

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2018.4.45

# 初论微陆块在中亚造山带演化中的作用:以锡林浩特微陆块为例

邵济安<sup>1</sup>, 田 伟<sup>1</sup>, 唐克东<sup>2</sup>, 周新华<sup>3</sup>

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室; 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110034

3. 中国科学院 地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

SHAO Ji'an<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>, TANG Kedong<sup>2</sup>, ZHOU Xinhua<sup>3</sup>

1. *The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education; School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*

2. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110034, China*

3. *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

SHAO Ji'an, TIAN Wei, TANG Kedong, et al. Preliminary discussion on the role of microcontinental blocks in the evolution of the Central Asian orogenic belt: taking the Xilinhaote microcontinental block as an example. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(4): 001-010

**Abstract:** The old continental crustal massifs or inlaid microcontinental blocks in the Central Asia Orogenic Belt characterize a previous Paleo-Mongolia ocean. Discussed in this work is the Xilinhaote microcontinental block. The Xilinguole complex—basement of the microcontinental block—has experienced the Early Paleozoic tectothermal events yet still contains older Precambrian zircons. The Xilinguole microcontinental block also acted as pillar when the orogenic belt suffered strong extensional deformation and underplating in the Late Paleozoic ( $C_2-P_1$ ); while rifts occurred at north and south edges of the microcontinental block, a stable littoral-neritic facies sedimentary environment was maintained inside the block. At the same time, in the event of underplating from the upper mantle, tectonic structure of the orogenic zone remained stable, as the microcontinental block further accreted vertically and consolidated through certain orogenic bimodal magmatic activity and alkalic granite emplacement associated with block remelting. It has been the purpose of this work to comprehend some of the unique regional geological phenomena that are closely related to underplating during the Late Carboniferous.

**Key words:** microcontinental block; Central Asia Orogenic Belt; Late Paleozoic; consolidation; underplating

**摘 要:** 镶嵌状拼合在中亚造山带众多的古老陆壳块体或微陆块,是前期古亚洲洋的特征之一。本文重点讨论的是锡林浩特微陆块,组成微陆块基底的锡林郭勒杂岩既经历了早古生代的构造热事件,也保留了前寒武纪的古老锆石。当晚古生代( $C_2-P_1$ )造山带遭受到强烈的伸展变形和底侵作用时,锡林浩特微陆块又起到支柱作用;当微陆块的南、北边缘发生裂谷活动时,微陆块内部却保持了稳定的滨-浅海相沉积环境;在微陆块受到来自上地幔的底侵作用时,微陆块通过伸展背景下非造山的双峰式岩浆活动,及其与微陆块再次重熔有关的碱性花岗岩侵位,使得陆壳发生进一步的垂向增生和固结,保持了造山带的构造格局。本文讨论的正是在底侵作用的深部背景下认识该区在晚石炭世出现的一些独特的地质现象。

**关键词:** 微陆块; 中亚造山带; 晚古生代; 固结; 底侵作用

**中图分类号:** P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2018)04-0001-10

收稿日期: 2018-01-23; 修回日期: 2018-04-04

基金项目: 中国地质调查局项目“中国及邻区海陆大地构造总体框架和演化过程及其资源-环境的控制”(121201102000150009)

作者简介: 邵济安(1940—),女,教授,构造地质学专业。E-mail: wangcc@tsinghua.edu.cn

## 0 引言

中亚古生代造山带连接了西伯利亚和华北两大古老的克拉通地块,最早俄国人将西伯利亚地台与中朝地台—塔里木地台—卡拉库姆地台之间称为乌拉尔—蒙古—鄂霍次克造山带,包括早古生代造山带和晚古生代造山带。1991 年中美地质学家合作考察时,将其称之为中亚古生代造山带<sup>[1]</sup>。2000 年,江博明等使用了“CAOB”(中亚造山带)一词<sup>[2]</sup>。造山带中保留了古亚洲洋开合—迁移的历史。镶嵌在中亚造山带中众多的古老陆壳块体或微陆块(microcontinental block)是苏联学者 Хайн<sup>[3]</sup>提到的“陆间洋盆”特征之一。Badarch 等<sup>[4]</sup>曾将蒙古划分为若干地体,尽管这一划分还有待进一步商榷和完善,但足以反映古亚洲洋的特征。这些微陆块的存在对洋盆地的闭合方式和造山作用,特别在其后年轻陆壳成熟<sup>[5]</sup>、固结的过程中都起到了不可低估的作用。

板块构造学说对地质历史过程中大洋岩石圈和大陆岩石圈性质的转换做了大量研究,但对陆壳形成后如何进一步演化基本不涉及。近年分布如此广袤的中亚造山带在晚古生代造山作用结束之后的持续演化和它的特色引起了各国地质学家的关注。20 世纪 70 年代以来出现的“陆壳成熟度”概念<sup>[5]</sup>,是指新生陆壳形成后,随着地壳中硅、碱特别是钾含量的增高,会促进地壳厚度加大,刚性增强,渗透性降低。“陆壳固结”的概念是 30 多年前的中美合作野外考察中取得的一个重要认识,即造山带陆壳的固结是通过伸展背景下非造山花岗岩的增生实现的<sup>[1,5-7]</sup>,正如 Coleman<sup>[7]</sup>提到的“古亚洲固结阶段有大量地幔岩浆从下面供给新固结的地壳,导致其部分熔融,形成了高温的干花岗岩熔体”。也正如 Jahn 和 Hong<sup>[8]</sup>所指出的,中亚造山带自早二叠世以来形成的碱性深成岩有可能是显生宙期间全球最主要的垂向增生带。

本文正是从陆壳演化角度,选择内蒙古锡林浩特微陆块为研究对象,通过剖析晚石炭世的锡林浩特微陆块,了解它们在年轻陆壳经受强烈裂谷伸展作用中所起到的支柱作用;并用底侵作用的观点,即来自上地幔部分熔融产生的玄武质岩浆侵入或添加到下地壳底部的过程和作用<sup>[9]</sup>,解释研究区花岗岩形成的复杂性和陆壳不断成熟与固结的机制。

晚石炭世地壳演化是过去研究的薄弱环节,尽管晚石炭世保留的信息有限,然而作为大陆演化新构造体制的启动阶段,它保留了更为初始的、未经混染改造的幔源岩浆活动及其底侵作用的信息<sup>[10]</sup>,而且地表的火山—沉积作用也反演了清晰的构造格局。因此晚石炭世是中亚造山带陆壳演化的重要阶段。

## 1 锡林浩特微陆块和锡林郭勒杂岩

锡林浩特微陆块通过索伦—二连—贺根山缝合带与“南蒙微大陆”(“南蒙微大陆”即是南蒙古努尔达瓦地体<sup>[4]</sup>)对峙,这是中亚造山带中两个重要的微陆块,均是由加里东陆缘活动带组成的地体,而锡林浩特微陆块还保留了前寒武纪变质基底。笔者曾将它们看作兴蒙造山带中的“古地体”<sup>[11]</sup>。

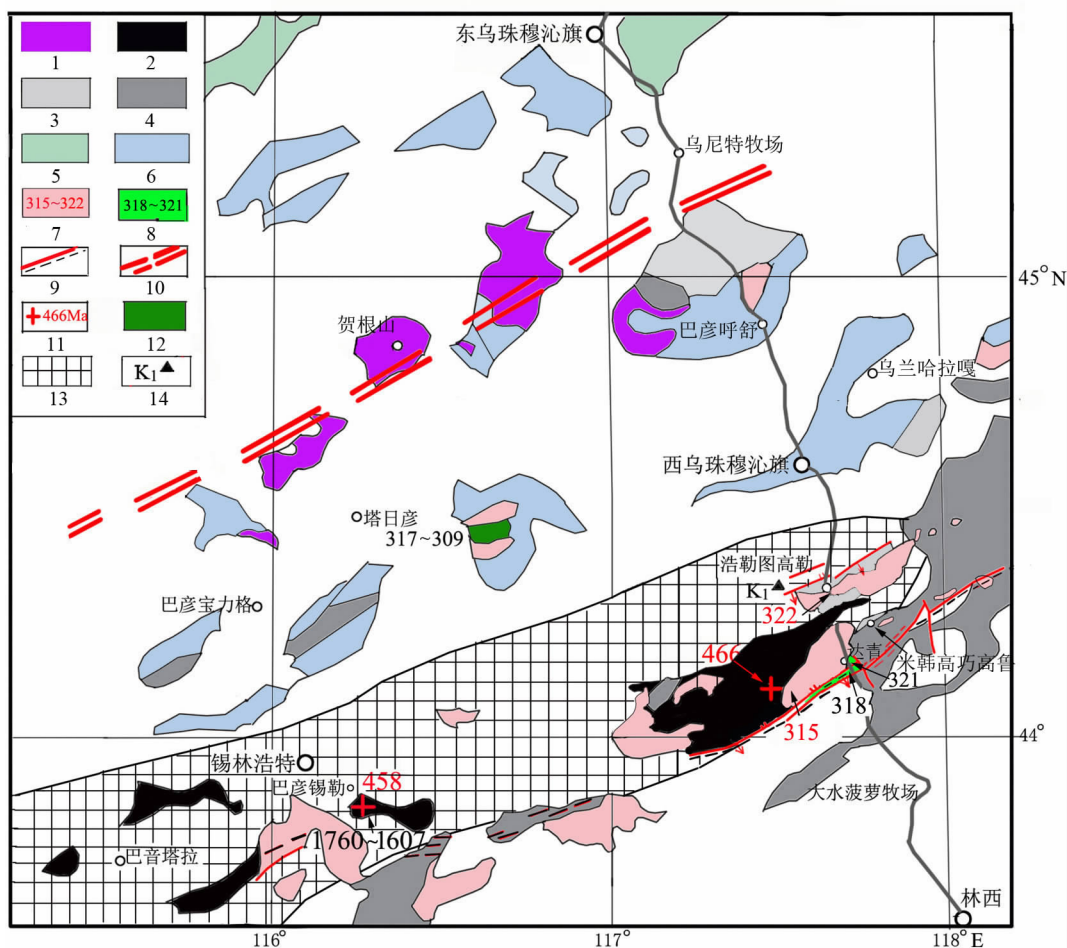
本文所讨论的锡林浩特微陆块是指以锡林郭勒杂岩为基底的微陆块,主要分布在西乌珠穆沁旗、锡林浩特、阿巴嘎、苏尼特左旗一带。本文重点讨论西乌珠穆沁旗—锡林浩特一带出露的锡林浩特微陆块(图 1)。图 1 中依据锡林郭勒杂岩出露范围推测出锡林浩特微陆块范围。

### 1.1 关于锡林郭勒杂岩的时代归属

长期以来锡林郭勒杂岩的时代归属问题存在不同的看法。有人在变形和动力变质都比较强的岩石中获取了早古生代的同位素年龄,便对前期不同方法取得的前寒武纪年龄提出了质疑。近年来随着研究的深入和大比例尺填图,先后取得不下 10 组的年龄资料,大体分为 1 500 Ma、1 000 Ma 和 450 Ma 三组,其中对西乌珠穆沁旗米生庙的黑云斜长片麻岩采用单颗粒锆石 U-Pb 法测得的年龄为 1 060 Ma。此外孙立新等<sup>[12]</sup>对苏尼特左旗南东 30 km 的花岗片麻岩采用 LA-MC-ICP-MS 法获得锆石核部年龄为 1 516 Ma,边部年龄为 451 Ma,反映老锆石后期经历过热事件,这与在西乌珠穆沁旗的米生庙侵入锡林郭勒杂岩的英云闪长岩中获取的继承性锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 466.8 Ma 一致。笔者认为,锡林郭勒杂岩记录了早古生代的构造热事件,但不能否认它保留了前寒武纪的古老锆石,为此本文统称其为前寒武纪的锡林郭勒杂岩。

### 1.2 关于锡林浩特微陆块存在的地球化学证据

周新华等<sup>[13]</sup>曾从岩石圈地幔的角度,针对本研究区是否存在过古老地块物质贡献的问题,开



1—蛇绿岩;2—锡林郭勒杂岩;3—阿木山组(CPa);4—本巴图组(CPb);5—宝力格庙组(Cbl);6—格根敖包组(CPg);7—晚石炭世花岗岩及其年龄;8—晚石炭世双峰火山岩及其年龄;9—糜棱岩带;10—物探推测大断裂;11—英云闪长岩—花岗岩采样点和年龄;12—辉长岩—闪长岩;13—锡林浩特微陆块;14—白垩纪火山岩取样点。

图1 晚石炭世—早二叠世初锡林浩特微陆块构造格局图

Fig.1 Tectonic framework of the Xilinhaote microcontinental block during the early Late Carboniferous – Early Permian

展了系统的多元同位素地球化学研究。早白垩世含橄榄石、单斜辉石和长石斑晶的玄武质安山岩样品取自浩勒图高勒以西猴头庙一带(图1)。其同位素特征值 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7055 \sim 0.7067$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.2 \sim -6.7$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 0.75 \sim -4.55$ ,  $T_{\text{DM}} = 1000 \sim 1300 \text{ Ma}$ 。火山岩具有富集 LILE、LREE 和亏损 HSFE 的特征。根据地球化学的种种特征,笔者认为,火山岩一方面继承了古老大陆下富集岩石圈地幔的特征,同时又叠加了古生代俯冲的陆壳物质所释放流体交代的印记。笔者还明确指出:西乌珠穆沁旗早白垩世火山岩低放射成因的铅同位素以及新元古代 Nd 亏损地幔模式的年龄暗示了该地区深部可能为锡林浩特地体的组成部分。该项研究从地球化学角度支持了前寒武纪锡林浩特微陆块的存在。

## 2 晚石炭世—早二叠世初锡林浩特微陆块的构造格局

本文将以锡林浩特微陆块上分布的一套晚石炭世—早二叠世初的火山—沉积岩为研究对象,对控制它们分布的构造格局进行分析。这套地层在锡林浩特微陆块上有格根敖包组、本巴图组和阿木山组(图1)三个不同的名称。长期以来它们一直被看作上石炭统地层。西乌珠穆沁旗 1:25 万区域地质调查明确将本区格根敖包组、本巴图组和阿木山组看作同期异相地层。之后,鲍庆中等<sup>[14]</sup>根据研究区出现的二叠系紫松阶( $P_1$ )的生物标志 *Pseudoschwagerina uddeni*-*P. texana*,参照全国地层对比,进一步将这套地层时代确定为以晚石炭世为主,延续到二叠纪早

期,置于寿山沟组之下,并指出这套同期异相地层具有明显的穿时性和相变特征,具有指状交叉的特点。

图1是笔者依据《内蒙古1:150万区域地质图》缩编的,除原有明显以碳酸盐为主的阿木山组外,将其他上石炭统与本巴图组合并,统一归为本巴图组,局部地区参照《1:25万西乌旗地质图》进行补充。需要交代的是,在《1:25万西乌旗地质图》中有一显著的糜棱岩化带,NE走向,陆续延长80 km,宽约800 m,其中达青牧场强烈片理化的构造破碎带长6.5 km,宽约800 m,主要为一套枕状玄武岩和沉积岩。1:25万西乌旗地质报告将其定为大石寨组,包括上段的中酸性火山岩和下段的细碧岩,总厚达2 908 m(图2)。Liu等<sup>[15]</sup>对该带玄武岩中的锆石采用SHRIMP U-Pb法测年,获得315~318 Ma的年龄。笔者近期测定下部层位的英安质火山凝灰岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄为321 Ma,因此将它们看作为一套晚石炭世的双峰式火山岩,并归入本巴图组。其实早在1992年唐克东等<sup>[16]</sup>就报道了内蒙古索伦山—苏左旗—西乌旗一带分布的晚石炭世双峰式火山岩研究情况,汤文豪等<sup>[17]</sup>近年也报道了苏尼特右旗查干诺尔313~308 Ma的双峰式火山岩研究情况(表2)。图1中突出勾画了达青牧场分

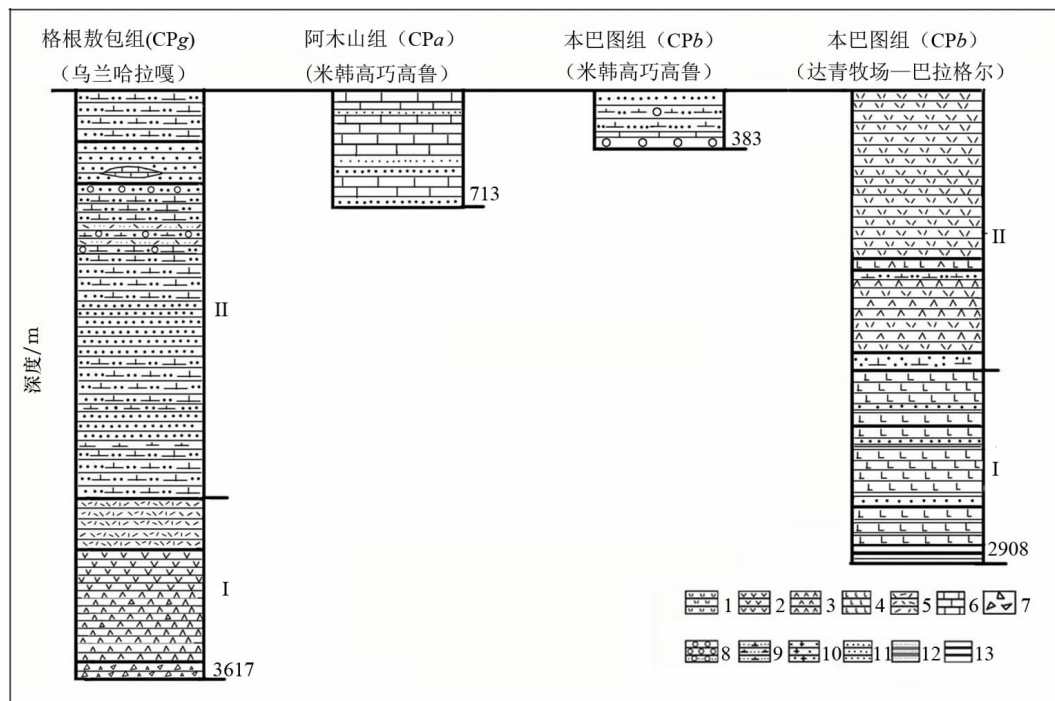
布的高镁玄武岩,笔者曾沿走向向西追溯这套玄武岩,延伸大于10 km,表明它们产出的稳定性,绝非是混杂堆积中的玄武岩块<sup>[15]</sup>。

## 2.1 晚石炭世微陆块的构造格局

本文通过分析对比,认识到格根敖包组、本巴图组和阿木山组这三套地层在岩性组合和分布上的差异与锡林浩特微陆块晚石炭世的构造活动背景有关(图2)。

图2中的格根敖包组(CPg)剖面分布在锡林浩特微陆块北缘的乌兰哈拉嘎—西乌珠穆沁旗—塔日彦—巴彦宝力格一带,乌兰哈拉嘎剖面下段为一套安山岩、英安岩,厚884 m,上段以快速堆积的长石英砂岩、硬砂岩为主,厚2 513 m。锡林浩特微陆块南缘的本巴图组也是一套巨厚(2 908 m)的火山—沉积岩,与北缘的火山岩相比,这里的本巴图组是一套含高镁玄武岩的双峰式火山岩。

值得关注的是,锡林浩特微陆块内部较为零星分布的阿木山组和本巴图组,它们的厚度仅为383~713 m,本巴图组的岩性以粗粒度的碎屑岩为主,阿木山组以碳酸盐和粉砂岩为主,水平层理发育,富含鲕、珊瑚及腕足等滨—浅海相化石,重要的是它们均无火山岩,鲍庆中等<sup>[14]</sup>用“台地相碳酸盐沉积”来描述其形成的稳定环境。



1—流纹岩;2—英安岩;3—安山岩;4—玄武岩;5—凝灰岩;6—灰岩;7—角砾岩;8—砾岩及砂砾岩;9—长石英砂岩;10—硬砂岩;11—粉砂岩;12—砂板岩;13—板岩。

图2 锡林浩特微陆块上石炭统一下二叠统剖面对比

Fig. 2 Comparison of Upper Carboniferous - Lower Permian sections in the Xilinhaote microcontinental block

## 2.2 控制古地理环境变化的构造机制

### 2.2.1 微陆块南-北缘快速沉降的裂谷盆地

如果做一粗略的估算,在同一段时间内,从微陆块中部的米韩高巧高鲁到微陆块边缘,在约 50 km 的距离内,地层厚度变化达 5~7 倍,如此差异只能解释为锡林浩特微陆块南、北缘断陷盆地活动的强烈程度。如果再结合火山岩的组合特征,可以看到微陆块南、北两侧断裂活动和岩浆来源的深度不同。北侧是受到前期板块缝合-造山作用的影响,岩浆活动具有继承性特征,中-酸性火山岩更多地显示了后期的壳熔特征。通过笔者<sup>[10]</sup>近年研究,南侧受到大水菠萝断陷盆地控制的高镁玄武岩则具有初始大陆裂谷的性质,低硅-高镁(MgO 含量>10%),LREE 亏损的特征及 Hf 同位素测定的结果( $\epsilon_{\text{Hf}}(t)=14.4\sim 23.9$ )均指示岩浆来源于曾受俯冲流体交代的亏损地幔,由于岩浆快速上升,未受地壳混染,显示了由于软流圈物质上涌,所导致的伸展构造背景。图 1 还显示晚石炭世花岗岩也主要分布在微陆块南缘。

### 2.2.2 晚石炭世大陆裂谷伸展的区域构造背景

自晚石炭世起,与软流圈物质上涌有关的伸展构造有着更大范围的区域构造背景。在二连-东乌珠穆沁旗缝合带以北,呈北东走向贯穿南蒙微大陆的宝力格裂谷带是中亚造山带的戈壁-天山裂谷带进入内蒙古的一段。它们在蒙古境内延伸 1 300 km,进入内蒙古,延至大兴安岭,长 650 km,宽 20~50 km。该裂谷控制的火山-沉积岩厚达 7 574 m,被命名为宝力高庙组(CPbl),在东乌旗西山可见到它们与下伏的上泥盆统之间的不整合接触关系,碎屑岩中出现安格拉与华夏植物混生的现象,地层时代被定为晚石炭世一早二叠世初<sup>[18]</sup>。长达数千公里的戈壁-天山裂谷带控制了这套裂谷型岩浆岩带,蒙古境内的一段由一套碱性玄武岩-流纹岩组成的双峰式火山岩及包括霞石正长岩在内的碱性花岗岩组成,同时形成的陆相碎屑岩含大量植物化石,化石和同位素年龄表明其时代为晚石炭世—早二叠世<sup>[19]</sup>。中国境内的宝力格裂谷带以陆相火山熔岩-火山碎屑岩为主,包括碱性安山岩、流纹岩和少量碎屑岩。火山岩组分表现出大陆裂谷型的特征,在东乌珠穆沁旗的沙尔哈达和阿巴嘎旗北部的那仁宝力格均可见正长岩和碱性花岗岩侵入体<sup>[16]</sup>。

如此规模的裂谷型岩浆岩带的出现,标志着中亚造山带自晚石炭世以来,作为板内的年轻陆壳已经承受了巨大的伸展变形,但未发生解体。而这次

晚石炭世起始的伸展作用是具全球性背景的,与核幔边界在晚石炭世—二叠纪(320~250 Ma)发生的一次地磁场反向导致的超静磁场有关<sup>[20]</sup>。Larson 等<sup>[21]</sup>认为,D"层内由于局部热失衡导致地幔热柱形成,当其热浮力超过上部地幔的黏滞力时,地幔热柱就会从 D"层上升。古地磁学揭示这期超静磁场带出现时期(320~250 Ma)正是地球表面强烈扩张的阶段,在冈瓦纳大陆解体、特提斯洋打开、大陆内部局部出现地幔柱或者软流圈物质上涌的背景下,形成包括峨眉山和塔里木的二叠纪大火成岩省及本文讨论的一系列大陆裂谷带。

## 2.3 微陆块在造山带中所起的支柱作用

如前所述,在晚石炭世起始的伸展背景下,沿着地块边缘发生岩石圈断裂活动,不论是微陆块北侧的板块缝合带,还是南侧亏损地幔玄武岩上涌的通道,在差异升降过程中形成的裂陷盆地中堆积了上千米厚的火山岩。而微陆块内部却保持稳定的状态,局部残留了厚度不大的台型碳酸盐岩-碎屑岩沉积。微陆块总体上抗住了这次区域性的伸展作用,不但保持了地块的完整性,而且还维系了造山带原有的构造格局。

由此联想到之前,在晚泥盆世—早石炭世的板块碰撞-对接过程中,正是由于古亚洲洋中散布的大量微陆块的存在和逐渐叠接,对板块碰撞起到了缓冲作用,板块“对接”或者“叠接”一词确切地表达出中亚造山带独特的造山特征。王鸿祯先生在《中国与蒙古国地质》<sup>[22]</sup>一文中,明确提到“蒙古南部和中国内蒙古地区形成了一个具有分散岛屿的洋盆,其充填过程未见明显的碰撞”。不论是板块的汇聚还是裂解过程,这些分散的微陆块都起到了重要的支柱作用。

## 3 底侵背景下的锡林浩特微陆块

### 3.1 晚石炭世微陆块活跃的岩浆活动

近年来西乌珠穆沁旗和锡林浩特地区随着科研工作进展及不同尺度地质图的测量与编制,获取了大量同位素年代学的资料(表 1)。石炭纪岩浆活动的年龄峰值为 320~310 Ma,表明晚石炭世是岩浆活动的高峰期。从表 1 可见,除深成岩外,还有堆晶岩和火山岩的形成。从图 1 可见,围绕着锡林浩特微陆块分布着大量晚石炭世花岗岩。有些岩体曾被划为二叠纪岩体,经年代学测定为晚石炭世岩体,如本文提供的浩勒图高勒二长花岗岩(322 Ma)。



表 1 锡林浩特微陆块石炭纪岩浆活动  
Table 1 Summary of the Carboniferous magmatic activities in the Xilinhaote microcontinental block

岩石类型	位置	岩石类型	时代/Ma	定年方法	MSWD	Sr-Nd-Hf 同位素数据	文献来源
深 成 岩	毛登套增音乌拉	二长花岗岩	301.5±3.2	LA-ICP-MS	3.2		[23]
	西乌旗东南 20 km	辉绿岩	303.1±2.6	SHRIMP	0.41	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)=12.1\sim17$	[24]
	多拉嘎拉	石英闪长岩	304.6±0.8	LA-ICP-MS	0.71		[25]
	苏尼特左旗白音宝力道	石英闪长岩	309±8(310)	SHRIMP		$I_{\text{Sr}}=0.705\ 2\sim0.705\ 9$ $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-0.2\sim2.4$	[26]
	毛登套增音乌拉	辉长闪长岩	309.8±1	LA-ICP-MS	1.4		[23]
	多拉嘎拉	石英闪长岩	312.4±1.9	LA-ICP-MS	3.8		[25]
	阿巴嘎莫若格欣	二长闪长岩	312.6±4.1	SHRIMP	0.76		[27]
	西乌梅林达巴岩体	石英闪长岩	313±5	SHRIMP	0.95		[25]
	西乌旗金星岩体	石英闪长岩	313±1.2	LA-ICP-MS	1.6		[25]
	西乌旗乌兰沟	角闪英云闪长岩	315±4	SHRIMP	0.95		[28]
	锡林浩特东南 20 km	石榴石花岗岩	316±3	SHRIMP	$X^2=0.61$		[29]
	西乌旗巴彦锡勒	二长花岗岩	316.5±1.8	SHRIMP			[30]
	西乌旗白音陶勒盖	二云母花岗岩	316±2.1	LA-ICP-MS	1.8	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)=0.5\sim3.7$	[31]
	毛登乌哈尔楚鲁	辉长岩	317.2±1.2	LA-ICP-MS	3.0		[23]
	毛登苏荣温都尔	辉石岩					[23]
	西乌达青牧场*	英云闪长岩	317				《西乌旗 1 : 25 万报告》
	西乌旗米生庙	石英闪长岩	318.5±2.3	LA-ICP-MS	1.5	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-0.8\sim3.7$	[31]
	多拉嘎拉	中细粒闪长岩	319.4±1.5	LA-ICP-MS	0.42		[25]
	通讯连牧场	辉长岩	319.7±1.6	LA-ICP-MS	1.7	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)=12\sim14.1$	[32]
	西乌达青牧场旧部	斜长角闪岩	320.6				[25]
	金河农队	角闪辉长岩	321±2	LA-ICP-MS	0.65		[25]
	西乌浩勒图高勒	花岗岩-二长花岗岩-正长岩	322.0±1.0	LA-ICP-MS	0.47	$I_{\text{Sr}}=0.698\ 4\sim0.705\ 0$ $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-2.41\sim-0.51$	本文
	西乌旗巴彦高勒	变质辉长岩	322.9±4.7	SHRIMP	0.95		《西乌旗 1 : 25 万报告》
	锡林浩特鹰头沟	二长花岗岩	323.2±1.9	LA-ICP-MS	1.9	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)=4.0\sim10.6$	[32]
	巴彦锡勒	花岗闪长岩	324.4±2.4	SHRIMP			[30]
	锡林浩特代吉卡山	A 型钾长花岗岩	330±2	LA-ICP-MS	2.0	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)=12.8\sim14.2$	[32]
堆晶岩	苏左旗包尔敖包	堆晶角闪辉长岩	325	角闪石 K-Ar			[33]
火 山 岩	苏右旗查干诺尔	玄武岩	313.9±6 313~308	SHRIMP	1.2	$I_{\text{Sr}}=0.704\ 3\sim0.704\ 5$ $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=8.3\sim8.4$	[17]
	西乌达青牧场	高镁玄武岩	315.4±4.4 318.4±3.4	SHRIMP	5 3.9	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)=14.4\sim23.9$	[15]
	西乌达青牧场东	英安质火山凝灰岩	321.2±2.5	SHRIMP	1.3		本文

注：\* 西乌达青牧场 317 Ma 英云闪长岩年龄见《西乌旗 1 : 25 万地质图》，化学分析数据为本文提供。

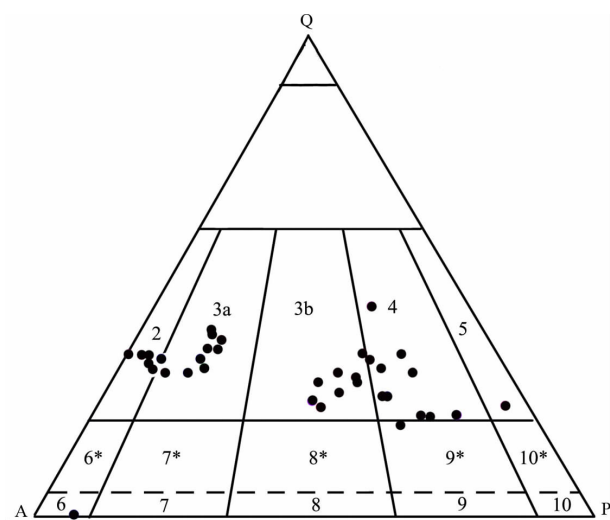
3.2 晚石炭世深成岩的特征

(1)深成岩的产出与锡林浩特微陆块密切相关。近年来通过详细的区域地质调查,人们发现晚石炭世深成岩分布与锡林浩特微陆块密切相关(图 1),它们或沿着锡林郭勒杂岩边缘分布,或呈多条彼此平行的岩墙或岩脉成群、成带顺着锡林郭勒杂岩的片理、片麻理侵入杂岩体内部,例如晚石炭世的梅林

岩体侵入锡林郭勒杂岩,乌套海的白色花岗岩中可见大量锡林郭勒杂岩的捕虏体<sup>[28]</sup>。

(2)复杂的岩石类型。本区晚石炭世深成岩的岩石类型丰富,岩性变化大。表 1 所列的 27 个岩体大部分有同位素年龄和较为详细的岩石化学资料。这一时期深成岩以石英闪长岩为主,其次为二长花岗岩、花岗闪长岩(表 1),此外还有少量 A

型钾长花岗岩、英云闪长岩以及基性的辉长岩、辉绿岩、辉石岩。在国际地科联 1972 年推荐的深成岩分类的 APQ 图<sup>[34]</sup>中(图 3),本区花岗岩表现了他们组成的复杂性,包括碱长花岗岩、花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、英云闪长岩。从投影在碱长花岗岩(2)中的早石炭世(330 Ma)锡林浩特 A 型钾长花岗岩,一直到投影在英云闪长岩(5)中的西乌旗晚石炭世(312 Ma)黑云石英闪长岩。其中二长花岗岩是研究区重要的一种岩石类型。本文提供的浩勒图高勒花岗岩(322 Ma),面积不大,但组成复杂,通过标准矿物 APQ 图投影(图 3),进一步可认定其主体为花岗岩,其中发现的碱性长石花岗岩和强碱性的正长岩( $\text{Na}_2\text{O}$  质量分数为 5.52%,  $\text{K}_2\text{O}$  质量分数为 7.56%),均显示了它们成因的复杂性和岩浆-流体活动的多期性。

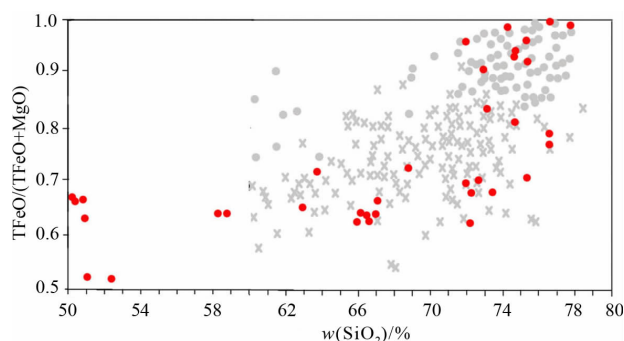


2—碱长花岗岩; 3a—花岗岩; 3b—二长花岗岩; 4—花岗闪长岩; 5—英云闪长岩、斜长花岗岩; 6\*—碱长石英正长岩; 7\*—石英正长岩; 8\*—石英二长岩; 9\*—石英二长闪长岩; 10\*—石英闪长岩; 6—碱长正长岩; 7—正长岩; 8—二长岩; 9—二长闪长岩; 10—闪长岩、斜长岩、辉长岩、苏长岩。

图 3 晚石炭世花岗岩的 APQ 图解

Fig.3 An APQ diagram of the Late Carboniferous granites

(3)双峰式的岩石组合特征。更为突出的是在石炭纪很短一段时间内(330~300 Ma),形成包括上述各种花岗岩和辉石岩、辉长岩、角闪岩、辉绿岩在内的双峰式深成岩(表 1,图 4)。图 4 中红点显示出了双峰的特征, $\text{SiO}_2$  含量集中在 50%~53%和 58%~78%两个区段,中间存在一段空挡。结合研究区晚石炭世(318~308 Ma)出现的以高镁玄武岩为特征的双峰式火山岩<sup>[10]</sup>,可以进一步确认本区为双峰式的深成岩组合。



红点代表锡林浩特微陆块晚石炭世的花岗岩、辉长岩和辉绿岩。灰色圆点代表与裂谷及造陆抬升有关的花岗岩,×号代表岛弧、大陆弧以及后造山花岗岩。

图 4 锡林浩特微陆块晚石炭世双峰式深成岩的  $\text{SiO}_2$ -TFeO/(TFeO+MgO) 图解  
(灰色符号的资料引自文献<sup>[35]</sup>)

Fig.4 Correlation of TFeO/(TFeO+MgO) ratio and  $\text{SiO}_2$  content in the Late Carboniferous bimodal plutonic rocks in the Xilinhaote microcontinental block

仔细浏览图 4 会发现锡林浩特微陆块上晚石炭世花岗岩( $\text{SiO}_2$  质量分数>58%)的分布覆盖了原图灰色符号标志的裂谷-岛弧-后造山等不同构造背景的花岗岩,使人不得不面对花岗岩的复杂性。联系到本区晚石炭世出现的石榴石花岗岩、二云母花岗岩、斜长角闪岩以及含锡林郭勒杂岩捕虏体的英云闪长岩,显示了壳熔岩浆的特征;但同时双峰式深成岩及或含微粒包体的 A 型花岗岩的出现,又显示了伸展背景下幔源岩浆的活动。此外还有人根据花岗岩富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K,亏损 Nb、P、Ta、Ti 等高场强元素,认为岩浆形成于与俯冲有关的岛弧或陆缘环境<sup>[23,25-26]</sup>。究竟如何解释这些同时存在的不同构造现象,这也正是本文研究的切入点。

### 3.3 深成岩的形成与底侵作用的关系

重熔是本区花岗岩形成的重要特征。大量证据表明,大部分长英质岩浆是由地壳岩石的重熔作用产生,但是对重熔花岗岩的形成可以有完全不同的解释,既可以形成在俯冲、碰撞或挤压造山环境中,也可以形成在伸展背景下的减压熔融或者底侵熔融环境中<sup>[9]</sup>,此外,还有人提出重熔流体交代<sup>[25]</sup>。然而,当综合考虑到本区同时出现的堆晶岩、双峰式深成岩以及含微粒包体的 A 型花岗岩时,研究的焦点自然集中到伸展背景下的底侵作用,即来自上地幔部分熔融产生的玄武质岩浆侵入或添加到下地壳底部的过程。

李玉文等<sup>[33]</sup>在苏尼特左旗包尔敖包填 1:50 000 地质图时发现的堆晶角闪辉长岩(320 Ma,表 1)是

伸展背景下底侵作用的直接证据<sup>[33]</sup>。本区晚石炭世双峰式深成岩的 Sr-Nd-Hf 同位素初始值  $I_{\text{Sr}} = 0.7052 \sim 0.7043$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.4 \sim 8.4$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -0.8 \sim 23.9$ , 显示了亏损地幔的源区特征<sup>[10]</sup>。要证明底侵作用在巨量花岗岩形成中的作用, 必须提供地壳深部存在大体积镁铁质岩浆存在的证据<sup>[36]</sup>。本区晚石炭世(315~318 Ma)高镁玄武岩的存在及其本区早二叠世双峰式火山岩的持续喷发, 支持了镁铁质岩浆的存在。此外, 从通过研究区的地学断面来看, 上地幔中普遍存在低电阻层, 电阻率从  $10^3 \Omega \cdot \text{m}$  降为  $1 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ , 推测在尖晶石相橄榄岩层下部含有超镁铁质熔融岩相, 它们可以成为地表玄武岩的岩浆源<sup>[37]</sup>。从上述地质、地球化学、地球物理学等方面的研究资料看, 它们都支持了底侵作用存在的可能性。

正是在底侵作用下, 形成了与原岩成分相关的各类花岗岩, 可以出现 I 型、S 型, 甚至 A 型花岗岩。同时也出现了与岩浆分异有关的双峰式深成岩, 岩浆作用的复杂性与古老的锡林浩特微陆块的组成有关。因此, 不难理解经历了洋-陆演化复杂过程的锡林浩特前寒武纪微陆块受到上涌的幔源岩浆底侵-重熔时, 形成的花岗岩必然具有多元性<sup>[38]</sup>。Hildreth<sup>[39]</sup>解释了底侵背景下花岗岩形成的复杂性: 除了幔源岩浆导致老地壳原岩部分熔融以及两种岩浆的相互混染外, 还必须有玄武质侵入体重新脉动式注入和结晶作用诱导的热效应。这一观点对前文提到的浩勒图高勒花岗岩中包含碱性长石花岗岩和强碱性正长岩做了很好的解释。伴随岩浆流体的不断交代、地壳厚度不断地加大, 其硅、碱含量特别是钾的含量不断增高, 促使地壳刚性增强, 渗透性降低, 陆壳的成熟度和固结程度不断提高。

板块学说对大陆形成之后年轻陆壳在底侵背景下的演化研究相对薄弱, 这正是当前大陆动力学关注的热点问题, 而本文讨论的锡林浩特微陆块晚石炭世花岗岩, 提供了一个多阶段叠合的构造-岩浆演化的实例。

#### 4 微陆块在陆壳固结稳定中的贡献

本文讨论的锡林浩特微陆块晚古生代花岗岩的复杂性, 对认识中亚造山带历史有一定的借鉴意义。在苏尼特左旗的包尔敖包地区, 侵位于锡林郭勒杂岩中的晚石炭世角闪辉长堆晶岩的发现, 是新构造

岩浆旋回开始的标志<sup>[33]</sup>, 这一发现为认识中亚造山带早期演化的底侵作用背景提供了重要证据。

Jahn 等<sup>[40]</sup>在中亚地区划分了 8 条晚古生代—中生代的过碱性或碱性长石花岗岩带及其伴生的双峰式火山岩带, 它们以低 Sr 高 Nd 同位素特征标志所经历的三次裂谷作用, 在此期间, 中亚造山带非但未曾裂解, 古老的微陆块和新生陆壳通过垂向增生的方式<sup>[41]</sup>最终形成稳定的欧亚大陆。

在传统概念中, 碱性花岗岩通常被看作造山运动之后侵位的, 而双峰式火山岩被看作地壳(或地槽)活动初期的岩浆喷发, 二者是不相干的岩浆活动。然而在中亚造山带二者是同期活动的产物, 底侵背景下的重熔作用能将它们联系起来。实验岩石学证明, 在大陆地壳所具有的地热条件下, 经过不同程度的熔融, 可以得到不同成分的花岗质岩浆。其中最著名的实验是 Winkler 以硬砂岩为对象, 在水压  $2 \times 10 \text{ Pa}$  时作的熔融实验<sup>[42]</sup>, 证明了不同温度下重熔熔浆组分所含的石英、钠长石、钾长石的比例不同。开始加热时, 它先转变成片麻岩的矿物组合。在  $(687 \pm 10)^\circ\text{C}$  出熔了低熔点熔浆组分, 石英: 钠长石: 钾长石 = 41: 28: 31, 在重熔温度相对较低的情况下, 可以出现大量碱性或含碱性长石的花岗岩; 当温度达  $700^\circ\text{C}$  时, 体系中 Or 全部转入熔浆; 当温度达  $740^\circ\text{C}$  时, 熔浆数量约占 75%, 出熔的成分相当于花岗闪长岩。因此, 碱性花岗岩的出现与组成微陆块的岩石再次重熔有关, 它们与伸展-底侵背景下的双峰式火山岩伴生不足为奇。近年来有学者已经注意到多陆块、小洋盆体制与花岗岩生成演化的关系<sup>[43]</sup>。

尽管不同的微陆块有着各自不尽相同的历史, 但综合起来看, 它们构筑了一部重要的地质历史, 记录了洋盆的初始裂解、洋盆的扩张-消亡、板块碰撞-造山, 乃至陆壳固结-硬化的各阶段历史, 这正是微陆块研究的意义。锡林浩特微陆块作为晚石炭世深成岩的载体, 记录了年轻的中亚造山带在晚古生代经历的陆壳垂向增生和稳定的过程。本文正是在底侵作用的深部背景下认识该区在晚石炭世出现的某些独特的地质现象。

感谢任纪舜先生对本文的讨论和支持。

#### 参考文献

- [1] 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶, 等. 古中亚复合巨型缝合带南缘构造演化[M]//肖序常, 汤耀庆. 古中亚复合巨型缝合带南缘



- 构造演化. 北京: 北京科学技术出版社, 1991: 1-29.
- [2] JAHN B M, WU F Y, CHEN B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. Episodes, 2000, 23(2): 82-92.
- [3] ХАЙН В Е. Окраинно-континентальные и межконтинентальные геосинклинальные пояса: сопоставление особенностей развития [С]. Москва: Наука, 1984, 3: 7.
- [4] BADARCH G, DICKSON W, WINDLEY B F. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 21: 87-110.
- [5] 何国琦, 李茂松. 关于陆间型褶皱带几个问题的讨论 [M]// 北京大学地质系. 岩石圈地质科学. 北京: 地震出版社, 1996: 1-11.
- [6] ZONENSHAIN L P, KUZMIN M I, KONONOV M V. Absolute reconstructions of the Paleozoic oceans [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1985, 74: 103-116.
- [7] COLEMAN R G. Continental growth of northwest China [J]. Tectonics, 1989, 8(3): 621-635.
- [8] JAHN B M, HONG D W. Continental growth in the Phanerozoic: evidence from east-central Asia [C]// Ürümqi of Xinjiang, China: IUCP-420 first workshop abstract, 1998.
- [9] 金振民, 高山. 底侵作用 (underplating) 及其壳-幔演化动力学意义 [J]. 地质科技情报, 1996, 15(2): 1-7.
- [10] 邵济安, 田伟, 唐克东, 等. 内蒙古晚石炭世高镁玄武岩的成因和构造背景 [J]. 地学前缘, 2015, 22(5): 171-181.
- [11] 邵济安, 张履桥. 兴蒙造山带中的古地体 [M]// 中国地质学会构造专业委员会. 造山带, 盆地, 环太平洋构造. 第一集. 北京: 地质出版社, 1990: 16-21.
- [12] 孙立新, 任邦方. 内蒙古额尔古纳地块元古代末期的岩浆记录: 来自花岗岩片麻岩的锆石 U-Pb 年龄证据 [J]. 地质通报, 2013, 32(2/3): 341-352.
- [13] 周新华, 英基丰, 张连昌, 等. 大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献: 锆石 U-Pb 年龄及多元同位素制约 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2009, 34(1): 1-10.
- [14] 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区石炭二叠纪岩石地层 [J]. 地层学杂志, 2005, 29(增刊): 512-519.
- [15] LIU J F, LI J Y, CHI X G, et al. A late-Carboniferous to early Early-Permian subduction-accretion complex in Daqing pasture, southeastern Inner Mongolia: evidence of northward subduction beneath the Siberian paleoplate southern margin [J]. Lithos, 2013, 177: 285-296.
- [16] 唐克东. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1992: 32.
- [17] 汤文豪, 张志诚, 李建锋, 等. 内蒙古苏尼特右旗查干诺尔石炭系本巴图组火山岩地球化学特征及其地质意义 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2011, 47(2): 321-330.
- [18] 内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 183-187.
- [19] ЯРМОЛЮК В В, ДУРАНТЕ М В, КОВАЛЕНКО В И. Возраст комендит-щелочно-гранитных ассоциаций Южной Монголии [С]. Известия АН СССР, Серия Геологическая, 1981: 40-48.
- [20] COURTILLOT V, BESSE J. Magnetic field reversals, polar wander, and core-mantle coupling [J]. Science, 1987, 237: 1140-1147.
- [21] LARSON R L, OLSON P. Mantle plumes control magnetic reversal frequency [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 107: 437-447.
- [22] 王鸿祯, 何国琦, 张世红. 中国与蒙古之地质 [J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 1-13.
- [23] 张学斌. 内蒙古锡林浩特毛登地区石炭纪侵入岩的年代学与地球化学研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2014: 25.
- [24] ZHU W P, TIAN W, WEI C J, et al. Late Paleozoic rift-related basalts from central Inner Mongolia, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.04.007>.
- [25] 马士委. 内蒙古西乌旗石炭纪构造岩浆岩带及其地质意义 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2013: 24-34.
- [26] 陈斌. 内蒙古苏尼特左旗南白音宝力道岩体特征与成因: 是岛弧岩浆岩而不是埃达克岩 [J]. 地质论评, 2002, 48(3): 261-266.
- [27] 云飞, 聂风军, 江思宏, 等. 内蒙古莫若格欣地区二长闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 2011, 30(3): 504-510.
- [28] 鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古白音高勒地区石炭纪石英闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其意义 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2007, 37(1): 15-23.
- [29] 施光海, 刘敦一, 张福勤, 等. 中国内蒙古锡林郭勒杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及意义 [J]. 科学通报, 2003, 48(4): 2187-2192.
- [30] 葛孟春, 周文孝, 于洋, 等. 内蒙古锡林郭勒杂岩解体及表壳岩系年代确定 [J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 182-195.
- [31] 刘建峰. 内蒙古林西—东乌旗地区晚古生代岩浆作用及其对区域构造演化的制约 [D]. 长春: 吉林大学, 2009: 44-45.
- [32] 周文孝. 内蒙古锡林浩特地区古生代岩浆作用的年代学与地球化学研究 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉), 2012: 74.
- [33] 李玉文, 邓晋福, 罗照华, 等. 内蒙古苏尼特左旗地区堆晶角闪辉长岩的发现及地质意义 [J]. 现代地质, 1995, 9(2): 212-219.
- [34] STECKEISEN A L. Classification and nomenclature of plutonic rocks. Recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks [J]. Internationale Zeitschrift für Geologie, 1974, 63: 773-785.
- [35] 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 花岗岩研究思维与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2002: 22-27.
- [36] 桑隆康, 马昌前. 岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 2012: 200-

202.

[37] 《国家地震局地学断面》编委会. 内蒙古东乌珠穆沁旗至辽东沟地学断面(说明书)[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 49.

[38] 罗照华, 卢欣祥, 陈必河, 等. 透岩浆流体成矿作用导论[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 75-83.

[39] HILDRETH W. Quaternary magmatism in the Cascades: geological perspectives[M]. USGS Professional Paper 2007: 1-125.

[40] JAHN B M, LITVINOVSKY B A, ZANVILEVICH A N,

et al. Peralkaline granitoid magmatism in the Mongolian-Transbaikalian Belt: evolution, petrogenesis and tectonic significance[J]. Lithos, 2009, 113: 521-539.

[41] 邵济安, 韩庆军, 张履桥, 等. 陆壳垂向增生的两种方式: 以大兴安岭为例[J]. 岩石学报, 1999, 15(4): 600-606.

[42] 孙翥, 彭亚鸣. 火成岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1985: 255-256.

[43] 王涛. 花岗岩混合成因研究及大陆动力学意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(2): 161-168.

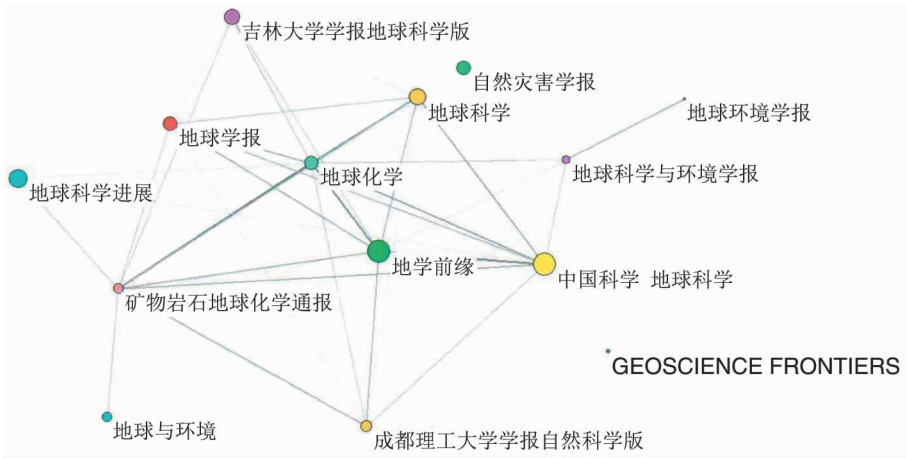
《地学前缘》2017 年出版简况

(1)2017 年《地学前缘》印刷出版论文 183 篇,利用网络出版先进技术在 CNKI 平台上优先出版 135 篇(截至 2017 年 12 月 21 日)。

(2)《地学前缘》保持主题性专辑出版,以国际视野组织主题内容,以信息集成方式发表地学热点成果,如能源方面出版了引起国人和世界瞩目的《南海天然气水合物研究进展》专辑以及新能源方面的《油田地热》专辑。

(3)《地学前缘》总被引频次和影响因子均居地球科学综合类期刊第一位,在该类期刊中也显示较好的互引关系(见附图)。

附图:



2016 年地球科学综合类期刊互引关系示意图  
(引自中国科学技术信息研究所《2017 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》)