

中国地质科学院
地质研究所所刊

第 18 号



地质出版社

丁
251.1
140

目 录

中国冀东3500Ma斜长角闪岩系的野外产状、岩相学、Sm-Nd同位素年龄及 稀土地球化学.....江博明 B.欧弗瑞 J.柯尼协 白益良 沈其韩 刘敦一 (1)	
中国太古代地壳演化——泰山杂岩及长期亏损地幔新地壳增生的证据江博明 B.欧弗瑞 沈其韩 刘敦一 张宗清 董一杰 叶笑江 张群章 J.柯尼协 J.马西 (33)	
阜平群、五台群、溥沱群的界限年龄.....刘敦一 伍家善 (58)	
内蒙古海渤湾千里山群黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄.....沈其韩 富云莲 张萌芳 (68)	
浙江陈蔡群变质岩系锆石不平衡U-Pb 年龄测定.....徐步台 刘敦一 (75)	
河北省迁安曹庄—白龙港一带地质及花岗质岩石特征.....陈 涛 (82)	
Sm-Nd 同位素年代学样品的采集和加工.....张宗清 (98)	
同位素地质年龄汇编 (1982—1985年).....刘敦一等 (108)	
对华南构造带演化特征的一种新认识——许靖华教授认为华南为阿尔卑斯 型造山带王宗起 (150)	
高温高压实验及其在地学中的应用尚如相 (152)	

中国地质科学院 地质研究所所刊 第18号

责任编辑：李汉声
地质出版社出版发行
(北京西四)
地质出版社印刷厂印刷
(北京海淀区学院路29号)
新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092 1/16 印张：9.75 字数：231,000
1988年9月北京第一版·1988年9月北京第一次印刷
印数：1—1,410册 国内定价：2.40元
ISBN 7-116-00221-9/P·197

中国冀东3500Ma斜长角闪岩系的野外 产状、岩相学、Sm-Nd同位素年龄 及稀土地球化学*

3500 Ma OLD AMPHIBOLITES FROM EASTERN
HEBEI PROVINCE, CHINA; FIELD OCCURRENCE,
PETROGRAPHY, Sm-Nd ISOCHRON AGE AND REE
GEOCHEMISTRY*

江博明 B.欧弗瑞 J.柯尼协

(法国Armorican基底构造研究中心、雷恩大学地质研究所)

白 益 良

(香港九龙东南亚石油信息有限公司)

沈其韩 刘敦一

(中国地质科学院地质研究所)

本文提要 在冀东曹庄和黄柏峪附近的小区域内, 普遍出露有斜长角闪岩和伴生的灰色片麻岩。测得斜长角闪岩的Sm-Nd等时线年龄为 3470 ± 107 Ma, $f_{Nd} = 0.50872 \pm 11$, $\epsilon_{Nd}(t) = +2.7 \pm 0.6$ 。灰色片麻岩的Sm-Nd模式年龄为2240 Ma左右。结合野外地质特征综合分析, 我们认为, 斜长角闪岩及与其伴生的灰色片麻岩在早期可能是双模式火山岩。由于后期富钾花岗岩岩浆(花岗岩中锆石的U-Pb年龄为2500 Ma)的侵入被切割破碎而呈穹窿状产于花岗岩中。整个岩石组合在约2200 Ma前又被伟晶岩脉所切割。

一、前 言

太古宙岩石广泛出露于华北地区并构成了中朝克拉通中朝地台的主要部分(黄汲清, 1978, 1984^[4]; 马杏垣和吴正文, 1981)。出露于冀东的太古宙岩石被定为迁西群, 长期以来被认为是中国最老的岩石。早期测定的太平寨地区麻粒岩约为3600 Ma的Rb-Sr等时线

* 英文稿见 *Precambrian Research*, 34(1987), 311—346。

年龄(中国地质科学院, 1975^[1]; 中国科学院地质所, 1978^[2])没有被以后的研究所证实。由不同实验室用多种年代学方法(U-Pb、Sm-Nd、Rb-Sr)得出的结果是, 太平寨—郭家沟地区的麻粒岩(图1)形成于2500Ma^[30, 71, 72, 89]以前, 紧接着便发生了麻粒岩相变质作用(图1; Pidgeon, 1980; Compston et al., 1983; Jahn和Zhang, 1984)。

然而, 对太平寨以南约40km处的迁西群其它岩石继续进行的地球化学和岩石学研究揭示出了相当于早太古代的岩石, 现在它们以包于晚太古代花岗质岩石中的已高度变质和强烈变形的斜长角闪岩残留体为代表。这个早太古代年龄的发现已于1983年9月在北京召开的“国际前寒武纪地壳演化讨论会”会上发表了。最近, 黄莹等(1986)测定了采自同一地区的一些斜长角闪岩样品, 他们的Sm-Nd结果基本上证实了3500Ma的年龄。但是, 我们并不完全同意他们选择样品的理由, 也不同意他们对有关岩石组合的野外关系的认识以及对完全不同的岩石类型(斜长角闪岩和石英闪长岩)的古老年龄的不同的保存机理所作出的含糊解释。这些问题将在本文最后部分讨论。

本文的主要目的:(1)阐述这些斜长角闪岩的野外产状, 并着重于它与其围岩片麻岩和花岗岩的关系;(2)给出所有被分析样品的详细的岩相学特点, 并据此说明它们的变质史;(3)描述它们的化学的和同位素的(Nd、Sr、Pb)组成特征, 以判定它们的成岩年龄或者其它地质事件的时间, 并分析它们的成因联系;(4)讨论这些古老斜长角闪岩在华北地区地壳发育过程中所起的作用;(5)利用Nd同位素数据厘定早太古代上地幔的地球化学演化(图2—9, 表1—4)。

二、地质概述

(一) 迁西群的重要特征

在冀东地区, 90%以上的太古宙岩石露头以高级变质岩(麻粒岩相和高角闪岩相)为特征。10%以下的属于低角闪岩相和绿片岩相岩石组合(孙大中等, 1984^[3]; 钱祥麟等, 1985^[6])。孙大中等(1984)将太古宙岩石划分为两个群: 迁西群, 主要为高级变质麻粒岩相岩石; 八道河群, 主要由高角闪岩相岩石组成(表1)。在层序上, 迁西群一般被认为是冀东地区, 甚至整个中国太古宙岩石中最下部的岩石组合(程裕淇等, 1982^[5]; 孙大中等, 1984^[3], 1985; 钱祥麟等, 1985^[6])。显然, 研究中朝地台太古代地壳发展的关键在于更好地理解迁西群中不同类型岩石的演化历史和岩石成因。

迁西群被进一步划分为两个组, 下部为上川组, 上部为三屯营组(表1和图1)。上川组主要为二辉麻粒岩, 其次为斜方辉石—普通角闪石—斜长麻粒岩、斜方辉石—斜长麻粒岩和少量含磁铁矿石岩。典型产地在滦河北岸太平寨—郭家沟地区。三屯营组由含黑云母辉石麻粒岩、紫苏花岗片麻岩和丰富的条带状铁建造(BIF)组成。后者提供了本区最重要的铁矿。孙大中等(1984)^[3]把本文所研究的岩石组合划入三屯营组, 从层序上说应在上川组之上。然而, 这样的地层划分尚需可靠的年代学数据加以证实(见下文)。本文的研究成果和某些未发表的成果对这个划分提出了异议。

近年来已用不同方法(U-Pb、Rb-Sr和Sm-Nd)对太平寨—郭家沟地区的上川组二辉麻粒岩进行了测定^[30, 71, 72, 89], 所有结果非常一致地说明, 原岩建造大约在2500Ma以前

表 1 中国河北省东部太古代地属表*

Table 1 Archaean stratigraphy in eastern Hebei Province, China

群	组 (厚度)	岩 性	变 质 相	原 岩 特 征
八道河群	三门店组 (3350m)	浅色黑云斜长变粒岩 (leptynite), 斜长角闪岩, 层状含铁岩系	主要是高 角闪岩相	中至酸性凝灰岩和条带状铁建造 (BIF), 部分拉斑玄武岩流和火山碎屑岩
	湾丈子组 (1600m) 王厂组 (2250m)	斜长角闪岩, 浅色黑云斜长麻粒岩 斜长角闪岩, 少量角闪石岩		基性火山岩流, 在下部有些富铁玄武岩 (基性科马提岩?)
迁西群	三屯营组 (1250m)	黑云紫苏斜长片麻岩 (紫苏花岗岩) 基性辉石麻粒岩, 斜长角闪岩	主要是角 闪石-辉石 麻粒岩相	中至酸性火山岩 + 火山碎屑岩, 少量基性火山成因的物质; 条带状铁建造 (BIF)
	上川组 (1500m)	大量二辉麻粒岩, 少量单斜辉石-角闪石-斜长石麻粒岩 + 透辉石-斜长石麻粒岩 + 辉石磁铁矿英岩 + 榴辉铁橄岩 + 黑云-紫苏辉石-斜长石片麻岩 + 少许辉石岩和角闪石岩		基性火山岩 + 火山沉积岩; 少量酸-中性火山岩 + 火山碎屑岩

* 据孙大中等, 1984。

形成, 紧接着发生了第一期麻粒岩相变质作用。根据Rb-Sr矿物等时线年龄^(30,71), 这些岩石大约在1700Ma以前又经受了晚期变质作用。对不同年龄结果的解释, 江博明和张宗清(1984)^(71,72)作了详细论证。

迁西群的麻粒岩具有从超基性、基性-中基性到酸性的不同成分。地球化学研究得出结论认为, 所分析的大多数样品的原岩为火成岩, 或者派生于成熟度很低的火山碎屑沉积物⁽⁷⁷⁾。此外, 大多数酸性麻粒岩的物质组成相当于英云闪长岩-花岗闪长岩, 或者说相当于典型的太古宙TTG岩套 (英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)。

在江博明和张宗清的(1984)文章中综述的迁西群麻粒岩的许多地球化学特征, 主要是基于滦河以北上川组的岩石。这些麻粒岩中的Rb和生热元素 (U、Th和K) 高度亏损, 可很好地与苏格兰的Lewisian杂岩^(97,98,103,104)、南极洲Vestford地块的太古宙麻粒-片麻岩⁽⁹⁷⁾, 以及印度南部某些太古宙紫苏花岗片麻岩⁽⁵³⁾对比。但是, 产于滦河以南的三屯营组含黑云母麻粒岩却显示出“未亏损”性质, 非常像澳大利亚中部⁽⁴⁶⁾、芬兰北部⁽⁴⁷⁾以及巴西的Jequié杂岩⁽⁹²⁾的麻粒岩。对生热元素所进行的区域性测定的新数据也证实了滦河两侧麻粒岩具有截然不同的性质⁽⁸⁾。再者, 在迁安地区 (滦河南侧) 有异常丰富的条带状铁建造与麻粒岩类伴生, 而在上川组 (滦河北侧, 图1) 则很少见到条带状铁建造。部分根据地球化学研究的结果, 部分根据野外观察结果, 其中包括孙大中等人 (1984)⁽³⁾描述的糜棱岩化带, 认为沿滦河呈东西走向的剖面可能代表一个重要的剪切带或一个逆冲带。至今为止, 两套麻粒岩之间截然不同的地球化学性质的原因尚不清楚。孙大中等 (1984)⁽³⁾认为, 太平寨地区片麻岩较强的亏损性质意味着它们是深部地壳的露头, 由此说明其成岩年龄较老。然而, 已发表的迁安紫苏花岗片麻岩的 2650 ± 50 Ma的Rb-Sr等时线年龄⁽³⁰⁾和



图 1 河北省东部地质略图

(孙大中和陆松年, 1985)

Fig. 1 Simplified geologic map of eastern Hebei Province

(after Sun and Lu, 1985)

我们未发表的说明迁安地区大多数麻粒岩(即所谓“三屯营组”)产生于2700Ma以前的Sm-Nd结果,都不能支持孙大中的论点。我们相信,造成上述差异的部分原因是岩石与具有不同 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比例的流体间的相互作用,另外与晚太古代富钾花岗质熔体的成脉作用和交代作用有关。这一现象在西格陵兰南部晚太古代岩石中普遍存在^[26]。

(二) 曹庄—黄柏峪地区的斜长角闪岩

迁西群在冀东最靠南的露头分布在滦河以南和以西,被孙大中等(1984)定为较年轻的三屯营组。为方便起见,我们称之为迁安地区(图2)。年龄大约为3500Ma的早太古代岩石正是出露在这个地区的南部。

总的来看,迁安地区北部是由一系列条带状铁建造与伴生的辉石麻粒岩、酸性变质火山岩及少量斜长角闪岩和超基性岩石组成,这些岩石在后期被紫苏花岗片麻岩所侵入^[10, 26]。迁安地区与迁西群出露的其它地区的区别主要是其岩性特征和构造演化。钱祥麟等(1985)^[6]称前者为迁安麻粒-片麻岩穹窿构造区,后者为迁西复杂褶皱区。本文研究的地区属于强烈褶皱的迁安片麻岩穹窿区的西部边缘。条带状铁建造产于一系列向斜构造或向形构造中。

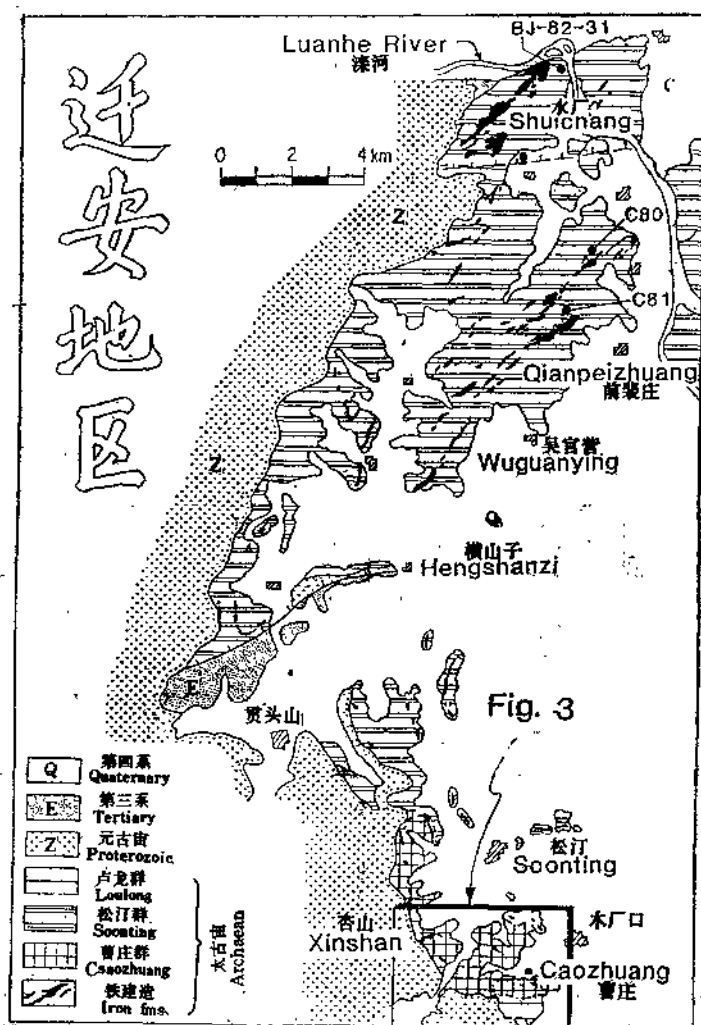


图 2 迁安研究区地质略图

图中标出了3个样品的采样位置；太古代地层分类引自白益良等(1980)；曹庄群在图南端

Fig. 2 Simplified geologic map of the study area in the Qian'an region. Three sample localities are shown in the northern part. Note that the different Archean stratigraphic division is after Bai et al. (1980). The oldest Caozhuang (also spelled as Tsaozhuang) Group is limited to the extreme south of the map area.

在研究区最南部常可见斜长角闪岩，这些斜长角闪岩一般呈不连续地质体产出，非常像其它地方典型的太古代高级变质片麻岩系中的包体^(19,20,24,25,8)。大多数斜长角闪岩露头见于曹庄和魏柏峪附近3km、南北2km的非常有限的范围内(图3)。在魏柏峪主要露头上所见的斜长角闪岩呈包体或岩块状被包在灰色片麻岩中，它们又被稍晚的富钾花岗岩浆侵入和混合岩化，而后整个岩石组合又被晚期伟晶岩所切割。在此露头以东约1km处曹庄水库北岸的露头上，可见斜长角闪岩岩块被包于粉红色花岗岩中。用U-Pb法测定了从富钾花岗岩中选出的锆石的年龄，结果约为2600Ma，而从伟晶岩脉中获得的锆石年龄值约



图3 曹庄—黄柏峪地质略图

(图中标有采样位置)

Fig. 3 Simplified geologic map of the Caozhuang-Huangbaiyu area showing additional sample localities

为2200Ma^[75]。

在某些地方,斜长角闪岩岩块似乎可以沿走向追索,并可见其与淡色的灰色片麻岩呈互层。从这方面看,斜长角闪岩-灰色片麻岩岩石组合可能代表一套老的双模式岩套的残余体,现在分散在年轻的花岗质岩体中。晚期的粉红色高钾花岗质侵入体明显地混染了老的淡色的灰色片麻岩以及位于北面的水厂地区麻粒岩相的上地壳岩石。看来,所有与斜长角闪岩伴生的老片麻岩似乎均已受到混染和不同程度的交代,因此,具有原始TTG成分(对Na/K比值而言)的灰色片麻岩很少能保存下来,甚至消失殆尽。然而,斜长角闪岩残留体似乎幸存下来了,它的难熔元素(如REE)的原来化学成分特征和同位素特征看来仍保持原状,起码在包体内部是这样的。

在野外,斜长角闪岩可区分为几种不同的岩相学类别。一部分相对细粒且均匀,而其它的则含有长石集合体,非常类似于西格陵兰的Ameralik岩墙斜长角闪岩或Nûk片麻岩中的基性包体^[81,20,28,25,26]。虽然多数样品目前具有典型的斜长角闪岩相矿物组合,但是,岩相学证据和普通铅同位素数据支持其早期可能曾经过麻粒岩相条件而后变为现在的矿物组合,有关的证据将在后面介绍。

在少数地点,斜长角闪岩呈层状并夹有含石榴石和矽线石的变质沉积岩,它们的原岩很

像是沉积成因的,可能为火山凝灰岩。与斜长角闪岩伴生的岩石还有少量条带状铁建造和其它岩石,包括含锆(白)云母的石英岩、堇青石-黑云母-砂线石片麻岩和石榴石-斜方辉石-石英片麻岩。它们的野外关系并非在所有情况下都很清楚。

除了以上谈到的粉红色花岗岩和伟晶质岩脉以外,在黄柏峪村西还见有侵入于上地壳岩石的晚太古代二长花岗岩、含钾长石斑晶斑状花岗闪长岩以及一些时代不明但可能属元古宙的辉长岩岩墙。在这方面,曹庄-黄柏峪岩系类似于南极洲 Vestford 地块的太古宙麻粒-片麻岩杂岩的岩石组合^[9]。杏山铁矿附近的二长花岗岩岩体被元古界(约1800Ma)底砾岩直接覆盖,采自该岩体的样品得到2550Ma的锆石年龄。此外,采自脑峪门的斑状花岗闪长岩的U-Pb年龄约为2450Ma^[15]。

基于变形模式和其它构造标志,白益良等(1980)认为,他们曾一度定名为“曹庄群”的曹庄-黄柏峪地区的斜长角闪岩及其伴生的岩石代表了冀东最老的岩石。这个群在地层上与迁西群相当。由构造分析表明,这套斜长角闪岩的年龄较老,本文作者所进行的同位素年龄研究目前已得到证实。

斜长角闪岩包体并不完全局限在曹庄-黄柏峪地区,它们也出露在水厂铁矿区以北的麻粒岩相石英长石片麻岩中。样品C80、C81和BJ-82-31便是典型例子(见表4)。在羊崖山附近,大量角闪岩包体出现在淡灰色-淡粉红色的片麻岩中。整个岩石组合与美国明尼苏达河谷的早太古代Morten片麻岩明显相似^[45]。不过,那里的斜长角闪岩包体(直径小于50cm)远远小于出露在曹庄-黄柏峪地区的,这里岩块大小在1—5m的很常见。

三、采样及岩相学特征

本次研究的多数样品是由白益良和他的同事在1982年以前的数次野外填图时采集的。一些岩芯样品是由首都钢铁公司在调查铁建造的地下延伸时所钻取的。其余的样品是由作者等在1982—1985年期间进行野外调查时所采集的,但没有分析所有的样品。采样位置见图2、3。

用于同位素分析的两组样品(基性包体和灰色片麻岩)的主要岩相学特征描述如下(每个样品的描述见附录1)。

(一) 岩相学特征

1. 斜长角闪岩

除了样品C93可能代表富含辉石的堆积岩以外,斜长角闪岩包体一般均为深色细粒的,这些角闪岩可以分为两个岩相类型。

(1) 由早期麻粒岩相岩石组合退变而来的斜长角闪岩,包括C1、C2、C12、C80、C81、C91、C97,以及BJ-82-31(附录1)。退变质有时几乎使岩石完全受到改造,但是在3个样品(C80、C81和C91)中所保存的岩石结构和斜方辉石-单斜辉石-斜长石矿物组合,仍然具中间麻粒岩相的特征。矿物相的比例变化很大,其变化程度取决于退变质程度。在某些情况下,斜方辉石消失了,而且,单斜辉石仅呈分散的残留体见于筛孔状变嵌晶的角闪石中(如C91)。斜长石成分由An₂₅(C1)到An₇₅(C97),它总是具有双晶,却很少见有环带,只有在高An斜长石中才出现环带(向颗粒边缘方向,An₇₅→An₅₅)。普通

角闪石是一种普遍存在的矿物,它常常是由辉石在退变质过程中发生改造而生成的。某些普通角闪石颗粒的多角形轮廓说明它在早期曾经历了麻粒岩相变质作用。普通角闪石的化学成分看来是相当均一的(镁质普通角闪石到罕见的阳起石质普通角闪石)。辉石(斜方和单斜辉石)经常呈残留体出现在闪石中,它们的化学成分相对均一,根据16个样品分析所得平均值,单斜辉石=Wo 47En 38Fs 15,为透辉石-次透辉石,根据24个样品分析的平均值,斜方辉石=Wo 1En 53Fs 46,为紫苏辉石。辉石的存在为属早期麻粒岩相变质作用提供了有力证据。

像闪石一样,黑云母可能也是通过麻粒岩相矿物共生组合的分解反应而形成的。偶而可见由斜方辉石部分地转变为黑云母的情况。在此情况下,斜方辉石中星星点点地分布着具强烈多色性的淡红褐色黑云母颗粒和不透明矿物。黑云母有时呈许多片体产出,特别是在C97中,而有时它又完全消失,如C80、C81和C91。黑云母的化学成分非常均一,其SiO₂ 36—37%, Al₂O₃ 16%, TiO₂ 0.3%。这样的化学成分非常类似于产在与麻粒岩伴生的角闪岩中的黑云母(例如坦桑尼亚南部的Furua杂岩^[34])。在后一种情况下,黑云母来源于退变质作用。

在副矿物中,榍石在C1中很多,而在C97中则未见到,在其它情况下,榍石含量随岩石不同而变化。不透明矿物起码有一部分产生于退变质作用。方解石也同样有一部分是产生于退变质作用的,而白云母则很少是产生于退变质的;绿帘石和绿泥石则明显不出现在退变质产物之中。

综上所述,第一类岩石具麻粒岩相变质作用的证据,表现为它们具麻粒变晶结构和保存有共生矿物斜方辉石-单斜辉石-斜长石-石英(±普通角闪石±不透明矿物)的残余。后来发生的退变到角闪岩相的作用以普通角闪石-斜长石-石英-不透明矿物±黑云母±榍石±方解石这个矿物组合为特征,该矿物组合可能已全部替代了原始共生矿物组合。

(2) 没有明显退变质证据的斜长角闪岩(但可能已经历了麻粒岩相变质作用)。

属于这类斜长角闪岩的样品有C17、C93、BJ-82-21、BJ-82-28和BJ-83-3。它们现在保存的矿物组合属典型的角闪岩相。它们究竟是彻底退变质的产物还是从未经历过超出角闪岩相的变质作用,目前还不清楚。这些岩石经常具有很好的叶理,而且它们的共生矿物组合主要是绿色普通角闪石-斜长石-石英-不透明矿物。在不同样品中含有不等量的副矿物,包括榍石、黑云母、磷灰石和锆石,绿帘石仅见于一个样品(BJ-83-3)中,看来,它是和绢云母一起由斜长石的槽化作用而产生的。

虽然没有单矿物化学分析的结果,但矿物光学性质说明,闪石和斜长石(An30—35)以及黑云母在成分上都都很均一,矿物中未见环带。某些样品(如C93)含有较多的短柱状闪石,这可能说明其原岩为堆积辉长岩。非常高的Fe₂O₃(全铁≈16%)、MgO(≈8%)和CaO(≈11%,见表4)含量支持了这一解释。其它样品(如C17)具层状构造,富含斜长石和富含普通角闪石的薄层交替出现,这可能代表了原生岩浆层状构造。

2. 灰色片麻岩

灰色片麻岩一般呈细粒状,并具特征的深色和浅色条带,但未见明显的叶理。BJ-82-22W和BJ-82-22B两个样品分别代表浅色和深色条带。尽管它们的外观不同——这是黑云母分布的结果,但二者却都具有相同的矿物共生组合钾长石-斜长石-石英±黑云母。二

者的成分相当于正长花岗岩和二长花岗岩,但不相当于一般太古宙灰色片麻岩的典型TTG岩石。两个样品中的副矿物都是磷灰石、锆石、不透明矿物和褐帘石。虽然这两个样品有别于典型的太古宙灰色片麻岩,但在本文中仍将其称之为灰色片麻岩,其理由将在后面讨论同位素和地球化学结果时论述。

灰色片麻岩的矿物共生组合可区别为下述的两种。

(1) 残余岩浆矿物共生组合 包括正长石、斜长石(An20)和石英,它们重结晶成集合体平行排列,微具叶理。副矿物相如磷灰石、锆石和褐帘石很可能属于此共生组合。

(2) 变质矿物共生组合 由细粒矿物组成,形成了上述共生组合的基质。这是他形的石英+微斜长石+斜长石(An20)+辉英石的集合体。同时发育的有具强多色性无定向排列的黑云母(棕色到黄色)自形片体。

由于缺乏特征性的矿物共生组合,变质历史不易鉴定。从对围岩变质级别的初步研究来推断,这些灰色片麻岩可能经历了角闪岩相变质作用。但是,还没有任何证据说明在更早期曾遭受过麻粒岩相变质作用。

(二) p - T 条件

对本区麻粒岩相变质作用的 p - T 条件已做过一些研究^[107,129,100,83]。在我们研究的斜长角闪岩样品中,挑出C97用单斜辉石-斜方辉石矿物对测定 p - T 条件。按照Wells(1977)的方法,测得的结果见下表(原始数据见附录2):

	α_{Opx}	α_{Opa}	$X_{\text{Fe}}^{\text{Opx}}$	t (°C)	平均: (°C)
第1对	0.032	0.272	0.462	836	835 ± 25
第2对	0.027	0.264	0.468	810	
第3对	0.037	0.272	0.460	860	

压力条件是不能用单独一种地质压力计测定的。不过,单斜辉石-斜方辉石-斜长石这一矿物共生组合对应于中间麻粒岩相,根据Green和Ringwood(1967)的资料,在温度为810—860°C时,相应的压力大约为7—9 × 10⁵ kPa。最近, Sills等(1986)运用几种地质温度计和地质压力计综合测定了变质作用的温压条件,他们报道了如下的结果: 太平寨地区麻粒岩为7—8 × 10⁵ kPa和大约700°C; 水厂地区的变质沉积岩为5—6.5 × 10⁵ kPa和650—750°C; 曹庄—黄柏峪地区的含石榴石变质沉积岩为4.5—6.0 × 10⁵ kPa和600—650°C。我们注意到,上述C97的温压估计结果与根据同一地区的变质沉积岩所确定的温压条件有明显的差异。变质沉积岩温压的估计值偏低,可能相当于占优势的退变质的角闪岩相变质条件。因此,对于最晚期的热力学平衡而言,由此向南,温压条件明显递降。我们认为,虽然 p - T 状态随地理位置的变化可能说明出露在北边的地壳层位较深,但并不一定意味着北部岩石更老或者说其层位更低。

四、分 析 方 法

测定主要元素和微量元素(REE除外)的有7个C系列的样品(C80和C81除外)是由E. Tual(1983)在法国佩斯特IFREMER(后为CNEXO-COB)的地球化学实验室测定的。所有其它的化学分析和同位素分析都是在法国雷恩大学实验室进行的。除Rb、Sr和REE外,这里所发表的元素丰度均由X荧光光谱(XRF)方法测定。在雷恩大学分析的所有主要元素误差在1—3%范围内,痕量元素测定误差,对含量大于20ppm的为5%,对含量小于20ppm的为10%。在布雷斯特的分析误差参看Bougault(1977)^[17]和Bougault等(1977)^[17]的文章。

REE、Rb和Sr的含量用同位素稀释法测定。分析流程请参阅Jahn等(1980a)的文章。对La和Lu的总分析误差为3%,对其它REE则为2%,Sm-Nd比值的误差小于0.5%,这是通过重复测定和对由丹佛美国地质调查局拉霍亚的Caltech实验室和西德美因茨的麦克斯-普兰克研究所提供的几个标准样溶液对比校正而判定的。Nd和Sr的同位素组成的测定基本上采用Jahn等(1981)的方法,仅稍作改进。Pb的分析方法采用了Vidal和Clauer(1981)的流程。所测Pb同位素比值已用Catanyaro等(1968)所给的NBS(美国国家标准局)981之值修正过。Pb同位素比值的最大误差对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为0.1%,对 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为0.15%;内精度(2 σ)一般优于0.07%。年龄计算的直线的确定采用York(1966)的方法。所有引述的误差置信度均为95%,并且,当MSWD(加权均方差)>1时,还乘上MSWD的平方根。

五、地 质 年 代 学 结 果

(一) Sm-Nd数据

Sm-Nd同位素数据列于表2,并进一步标于等时线图上(图4)。在所有斜长角闪岩的数据点中,看来样品C97明显偏离了回归等时线,且此点的偏离已通过重复分析予以确认,并与黄莹等(1986)发表的数据一致。其它9个采自曹庄—黄柏峪地区的角闪岩样品得出了一条很好的等时线(MSWD=3.18),年龄为 $3470 \pm 107\text{Ma}$,初始值 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (即 I_{Nd})= 0.52807 ± 11 ,若采用Fletcher和Rosman(1982)发表的计算方法,则相当于 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +2.7 \pm 0.6$ 。

图4还表示了采自本区以北约20—30km处水厂矿区(图2)紫苏花岗片麻岩中斜长角闪岩包体的样品(C80、C81、BJ-82-31)的数据,这些数据点非常靠近或正好落到等时线上。如果将这几点也加入计算,共12个点,则可得到稍好些的等时线,年龄值为 $3450 \pm 95\text{Ma}$, $I_{\text{Nd}} = 0.50829 \pm 10$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +2.5 \pm 0.5$ (MSWD=4.0)。在任意一种情况下都可从这些斜长角闪岩样品获得一个约为3500Ma的早太古代年龄。这是迄今为止在中国甚至在整个亚洲所测得的岩石最老年龄值。

$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为正值(+2.7)说明,如果这些岩石真正是同源的,那么它们就是派生自以轻稀土元素(LREE)长期亏损的太古代地幔源。为了比较,图4中还表示了迁西群的等时

表 2 迁安地区岩石的Sm-Nd同位素数据

Table 2 Sm-Nd isotopic data for the rocks from the Qian'an region

样品号	岩石类型	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \pm 2\sigma$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \pm 2\sigma$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t) \pm 2\sigma$	t_{CHUR}^{*4} (Ga)	t_{DM}^{*5} (Ga)
曹庄—黄柏峪地区									
C1	斜长角闪岩	2.624	10.694	0.1483	0.511650	25	-19.3	3.10	3.53
C2	斜长角闪岩	2.638	11.17	0.1428	0.511570	16	-20.9	3.06	3.43
C12	斜长角闪岩	1.466	6.487	0.1366	0.511405	12	-24.1	3.11	3.48
C17	斜长角闪岩	2.474	8.797	0.1700	0.512132	10	-9.9	2.87	3.60
C91	斜长角闪岩	1.314	4.418	0.1798	0.512397	28	-4.7	2.18	3.49
C93	斜长角闪岩	2.667	8.363	0.1930	0.512710	12	+1.4	-2.92	3.43
C97	斜长角闪岩	2.527	10.238	0.1492	0.511588	18	-20.6	3.37	3.72
BJ-82-21	斜长角闪岩	2.599	8.160	0.1925	0.512677	19	+0.7	-1.35	3.56
BJ-82-28	斜长角闪岩	1.955	8.175	0.1446	0.511574	14	-20.8	3.10	3.51
BJ-82-3	斜长角闪岩	2.857	10.287	0.1679	0.512146	26	-9.6	2.60	3.41
BJ-82-22B	花岗闪长岩	9.136	69.85	0.0791	0.510300	10	-45.6	3.01	3.24
BJ-82-22W	花岗闪长岩	2.445	17.351	0.0852	0.510428	15	-43.1	3.00	3.24
水厂—官店子地区 (基性包体)									
C80	基性麻粒岩	1.783	5.348	0.2015	0.512903	20	+5.1	8.16	3.43
C81	基性麻粒岩	1.763	5.035	0.2117	0.513097	24	+8.9	4.59	4.52
BJ-82-31	基性麻粒岩	4.352	14.763	0.1782	0.512307	10	-6.5	2.73	3.69

注: *1 用于同位素年龄计算的误差为0.5%; *2 所有Nd比值用 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 正常化; *3 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) =$

$$\left[\frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - 1}{0.51264} \right] \times 10^4, \text{ 下标 } s = \text{样品 (Sample)}; *4 t_{\text{CHUR}} = \text{假设派生于球粒陨石均一体 (CHUR)}$$

$$\text{的模式年龄} = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}}{(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}} \right] \text{ 这里 } (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) =$$

$$0.51264, (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}) = 0.1967 \lambda (^{147}\text{Sm}) = 0.00654 \text{Ga}^{-1}; *5 t_{\text{DM}} = \text{假设派生于亏损地幔 (DM) 的模式年龄, 等式同上, 但 } (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.51325 (\epsilon_{\text{Nd}} = +12), (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2188.$$

线。太平寨—郭家沟地区的麻粒岩已测得的年龄值大约为2500Ma。由18个数据点得出的Sm-Nd假等时线年龄值为 $2480 \pm 120 \text{Ma}$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +2.7 \pm 1.0^{(71,72)}$ (Jahn和Zhang, 1984)^(71,72)。后面这个数值同样说明迁西麻粒岩的原岩一定也是来自长期亏损的地幔源。

两个灰色片麻岩样品具有非常显著的REE分馏模式, 且重稀土亏损 (见图7c), 这是太古宙TTG成分片麻岩所具有的典型特征^(10,43,44,95,104,82,78)。然而, 它们的主要元素成分却出乎意料地与 SiO_2 为71—73%、 Na_2O 为3.8—3.9%、 K_2O 为4.5—4.7%的花岗岩 (s.s) 相似 (见表4)。

在对Madras (印度马德拉斯) 麻粒岩的研究中Weaver (1980) 发现, 酸性紫苏花岗岩的REE分布模式非常类似于TTG片麻岩; 但是Madras紫苏花岗岩以其高K及Rb显示出与这里的TTG片麻岩有所区别, 这种情况几乎与本文所研究的灰色片麻岩完全相同。Weaver推断, 交代流体的进入强烈影响了碱性元素和矿物组成, 而REE只有微小变化, 因此, 酸性紫苏花岗岩以低钾TTG的化学成分的特有特征。

如同西格陵兰Nok片麻岩一样 (Chadwick, 1985)⁽²⁵⁾, 曹庄—黄柏峪地区的花岗质片

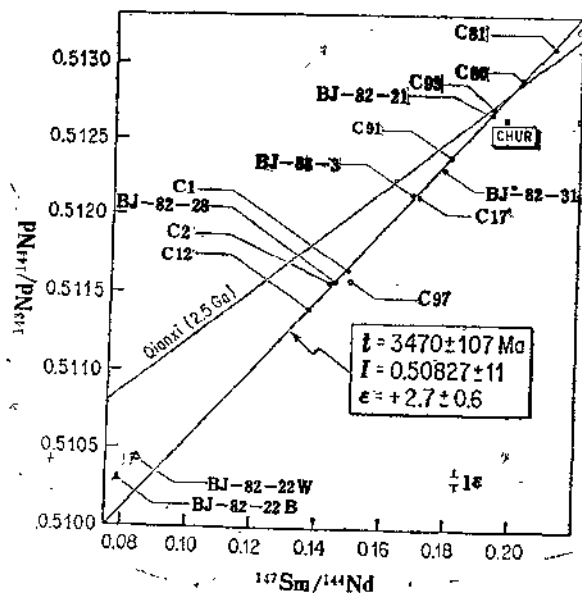


图4 斜长角闪岩包体的Sm-Nd全岩等时线图

图中也表示出两个灰色片麻岩的数据点 (BJ-82-22W, B) 和太平寨地区迁西麻粒岩的等时线 (数据取自Jahn and Zhang, 1984a); 若用曹庄—黄柏峪的9个斜长角闪岩数据点计算, 年龄为3470Ma; 北部的3个斜长角闪岩数据 (C80, C81, BJ-82-31) 也非常接近等时线

Fig. 4 Sm-Nd whole-rock isochron diagram for the amphibolite enclaves

Also shown are two grey gneiss data points (BJ-82-22W, B) and the isochron of the Qianxi granulites from the Taipingzhai area (data from Jahn and Zhang, 1984a). The age of 3470 Ma was calculated with nine data points of the amphibolites from the Caozhuang-Huangbaiyu area only. However, the data of three amphibolite enclaves from the north (C80, C81, BJ-82-31) also lie very close to the isochron

麻岩具多相成分: 灰色片麻岩、红色花岗质片麻岩和伟晶岩。Chadwick (1985) 在描述 Ivisartoq 地区的 Nâk 片麻岩时写道 ([25] P. 227), “在某些露头上, 花岗质岩相和伟晶岩相似乎同化了主岩相 Amitsôq 片麻岩的一些部分, 在某些情况下, 像屏障一样, 其中保留着难于同化的 Ameralik 角闪岩墙残块。” 本文所研究的灰色片麻岩具有花岗岩的主要元素成分和 TTG 的 REE 特征, 这有力地说明, TTG 成分的原岩通过同化混染或晚期花岗岩和伟晶岩的注入已经被改造了。事实上, 只有很少一部分花岗质片麻岩保存了它们的“灰色”特征, 包在外面的片麻岩的主要部分显示出不同程度的淡粉色调, 这说明其曾经受晚期花岗质混染的程度不同。所研究的两个样品可能是我们在野外所见到的本区混染最轻的样品。

这两个样品的 Sm-Nd 同位素数据给出的模式年龄 (t_{DM}) 为 3240 Ma (表 2), 它们的数据点落在由被包裹的斜长角闪岩所确定的等时线上方 (图 4)。然而, 它们与化学成分相同的迁西麻粒岩的灰色片麻岩数据排列有明显的区别。与斜长角闪岩的年龄相比, 3240 Ma 的年龄较为年轻, 这个年龄值可能意味着由年龄为 2500—2600 Ma 的晚期花岗岩所造成的混染的影响^[75]。

从 Sm-Nd 数据和野外地质观察可以得出几个重要结论: (1) 多数斜长角闪岩包体生于距今 3500 Ma 以前, 它们的母岩 (玄武质岩浆) 派生于轻稀土亏损的地幔源; (2) 灰色片麻岩

样品的模式年龄和野外证据说明, 这些片麻岩的原岩必定是在距今3200Ma以前侵位的, 如果将花岗岩的混染作用考虑在内, 则侵位时间可能要早至3500Ma以前; (3) 斜长角闪岩和灰色片麻岩的整个岩石组合可能代表早太古代的双模式岩套, 很可能是在中朝克拉通中保留下来的最老的早太古代地壳的残余; (4) 整个岩石组合(岩套)产生在一个非常局限的地区内(范围大约 $3 \times 2\text{km}$), 可以将其视为被晚太古代花岗岩类吞没了的巨大包体;

(5) 从已有的同位素数据尚无法弄清斜长角闪岩岩块(或包体)与周围灰色片麻岩的侵位顺序。由于晚期花岗质混染作用的影响, 灰色片麻岩的模式年龄较年轻并不一定说明它对斜长角闪岩是侵入关系。另一方面, 孤立的角闪岩岩块可能代表石香肠化岩墙的残块, 就像西格陵兰Ameralik岩墙岩套的残块一样^[25], 它们同样可能代表古老的玄武质地壳或绿岩带的残块, 这与西格陵兰Akilia岩石组合的情况一致^[22, 53, 83]。斜长角闪岩岩块沿走向呈链状产出, 这并不能用来作为破碎岩墙的假说的确切证据^[26]。从整体看, 我们觉得, 部分斜长角闪岩可能是古老的镁铁质地壳的残余体, 一部分斜长角闪岩可能相当于近于同期的岩墙侵入体。

(二) Rb-Sr和普通Pb数据

Rb-Sr和普通Pb同位素组成示于表3和图5、6。在图5上Rb-Sr数据点十分分散, 无法获得等时线。斜长角闪岩的Sr模式年龄(t_M)分布在1900—5300Ma范围内。这样大的变

表3 迁安地区岩石的Rb-Sr和普通Pb同位素数据

Table 3 Rb-Sr and common pb isotopic data for the rocks from the Qian'an region

样品号	岩石类型	$\frac{^{87}\text{Rb}^{*1}}{^{86}\text{Sr}}$	$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$	$\pm 2\sigma$	t_M^{*2} (Ga)	$\frac{^{208}\text{Pb}^{*3}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$
C1	斜长角闪岩	0.7474	0.73815	9	3.48	20.018	16.844	36.187
C2	"	1.157	0.73384	4	1.89	19.040	16.197	38.404
C12	"	0.4775	0.72361	4	3.83	17.195	15.693	42.074
C17	"	0.7323	0.72538	4	2.22	21.224	16.308	38.015
C91	"	0.3639	0.72412	3	4.77	18.416	15.766	57.126
C93	"	0.4246	0.71931	4	2.98	14.557	15.071	34.354
C97	"	0.3515	0.72068	5	4.13	18.388	16.307	36.175
BJ-82-21	"	0.5606	0.72189	9	2.51	19.259	16.330	36.211
BJ-82-28	"	0.7855	0.72089	13	2.49	20.579	16.250	37.236
BJ-88-3	"							
BJ-82-22B	花岗闪长岩	1.631	0.78027	12	3.36			
BJ-82-22W	"	1.363	0.77037	20	3.68			
C80	基性麻粒岩	0.1284	0.70797	20	5.34			
C81	"	0.3504	0.71670	10	3.14			
BJ-82-31	"	1.716	0.77729	9	3.07			
NBS-981	(确定值)					16.937	15.491	36.721

注: *1 Rb/Sr比值误差为1%;

*2 t_M = 假设派生于具有Rb/Sr = 0.03特征的上地幔的模式年龄

$= \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{sample}} - 0.7047}{(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{sample}} - 0.0869} \right]$, 这里 $\lambda(^{87}\text{Rb}) = 0.0142\text{Ga}^{-1}$;

*3 所有测定的Pb同位素比值的分馏影响采用NBS-981Pb标准(Catanzaro et al., 1968)校正。

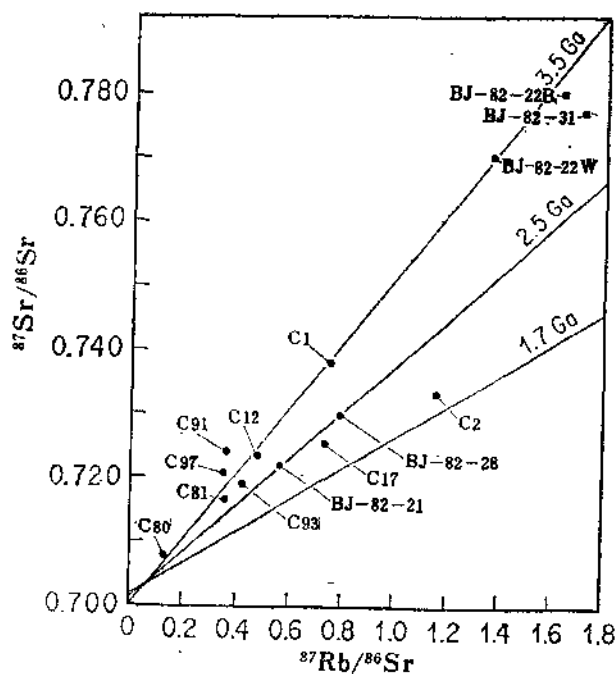


图 5 受到强扰动的同位素体系的Rb-Sr全岩等时线图

Fig. 5 Rb-Sr whole-rock isochron diagram showing the highly disturbed isotopic systems

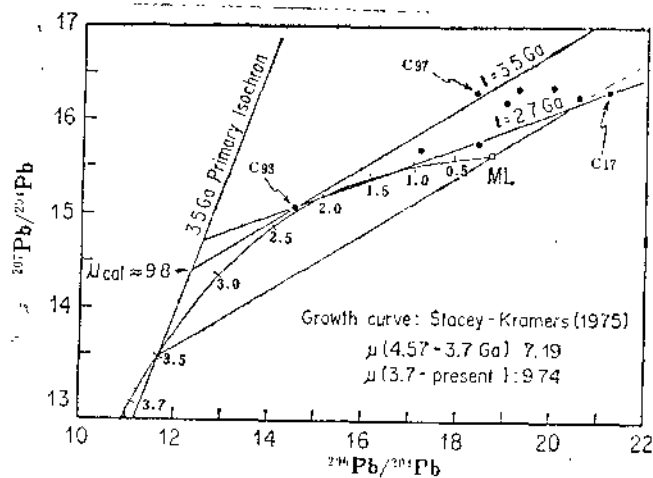


图 6 曹庄—黄柏峪的 9 个斜长角闪岩的普通Pb同位素数据图

Fig. 6 Common Pb isotopic data for 9 amphibolite samples from the Caozhuang-Huang-baiyu area

表 4 主要元素和微量元素数据
Table 4 Major and trace element data

样品号	C1	C2	C12	C17	C91	C93	C97	BJ 82-21	BJ 82-28	BJ 83-3	C80	C81	BJ 82-31	BJ 82-22 B	BJ 82-32W
岩石类型	斜长角闪岩										基性麻粒岩				
SiO ₂ (%)	53.74	54.59	51.72	49.85	48.15	46.27	48.28			50.68	47.29	47.67	50.82	70.53	72.97
Al ₂ O ₃	9.16	9.67	14.20	15.59	15.15	13.00	16.38			14.73	15.53	14.77	14.37	14.79	14.93
Fe ₂ O ₃ (t)	11.43	10.71	10.40	11.93	10.82	15.96	12.61			13.12	13.34	13.49	13.72	2.39	1.24
MnO	0.21	0.22	0.17	0.19	0.18	0.26	0.19			0.16	0.16	0.17	0.22	0.02	0.01
MgO	8.79	7.30	7.19	6.91	7.08	7.87	8.72			6.04	7.56	7.29	7.09	0.63	0.26
CaO	13.55	11.78	9.92	9.02	10.10	10.63	11.05			9.95	11.89	12.21	7.30	1.73	1.70
Na ₂ O	1.00	0.21	2.74	2.49	2.71	1.50	1.02			3.23	2.06	1.76	2.63	3.77	3.90
K ₂ O	0.88	1.98	0.95	1.47	1.48	0.86	0.80			0.85	0.23	0.33	1.00	4.56	4.72
TiO ₂	0.71	0.62	0.93	0.72	0.58	1.07	0.49			0.55	0.76	0.73	1.24	0.27	0.13
P ₂ O ₅	0.18	0.19	0.14	0.15	0.15	0.13	0.31			0.08	0.04	0.02	0.11	0.03	0.01
LOI	6.54	1.92	1.03	1.35	2.11	0.66	0.82			0.07	0.09	0.27	0.32	0.40	0.40
Total	100.19	98.29	98.79	99.57	99.11	98.08	99.47			100.50	98.85	98.80	98.82	99.08	100.27
La (ppm)	8.64	10.03	7.76	6.93	3.49	3.25	10.50	4.40	9.73	9.04	2.61	1.74	10.32	237.9	34.78
Ce	18.31	(22.6)	13.32	(14.60)	7.53	9.86	21.1	10.62	19.03	18.24	7.04	5.54	24.02	237.9	60.3
Nd	10.69	11.17	6.487	8.707	4.418	3.353	10.238	3.150	8.175	10.237	5.342	5.026	14.763	69.89	17.561
Sm	2.624	2.638	1.466	2.474	1.314	2.687	2.527	2.599	1.956	2.857	1.733	1.733	3.352	5.136	2.442
Eu	0.832	0.821	0.446	0.841	0.554	0.999	0.790	0.939	0.708	0.959	0.705	0.710	1.165	0.864	0.725