地(图 1), 获得了第一手地质资料.

2003-02-10 收稿, 2003-05-28 收修改稿

* 国家自然科学基金项目(批准号: 49872066)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 40132020)共同资助

** E-mail: zjhe@cags.net.cn

1) 黑龙江省地质矿产局. 漠河、连崆、老沟、二十五站幅 1:20 万区域地质调查报告. 1988

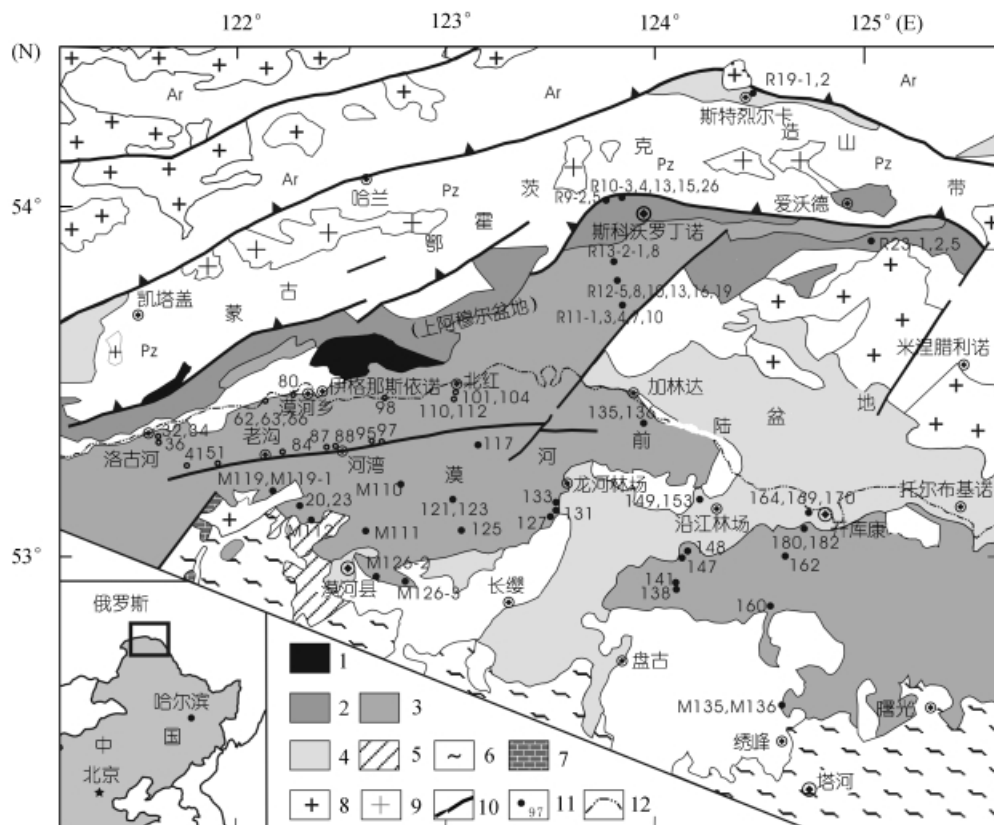


图 1 黑龙江省漠河和俄罗斯阿穆尔地区地质简图及采样位置

1. 上三叠统; 2. 下-中侏罗统; 3. 中侏罗统(俄罗斯地区包括部分上侏罗统); 4. 上侏罗统; 5. 元古界花岗岩; 6. 元古界变质岩; 7. 古生界; 8. 中生代花岗岩; 9. 古生代花岗岩; 10. 断裂; 11. 采样点及样品编号; 12. 黑龙江(中-俄界河)

1 区域地质背景

漠河侏罗纪盆地(图 1)面积约 14000 km², 累计沉积厚度大于 5000 m, 为陆相沉积. 黑龙江省地矿部门原来将漠河盆地的侏罗纪地层自下而上划分为中侏罗统绣峰组、二十二站组和额木尔河组, 以及上侏罗统开库康组和塔木兰沟组^[7]. 其中原定中侏罗统下部的绣峰组岩石类型主要为灰色砂岩和粉砂岩, 在盆地南部边缘地带出现大量的粗砾砾岩. 二十二站组, 额木尔河组以及开库康组主要为深灰色砂岩和黑灰色粉砂岩夹黑色粉砂岩、泥岩及砾岩, 在盆地北部砾岩厚度百分比较高, 前两个组砂岩中碳酸盐胶结现象较普遍. 塔木兰沟组主要为火山碎屑岩和火山熔岩. 漠河地区地层出露连续性较差, 盆地北部沉积岩层大部分遭受程度不同的动力变质作用改造(可达高绿片岩相-低角闪岩相). 在侏罗纪 4 个沉积地层为主的组中, 除开库康组可见与下伏地层为不整合关系外, 其他 3 个组之间关系不十分清楚. 在区域上, 中生代地层分布总体走向呈近东西向; 从俄罗斯上阿穆尔盆地至漠河盆地, 地层层位自北向南有由老变新的趋势; 沉积岩的变质程度则由南向北逐渐增强.

黑龙江北岸俄罗斯境内的上阿穆尔盆地充填物中, 晚三叠世-早侏罗世沉积地层以海相细

1) 见 1219 页脚注 1

碎屑岩夹碳酸盐岩沉积为主, 并出现典型的复理石沉积; 中、晚侏罗世沉积主要为陆相砂岩和粉砂岩, 夹少量海相碎屑岩层. 与上阿穆尔盆地北侧紧邻的蒙-鄂造山带, 现今出露了古生代被动陆缘型沉积地层和属活动陆缘的消减杂岩等, 并分布有残留的侏罗纪地层^[8-10](图 1). 蒙-鄂带以北地区则出露了大面积的前寒武纪结晶基底岩石和早中生代花岗岩等侵入岩体. 在漠河盆地南缘一侧, 主要分布有元古代花岗质岩石, 以及元古界和小面积分布的古生代地层.

在中晚侏罗世-早白垩世时期, 沿蒙-鄂造山带发育主体向南逆冲的大规模推覆构造和韧性剪切带. Li 等^[2]认为, 漠河地区与蒙古-鄂霍次克造山带晚中生代造山作用有关的构造变形有 3 期: (i) 中-晚侏罗世向南的逆冲和地壳缩短; (ii) 晚侏罗世的向东冲断作用和平行造山带的走滑断裂活动; (iii) 早白垩世的向南东方向的斜向逆冲活动及地壳缩短.

2 砂岩基本特征及分析方法

从侏罗系岩石组合特征上看, 漠河盆地沉积充填物中砂岩约占各组地层厚度的 61% ~ 73%(据 21 条剖面统计). 以往将漠河盆地砂岩岩石类型大部分定为长石砂岩¹⁾, 通过此次研究, 确定主要是岩屑杂砂岩和长石岩屑杂砂岩等. 根据 137 个岩石薄片镜下观察, 分布在盆地北部的二十二站组和额木尔河组, 岩石碎屑组成中石英含量一般占碎屑总量的 35% ~ 55%, 长石 15% ~ 30%, 岩屑 25% ~ 45%, 而南部的锈峰组长石含量相对较高, 可达 25% ~ 35%. 未变质的砂岩中杂基含量大部分在 15% ~ 25% 之间. 在空间分布上, 向北岩屑含量有增多的趋势, 部分可达 45% ~ 55%. 此外, 盆地南部岩屑组成主要为多晶石英、变质岩屑及火山岩屑等, 北部沉积岩的岩屑含量相对较高.

碎屑颗粒的大小影响着沉积岩石地球化学特征^[11,12]. 为强调岩化数据的可比性, 漠河盆地 52 个岩石样品分析均选择中、细粒砂岩作为分析测试对象. 主元素化学全分析测试方法为 XRF; 稀土元素测和微量元素测试采用 ICP-AES 和 ICP-MS 方法, 仪器为 JA-1160, 均由国家地质实验测试中心完成.

3 岩石地球化学特征

漠河盆地和俄罗斯上阿穆尔盆地侏罗纪砂岩岩石地球化学具有以下基本特点:

(1) 漠河盆地侏罗系各组砂岩的 Al_2O_3 , SiO_2 及其相关比值与典型的杂砂岩平均值一致, 而与长石砂岩或裂谷砂岩明显不同^[11,12]. 典型的大陆裂谷盆地的长石砂岩一般以富含钾长石和 K 含量高为特征, 该比值明显高于 1, 通常在 1.5 ~ 15 之间. 漠河盆地侏罗纪砂岩的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 平均比值为 0.91, 反映出较典型杂砂岩的特征, 与长石砂岩或大陆裂谷砂岩不同. 在 Pettijohn 的砂岩岩石化学分类图^[11]上(图 2(a)), 几乎所有样品投点都落在杂砂岩(灰瓦克岩)区, 与镜下及野外观察所获得的结果一致.

(2) 漠河 4 个组砂岩稀土元素总量($\sum \text{REE}$, 包括 Y)平均值为 145×10^{-6} , LREE/HREE 为 5.27. Eu/Eu^* 值为 0.62, 与平均中-新生代和古生代杂砂岩 Eu 的亏损程度(分别为 0.60 和 0.62)近于一致, 反映了后太古代沉积岩 Eu 的演化特点^[13,14]. 稀土元素和微量元素特征比值 Th/Sc , Gd_n/Yb_n 以及 La/Yb , 均高于一些典型杂砂岩平均值, 而 La/Th 基本相同.

(3) 漠河盆地砂岩球粒陨石标准化 REE 分布曲线总体上属于轻稀土中等富集型(图 3(a)).

1) 见 1219 页脚注 1

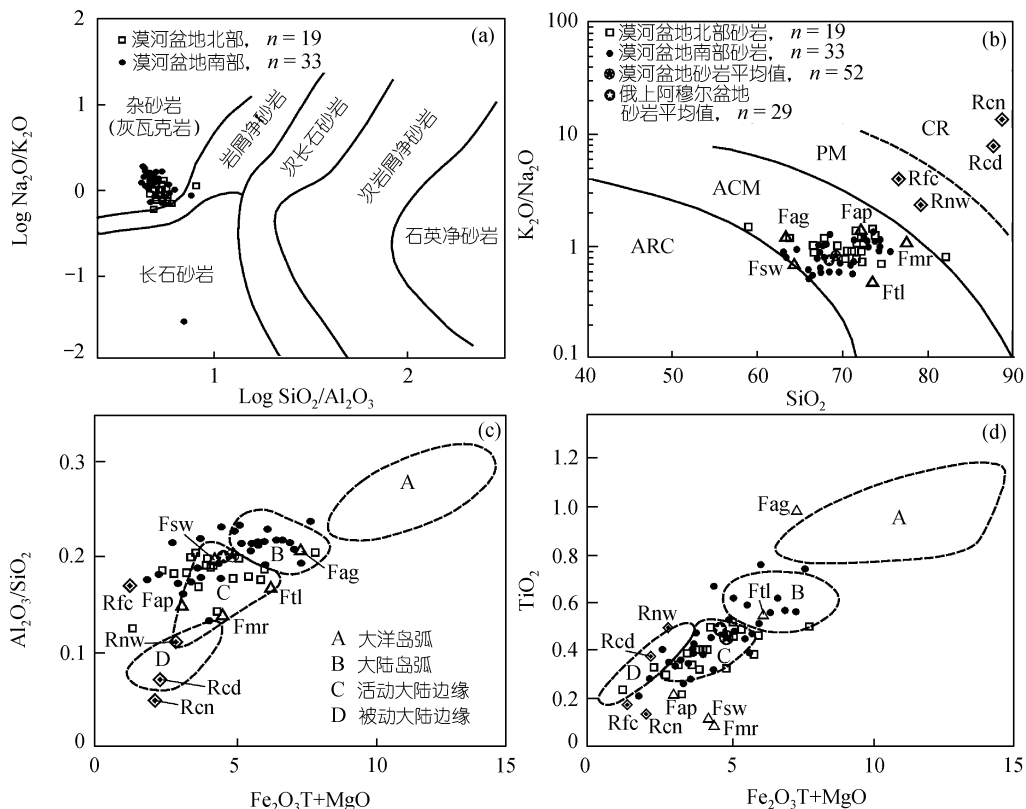


图 2 漠河盆地砂岩岩石地球化学分类及构造背景判别图

(a)据文献[11]; (b)据文献[15], 分区实线经修改据文献[16], 虚线及 CR(大陆裂谷)为笔者所加. ARC 示大洋岛弧; ACM 示活动大陆缘; PM 示被动大陆缘(岩石地球化学数据中烧失量去除, 重新按百分比计算); CR 示克拉通及陆内拉张盆地; (c), (d)据文献[12]. 样品资料来源及说明: 大陆裂谷砂岩: Rcd 据文献[16], Rcn[笔者未发表], Rnw 据文献[18], Rfc 据文献[19]; 前陆盆地或磨拉石砂岩: Fsw 据文献[20], Fmr 据文献[21], Fag 据文献[22], Ftl 据文献[23], Fap 据文献[11]. (n 表示样品数量)($\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T} = \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 0.9 + \text{FeO}$)

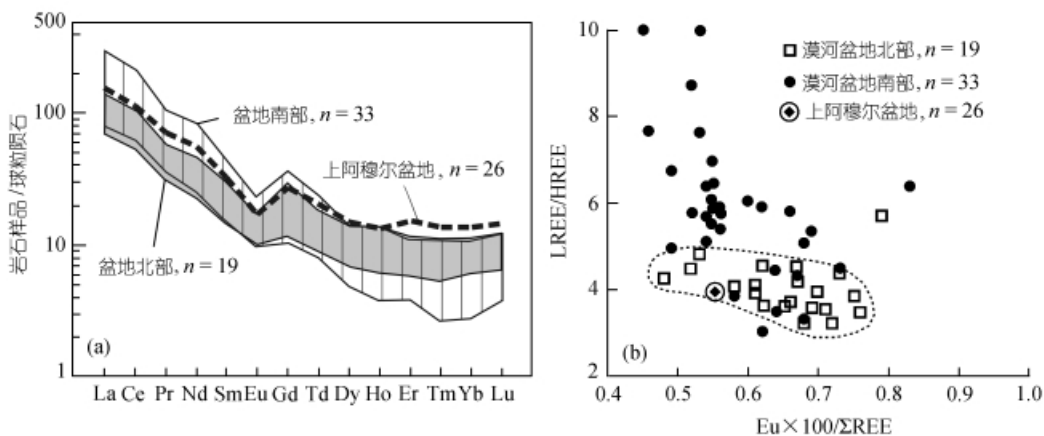


图 3 漠河盆地砂岩球粒陨石标准化 REE 分布曲线和砂岩散点分布图

(a) 漠河及上阿穆尔盆地侏罗纪砂岩稀土元素分布曲线; (b) 砂岩 LREE/HREE 对 $\text{Eu} \times 100 / \Sigma \text{REE}$ 散点分布图

近于平行蒙-鄂造山带走向, 沿老沟断裂大致将漠河盆地分为走向近 E-W 的南北两个带(图 1), 可看出南北两部分砂岩稀土元素组成有明显差异. 北带 REE 曲线斜率相对比较平缓且样品分布较集中, 而南带的较陡并分散. 同样, 在 LREE/HREE 对 $\text{Eu} \times 100 / \sum \text{REE}$ 图上南带的 LREE/HREE 比值明显高于北带, 并且数据点分散(图 3(b)). 两张图均反映出南部的轻稀土元素相对富集程度较北带更强, 与上阿穆尔盆地砂岩 REE 平均曲线对照, 轻稀土富集程度由北向南增高.

(4) 漠河盆地与俄境内的上阿穆尔盆地侏罗纪砂岩主元素、稀土元素及其他微量元素特征值总体上相近. 除上阿穆尔盆地 $\sum \text{REE}$ 较高外, 部分特征值略低于漠河盆地. 从北部的上阿穆尔盆地至漠河盆地南部, REE 和微量元素比值均显示出逐渐增高的变化趋势.

4 盆地构造背景判别和物源区分析

在 Roser 和 Korsch 的构造背景判别图^[15](经 Murphy 修改^[16])上(图 2(b)), 几乎所有砂岩样品点都分布在活动大陆边缘区(ACM), 而远离被动大陆边缘(PM)或大陆(边缘)裂古盆地砂岩通常分布区(CR). 同样, 在 Bhatia 的构造环境判别图^[12]上(图 2(c), (d)), 漠河盆地砂岩样品点大部分投在了活动大陆边缘区(C 区). 其中, 盆地南部的部分砂岩化学主量元素的投点分布在 Bhatia 的大陆岛弧区(B), 可能表明南侧物源区也向盆地部分地提供了前侏罗纪(盆地基底)的火山碎屑物质. 在砂岩主元素多变量(11 个氧化物)构造环境判别方程图^[12]上(图 4(a)), 漠河盆地砂岩数据点也都分布在活动陆缘和大陆岛弧区. 其中盆地北部样品绝大多数落在活动陆缘

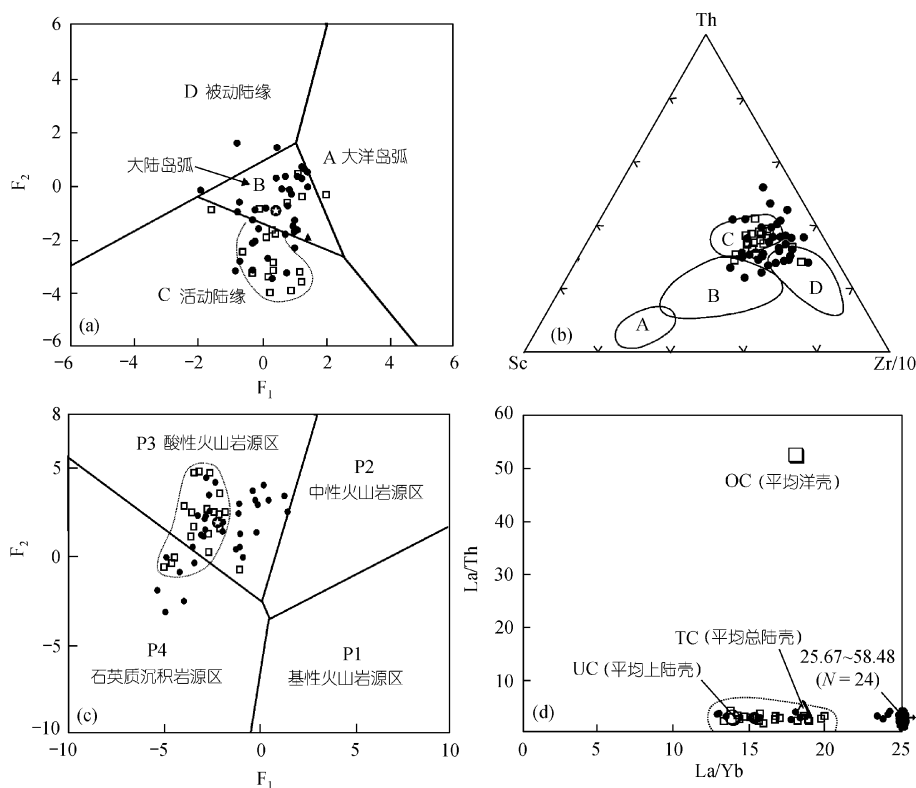


图 4

(a) 漠河盆地砂岩 F_1 对 F_2 构造判别方程图^[12]; (b) Th-Sc-Zr/10 构造背景判别图^[17]; (c) 漠河盆地砂岩 F_1 对 F_2 物源判别方程图^[24]; (d) La/Th 对 La/Yb 地壳模式成分判别图^[23](样品点符号含义同图 2(b))

区,而盆地南部的则部分分布在大陆岛弧区,也表明南部砂岩更多地混入了火山物质.漠河砂岩的一些特征稀土元素和微量元素的构造背景分析也显示出与主元素同样的判别结果.在 Th-Sc-Zr/10 砂岩构造环境判别图^[17]上,砂岩样品点也大部分落在活动陆缘区(图 4(b), C 区).上述分析结果显示多种不同判别图上所获结果的高度一致,这与通过野外地质观察在区域构造变形^[2]以及宏观盆地分析等方面所获得的前陆盆地的认识相同.

Roser 和 Korsch 根据已知构造背景的不同碎屑岩组合岩石化学特征,进行多变量(7 个氧化物)判别方程分析,综合出 4 种混合物源模型^[24].在物源区方程判别图上,漠河盆地砂岩点大部分落在相当于酸性火山岩的 P3 源区,少部分在 P4 的石英质沉积岩源区(图 4(c)).P3 区的酸性火成岩物源区介于中性火山碎屑成因杂砂岩(P2 区)和石英含量较高的大陆源区之间,碎屑组成来自包括再旋回造山带和大陆内部的沉积碎屑与活动大陆岩浆弧以及部分变质岩的混合^[24, 25].它代表活动大陆边缘碎屑物质来源,大致对应于图 2(b)中的 ACM 区.

在 La/Th-La/Yb 比值图(图 4(d))^[23]上,漠河盆地岩化数据点分别落在两个区域中,显示出南北碎屑在物源供给上的差异.北部样品主要分布在平均上陆壳(UC)和平均总陆壳(TC)点之间,南部样品大部分 La/Yb 比值大于平均总陆壳值.

5 讨论

沉积物化学元素在表生条件下的地球化学行为受诸多因素影响^[12, 25~27],其中以构造环境和物源特征最为重要^[28].就碎屑沉积岩而言,构造活动对岩石化学的影响主要反映在,对有关的物源区母岩性质及其碎屑化学成分稳定性的控制上.构造环境的稳定与否,既控制了沉积物质的来源,又决定了化学元素从风化剥蚀到沉积过程在地表的相对“停留”时间,从而影响元素的聚集丰度或分馏程度,并在沉积岩石中留下了不同的地球化学“印记”.“解读”这些保存下来的沉积岩石化学“印记”,已成为恢复盆地构造性质和追溯碎屑物质来源的有效途径.

漠河盆地属于蒙古-鄂霍次克造山带中生代前陆盆地^[1, 2],与以往的“裂谷盆地”的认识迥异,因此它们在岩石地球化学上也应具有不同的特征,上述分析结果充分地支持了前陆盆地的结论.图 2 至图 4 中砂岩岩石化学特征的多种构造背景判别和对比均显示出,漠河砂岩类型接近于总体上处于活动大陆边缘区,与典型的前陆盆地或磨拉石岩石化学成分特征一致.漠河前陆盆地砂岩与发育在大陆基底上的裂谷盆地砂岩相比,在两类图中投点分别落在相隔较远的两个不同区域(图 2(b), (c), (d)).

一般情况下,经典造山带的前陆盆地中的磨拉石堆积形成于造山过程中陆-陆板块碰撞的晚期演化阶段.由于产生于活动大陆边缘构造背景,盆地一侧紧邻同期造山带,而盆地主体则奠基于大陆块体之上,因此碎屑成分具有造山带和大陆双向来源的二元的物源供给特点.蒙-鄂带是古生代与中生代活动的复合造山带,随着中生代隆升-剥蚀作用的加剧,前期造山过程形成的产物以及古老被动陆缘和被深切割暴露出来的侵入岩等碎屑,也会加入到前陆盆地中.从图 1 中也可以看出,在经历了中生代(以及新生代)地质演化之后,现今蒙-鄂带主体分布区域中大部分中生代沉积已被剥蚀掉,并出露较大面积的古生代地层和花岗岩,推测它们的碎屑当时也曾作为物源进入中生代前陆盆地.伴随着造山带仰冲板快向南运移,相邻的前陆区大陆地壳发生向下挠曲并逐渐加大,会在盆地向陆一侧的外部前缘形成相对的正向地貌,同时向盆地内提供具有大陆性质的混合碎屑.漠河前陆盆地侏罗纪砂岩从早期到晚期或从北到南,

岩化特征所发生的变化和南北差异(图 2 至图 4), 即为这种特定构造背景下保留在砂岩中的记录(因篇幅所限, 将另文讨论). 从另一个角度看, 大陆裂谷盆地由于形成于同一个大陆块体之上, 在拉张过程中盆地两侧所产生的碎屑成分基本上相同. 而前陆盆地同时接受混有另一侧陆块物质的造山带碎屑, 以及前陆盆地所在陆块的大陆基底碎屑物质, 因此实际上其盆地充填物质来自两个地质演化历史不同的大陆块体, 这也是产生二元的物源供给的主要原因之一.

6 基本结论

(1) 岩石地球化学和岩石学分析结果均显示出, 中生代漠河盆地的砂岩岩石类型主要为通常形成在强烈构造活动背景下堆积的杂砂岩, 而不是以往所认为的长石砂岩.

(2) 中生代漠河盆地砂岩岩石化学投点主要分布在活动大陆边缘区, 在多种构造背景和物源区判别图上显示出了分析结果的高度一致性. 它揭示出盆地碎屑主要来自造山带一侧, 并受到大陆一侧碎屑补给影响, 碎屑来源具有前陆盆地所特有的二元物源供给特点.

(3) 研究表明, 漠河盆地砂岩岩化特征与典型的前陆盆地砂岩相同. 可以认为, 蒙古-鄂霍茨克造山带在中生代时期的构造活动既控制了漠河(-上阿穆尔)前陆盆地的形成和发展, 又成为该盆地沉积充填的主要碎屑物质供给区.

致谢 由于 S. V. Nuzhnov 教授的大力协助, 使得俄罗斯远东地质考察得以顺利成行; 研究过程中曾得到其和日格及黑龙江省地调院齐齐哈尔分院的热情帮助, 在此深表谢意.

参 考 文 献

- 1 和政军, 李锦轶, 牛宝贵, 等. 燕山阴山地区晚侏罗世强烈推覆隆升事件及沉积响应. 地质论评, 1998, 44(4): 407 ~ 418
- 2 Li J, He Z, Mo S, et al. The late Mesozoic orogenic processes of Mongolia-Okhotsk Orogen: Evidence from field investigations into deformation of the Mohe area, NE China. Journal of Geoscientific Research in Northeast Asia, 1999, 2: 172 ~ 178
- 3 赵 越, 杨振宇, 马醒华. 东亚大地构造发展的重要转折. 地质科学, 1994, 29(2): 105 ~ 119
- 4 Ren J, Niu B, He Z, et al. Tectonic framework and geodynamic evolution of eastern China, Proc. 30th Int'l. Geol Congr VSP, Amsterdam, 1997, 6: 1 ~ 14
- 5 郑亚东, Davis G A, 王 综, 等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题. 地质学报, 2000, 74(4): 289 ~ 302
- 6 Davis G A, Zheng Y, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning provinces, northern China. In: Hendrix M S, Davis G A, eds. Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation. Geol Soc Ame, 2001, Memoir 194: 171 ~ 197
- 7 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1993, 168 ~ 191
- 8 Zorin Y A, Belichenko V G, Turutanov E K, et al. The East Siberia transect. Interna Geol Review, 1995, 37: 154 ~ 175
- 9 Zonenshain L P, Kuzmin M I, Natapov L M. Geology of the USSR: A Plat-Tectonic Synthesis. Ame Geophy Uni Geody Series, 1990, 21: 97 ~ 108
- 10 Khain V E. Geology of Northern Eurasia, (Ex-USSR): Second Part of the Geology of the USSR Phanerozoic Fold Belts and Yang Platforms. Beline: Gebruder Borntraeger, 1994. 39 ~ 81
- 11 Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and Sandstone. New York: Springer-Verlag, 1972. 1 ~ 618
- 12 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology, 1983, 91: 611 ~ 627
- 13 Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales. Chemical Geology, 1993, 104: 1 ~ 37

- 14 Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. London: Blackwell Scientific Publication, 1985. 9 ~ 140
- 15 Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio. *Journal of Geology*, 1986, 94: 635 ~ 650
- 16 Murphy J B. Tectonic influence on sedimentation along the southern flank of the late apaleozoic Magdalen basin in the Canadian Appalachians: Geochemical and isotopic constraints on the Horton Group in the St. Marys basin, Nova Scotia. *Geological Society of American Bulletin*, 2000, 112: 997 ~ 1011
- 17 Bhatia M R, Crook K A. Trace-element characteristics of greywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92: 181 ~ 193
- 18 Ehrenberg S N, Siring E. Use of bulk chemical analyses in stratigraphic correlation of sandstones: An example from the Statfjord Nord Field, Norwegian continental shelf. *Journal of Sedimentary Geology*, 1992, 62: 318 ~ 330
- 19 Ven de Kamp P C, Helmold K P, Leake B E. Holocene and Paleogene arkoses of the Massif Central, France: Mineralogy, chemistry, provenance, and hydrothermal alteration of the type arkose. *Jour Sed Research*, 1994, A64: 17 ~ 33
- 20 Abid I A, Abbasi I A, Khan M A, et al. Petrography and geochemistry of the Siwarlik sandstone and its relationship to the Himalayan Orogeny. *Geol Bull Univ Peshawar*, 1983, 16: 65 ~ 83
- 21 Singh B P, Fotedar B K, Rao A S. Petrography and geochemistry of the sandstones of Murre group around Laren, Udhampur, Jammu Himalaya. *Journal of the Geological Society of India*, 1990, 36: 502 ~ 511
- 22 Bock B, McLennan S M, Hanson G N. Geochemistry and provenance of the Middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian Orogeny in New England. *Sedimentology*, 1998, 45: 635 ~ 655
- 23 Shao L, Stattegger K, Garbe-Schoenberg C. Sandstone petrology and geochemistry of the Turpan Basin (NW China): Implications for the tectonic evolution of a continental basin. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71: 37 ~ 49
- 24 Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 1988, 67: 119 ~ 139
- 25 Roser B P, Korsch R J. Geochemical characterization, evolution and source of a Mesozoic accretionary wedge: The Torlesse terrane, New Zealand. *Geological Magazine*, 1999, 136: 493 ~ 512
- 26 张晓晖, 李铁胜, 张福勤. 新疆东准噶尔喀姆斯特地区晚古生代浊积岩沉积构造环境分析. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(7): 591 ~ 600
- 27 高爱国, 陈志华, 刘炎光, 等. 楚科奇海表层沉积物的稀土元素地球化学特征. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(3): 193 ~ 199
- 28 和政军. 辽宁中元古代-中生代泥质岩稀土元素地球化学. *地球化学*, 1988, (2): 129 ~ 135