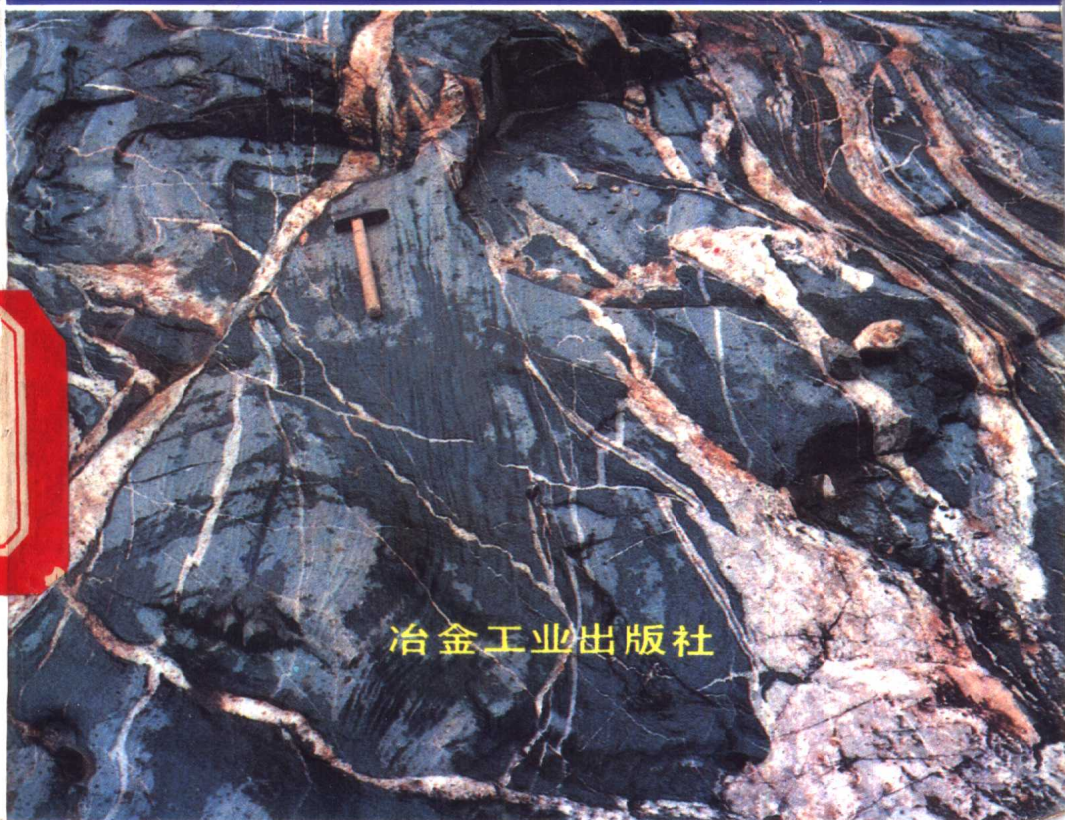


早太古代 地壳形成及演化

——颗粒锆石U-Pb同位素
测年研究与应用

高 劭 译 刘敦一 校



冶金工业出版社

早太古代地壳形成及演化

——颗粒锆石U-Pb同位素测年研究与应用

高 劭 译 刘敦一 校

冶金工业出版社

(京)新登字036号

内 容 简 介

本书遴选出世界范围内近几年发表在近10种杂志中有关最古老地球矿物年龄的单颗粒锆石U-Pb同位素测年的12篇精粹论文,根据其英文版本译出。这些文章不仅介绍了迄今为止最老地球矿物年龄,还阐述了单颗粒锆石U-Pb同位素测年的技术方法、原理,并着重阐明了怎样用这些同位素数据来解决地质学问题,建立地壳形成初期地壳生长、变形和演化史。

本书内容丰富,涉及同位素测试方法、地质年代学、前寒武纪地质学等各个方面。报导了这些领域中的最新技术和最新研究成果。适合于高等地质院校高年级学生、研究生阅读,是从事前寒武纪地质、地质年代学及同位素测试的广大地质工作者的一本十分重要的参考书。

早太古代地壳形成及演化

——颗粒锆石U-Pb同位素测年研究与应用

高 励 译 刘敦一 校

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

河北衡水县第二印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张8.5 字数220千字

1992年5月第一版 1992年5月第一次印刷

印数1~1000册

ISBN 7-5024-1113-5

P·15 定价7.00元

译 者 的 话

近20年来，同位素地质学迅速发展。尤其是1982年以来，康普斯顿 (Compston) 的离子探针质谱用于地质年代学测定，1986年科伯 (Kober) 的单颗粒锆石逐层蒸发技术的使用，使同位素地质学数据不仅为研究早期地壳演化提供了重要线索和依据，还率先涉足“最初的陆壳何时形成？最老的地壳是基性还是酸性？”这个前寒武纪地质研究还未解决的领域，并有可能动摇传统的认识。不断报导和刷新的世界上最老的地球矿物年龄，有必要使地质学家们重新认识地质的乃至地球的发展演化史。

本书共由12篇论文组成，几乎包括了迄今为止所报导的最古老的地球矿物年龄。这些论文的作者都是世界上著名的前寒武纪地质学家、地质年代学家和同位素测年专家。他们从不同角度不仅报导了地球上最古老的矿物年龄，还阐述了单颗粒锆石U-Pb测年的技术方法，并着重阐明了应用同位素数据解决地质问题，从而建立早期地壳的生长、变质变形及构造演化史。每篇文章后附有参考文献，以满足有特别兴趣的地质学家们参考。

无疑，同位素地质学已成为渗透在地学各个领域不可缺少的一门学科，它提供的数据以愈来愈高的精度和准确性成为各专业地质学家解决地质问题的重要基础和依据。

然而新技术的兴起和发展以及所产生的影响势必冲击着、淘汰着长久以来被相应技术条件下产生的旧理论所维系着的“真理”。由此引起的前寒武纪地质研究领域各个方面以及同位素测年技术方法上的论争无异于一场革命，从而加速这些领域的研究进程，并使同位素测年方法更臻完善，使同位素数据解决地质学问题更为准确和可靠。

同位素地质学发展历史正是这样走过来的。1650年大主教乌斯赫 (Ussher) 宣布“世界是公元前4004年创造出来的”，这种

说教严重妨碍早期地质学家达100年之久，19世纪中叶地质学家才开始有把握相信地球确实很古老，1897年凯尔文男爵把地球的年龄限定在2千万年到4千万年，他用“不可辨驳”的计算镇服地质学家长达15年。使得一些地质学家徒劳地加快过去的地质作用以便把地球历史缩短到凯尔文所允许的几千万年之内。法国物理学家贝克勒尔对放射性的发现和后来放射性在地质上的应用，才使地质年代学历史上这一段黑暗时期宣告结束。

然而地质学家很快又抱怨根据放射性进行的年龄测定使地球年龄太长了。霍姆斯1913年发表的地质年表表明太古代片麻岩的年龄为13亿年，但他很遗憾地说：“放射性为我们提供的意想不到的事情未必被人们象应该接受那样被接受下来”。

80年过去了，我们可以告慰霍姆斯，现在人们不再怀疑大于46亿年这个地球的年龄了，本书报导的地球矿物年龄甚至可达43亿年老，地质学家更愿意相信会在今后找到那么老的岩石。

我们小心地选择并翻译了这本书，把它献给中国前寒武纪地质学家、地质年代学家以及同位素测试专家。如果它能为你们提供參考，从而促进我国这些领域的研究进一步深入，那将是译者最大的心愿。

本书翻译过程中蒙武警黄金指挥部蒋志先生给予热情鼓励和支持，谨致谢意。由于译者水平所限，译文不妥之处敬请批评指正。

1991年12月

序

《早太古代地壳形成及演化——颗粒锆石U-Pb同位素测年研究与应用》译文集的译者要我为这个集子作序，曾婉谢再三，因为我并非同位素年代学的内行。浏览译文后，被文章中所述的饶有兴趣的发现，精心的测试，严密的推理所吸引；又发现原作者中有与我国地质学家长期合作的德国专家克劳纳（A. Kröner）教授，勾起了片段回忆；以这些新成果对照我国的同位素年代学的工作，似乎要有感而发。于是，既未能推却，乃从命。

地球的绝对年龄以及年代学研究，是地球科学与其它自然科学（生物演化除外）的根本差别之一。地球究竟有多老，从来不仅是地质学家求索的问题，已构成人类科学自然观的不可少的组成部分。同位素年代学出现之后，才使这个问题找到量化的可靠手段，而且随着技术进步，同位素年代测定的准确度和精度都与日俱增。这本文集，正是这些进展的成果，我相信这些成果，不仅是从事前寒武纪地质、地质年代学及同位素测试的广大地质工作者十分关心，乃至一般人也会十分感兴趣。

我国同位素测年工作已有四十多年的历史了，公布了大批数据，推动了地质学发展。同时，也应看到还有相当一批年龄数据失真，它给后续的研究工作带来麻烦，从这个意义上讲，有这种数据比没有更糟。失真的原因是多方面的：同位素测年方法的发展水平限制；测试手段的误差；测年方法使用条件的偏离；年龄值地质含义的混淆；测年样品地质关系观察错误；所采样品不当等等。上述除头两方面之外，都与运用同位素测年方法的地学家本人的工作有关。因此，应提高质量意识，务求测年各环节都符合国际标准。每公布一项数据都要慎之又慎。

据与克劳纳教授一起工作过的中国地质学家讲，为了采到没

有受到风化的新鲜标本，克劳纳教授不顾酷暑，亲自抡起十多磅大锤采样，一连几十下。再读读本文集中克劳纳的两篇文章，他在定年工作的各环节上认真的态度、严谨的方法，堪称我国地质工作者学习的典范。因此，从这本文集中，不仅学技术、学知识，还应学习原作者的工作态度与方法。

同位素年代学与其它地质科学技术一样，仍在发展中。在学习引进外国科学家的成果的同时，对外国的经验的每一点都应问一个为什么？是否有道理？进而修改、补充乃至创新。这恐怕是我国跻身于世界科学的必由之路。

张 知 非

1991.12

目 录

1. 中国早太古代地壳演化: 迁西杂岩的U-Pb地质年代学……………刘敦一等(1)
2. 西澳大利亚杰克希尔山更为古老的碎屑锆石的证据
……………W. 康普斯顿等(35)
3. 41~42亿年的地球锆石的离子探针分析
……………D. O. 弗劳德等(43)
4. 一个岩石中的4个锆石年龄: 南极恩德比陆地索尼斯
山3930Ma老麻粒岩的历史……………L. P. 布莱克等(49)
5. 西格陵兰南部戈特霍布地区英云闪长质阿米索克片
麻岩中3820Ma的锆石……………P. D. 金尼(75)
6. 用单颗粒锆石数据揭示斯威士兰古老片麻岩中太古
代地壳生长……………A. 克劳纳等(97)
7. 用单颗粒锆石数据揭示中国河南省晚太古代绿岩一
片麻岩地体的年代和构造背景……………A. 克劳纳等(140)
8. 应用灵敏的高质量分辨率的离子探针研究月岩角砾
岩73217锆石的U-Pb地质年代学…W. 康普斯顿等(154)
9. 西格陵兰南部阿梅拉利亚峡湾南早太古代阿克里亚
组合中单颗粒锆石U-Pb年龄模式……………L. 希费特等(177)
10. 北美存在富集的早太古代地壳的钨和铅同位素证
据……………S. A. 鲍林等(193)
11. 以精确的单锆石蒸发数据为依据的南非巴伯顿山地
早太古代花岗-绿岩演化的年代学……………A. 克劳纳等(203)
12. 穿过西格陵兰南部戈特霍布狭湾的晚太古代活动
带; 大陆与大陆碰撞带? …V. R. 麦格雷戈尔等(228)

1. 中国早太古代地壳演化: 迁西 杂岩的U—Pb地质年代学

刘敦一 沈其韩 张宗清 江博明 B. 奥维里
(中国地质科学院地质研究所) (法国雷恩大学)

摘 要

冀东的迁西杂岩(以前的迁西群)是研究中国中朝克拉通太古代地壳演化的关键地区。杂岩的演化包括上壳沉积和岩浆侵入的几个阶段,除几个后期构造侵入,所有的岩石组合变质程度达到高级麻粒岩相和角闪岩相,杂岩的演化始于3.5Ga以前,其跨度大于1Ga。

本文已对迁安的两个地区进行了U—Pb年代学研究,(1)南部的曹庄地区,(2)北部的水厂—羊崖山地区,重要的构造热事件和迁西杂岩的岩浆幕通过从各种岩石类型中挑选的锆石进行U—Pb同位素分析鉴别出来。

中国最老的锆石(3.65~3.67Ga)已经在铬云母石英岩中发现,它们与曹庄地区的3.5Ga (Sm—Nd等时年龄)的角闪岩共生,这表明在迁西杂岩中存在早太古代的硅铝壳。然而,对曹庄地区含有大约3.5Ga的角闪岩包体的灰色片麻岩至今未获得有比2.9Ga更老的年龄,但是一个变粒岩样品给出了最小的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为3.3Ga,这是通过单锆石逐层蒸发分析得到的。这个年龄和角闪岩的3.3Ga Sm—Nd等时年龄表明,上壳岩最早的沉积发生在大约3.5~3.3Ga以前。铬云母石英岩的沉积发生在同一时期或在更早的时期(可达3.6Ga),但是它的准确的地层位置还没有测出,然而非常古老的锆石存在清楚地说明,在中国有至少3.6Ga的硅铝壳存在。

在水厂—羊崖山地区含有大量条带状铁建造的上壳岩系被年

龄为2.96Ga的花岗片麻岩侵入，2.96Ga的年龄是用常规多颗粒锆石方法测得的，紫苏花岗质片麻岩中的两个角闪石包体得到大约3.3Ga的Sm-Nd模式年龄，这显示迁西杂岩的上壳沉积可能已经向北迁移，它们发生在3.3~3.0Ga的时期内。

除上壳岩外，迁西杂岩是以多相似花岗状侵入为特征，除在曹庄地区混染的灰色片麻岩（Sm-Nd TDM = 3.2~3.3Ga）和在羊崖山地区大约3Ga花岗质片麻岩外，大多数似花岗状侵入体具有晚太古代年龄。2.7~2.5Ga期间不容置疑地记录了中朝克拉通演化中最重要的热事件，本文锆石年代学研究和文献中可利用的年龄资料，证明了中国太古代地壳发育在太古代结束时达到顶点。

引 言

中朝克拉通是亚洲最老的结晶基底之一，它是由各种变质级和不同成因类型的太古代和早元古代片麻岩组成（Hung, 1978, 1984; Ma和Wu 1981; Yang等人, 1986）。在冀东出露有岩性复杂的太古代麻粒岩和角闪岩相片麻岩，我国地质学家将它们划归为迁西群（图1-1）（如程裕淇等人, 1982; 孙大中等人, 1984; 孙大中、陆松年, 1985; 钱祥麟等人, 1985）。已有的地质年代学研究已经揭示了迁西群自形成经过多期变质，经历了大于10亿年的时间间隔，其跨度从35亿年~22亿年（江博明、张宗清, 1984; 江博明等人, 1987; 刘敦一等人, 1985）。因此冀东地区是了解中国早期大陆演化的一个关键地区，因为这个太古代地体记录了漫长的演化史。我们认为它不再适合使用“迁西群”这个名称，对一个群来说，通常意味着一个明确的有限时间间隔的地层单元，自然不可有超过10亿年的跨度。因而在标示的研究区内将使用“迁西杂岩”这个术语。

为了阐明这个地区的杂岩历史，对所有重要事件进行准确的年代测定是必须的。以前的地质年代学研究主要是根据Rb-Sr全岩和Sm-Nd技术（Compston等人, 1983; Jaha和Zhang, 1984;

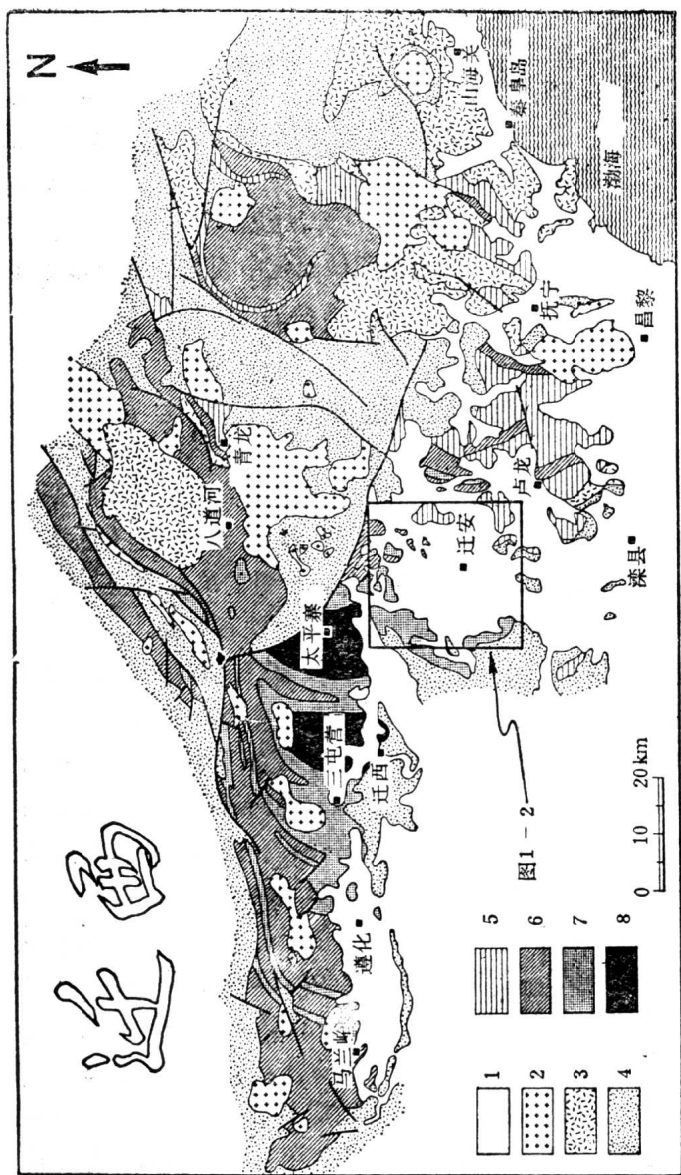


图 1-1 冀东地区地质略图 (据孙大中、陆松年, 1985)。该图仅用来表示太古代岩石的一般分布和研究区位置, 但我们不赞成其地层划分, 我们正在绘制新的迁西杂岩地质图。

Wang等人, 1985; Huang等人, 1986; Jahn等人, 1987; Qiao等人, 1987)。他们分析的样品中不可避免地囊括了那些违背“必须是同源和相同初始值”这一基本假设的样品。本文的工作用更为准确的锆石U-Pb测定技术, 有助于建立迁西杂岩发育的详细时间框架。我们将首先描述迁西杂岩的两个剖面的主要岩石类型和岩性层序, 然后按大致地质年代学顺序对这两个剖面提出新的锆石年龄数据, 这些数据连同其它年龄资料(Sm-Nd等时线, 出版的和未出版的)一起将被用做限定中朝克拉通的地壳演化。

地 质 概 况

冀东迁西群的太古代岩石主要由角闪岩相到麻粒岩相的高级变质岩组成。在滦河北部的太平寨-郭家沟地区(滦河, 图1-1), 岩性主要以二辉麻粒岩为主, 少量的单斜辉石-角闪石-斜长麻粒岩、单斜辉石斜长麻粒岩和磁铁石英岩。

滦河南部和西部, 迁安地区的太古代岩石出露在一个上升的穹隆和它的西部边缘及褶皱带中(图1-2)(Qian等人, 1985; 也见本期Wang等人)。大量的条带状铁建造(BIF)与含黑云母辉石麻粒岩、酸性变质火山岩、少量的角闪岩和超基性岩石共同产出, 它们依次被紫苏花岗质片麻岩侵入。最近的年代学研究已经揭示了有3.5亿年老的角闪岩存在(Huang等人, 1986; 江博明等人, 1987)。它们比出露在太平寨-郭家沟地区的辉石麻粒岩(大约25亿年老)老得多(Pidgeon, 1980; Compston等人, 1983; 江博明和张宗清1984; 刘敦一等人, 1985)。我们通常解释为: 辉石麻粒岩代表一个晚期的侵入, 它侵入到迁西杂岩的基底片麻岩中, 而不是像从前许多地质学家认为的那样: 由于它们是高级变质相, 应该是最下部的地层单元。有关这个观点的特殊理由是, 我们目前锆石工作已经更为直接指出迁安地区的地体可能更老。

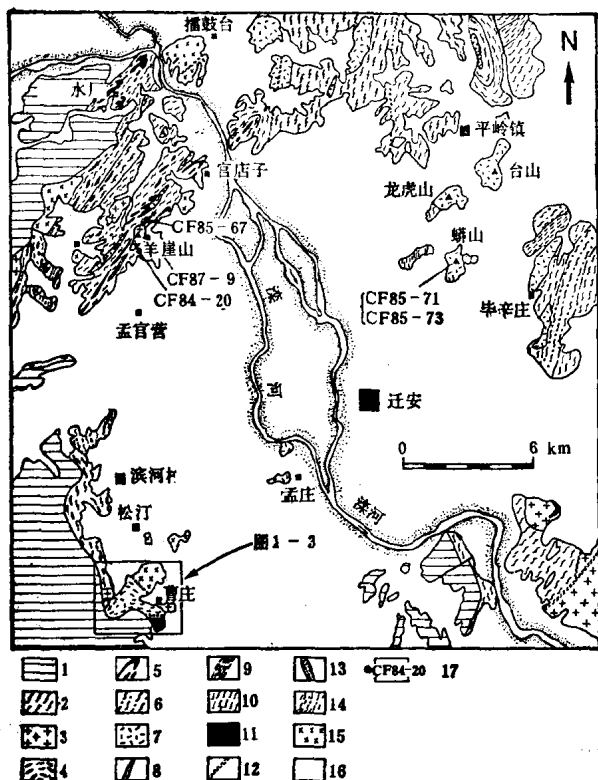


图 1-2 研究区迁安地区地质略图及采样位置

1—元古代；2—紫苏片麻岩；3—花岗岩；4—灰片麻岩；
5—条带状铁建造；6—石榴石片麻岩；7—花岗闪长岩；
8—细粒花岗岩；9—角闪岩；10—混合岩化片麻岩；
11—变粒岩；12—剪切带；13—二辉麻粒岩；14—黑云
母斜长片麻岩；15—紫苏花岗岩；16—第三系覆盖；
17—采样点及样号

本研究所用的所有样品主要采自两个地区：北部的羊崖山和南部的曹庄地区（图1-3）。

在曹庄地区（图1-3）太古代岩石由上壳岩、正片麻岩和晚期花岗质侵入体组成。角闪岩一般多呈上地壳连续的部分产出，或

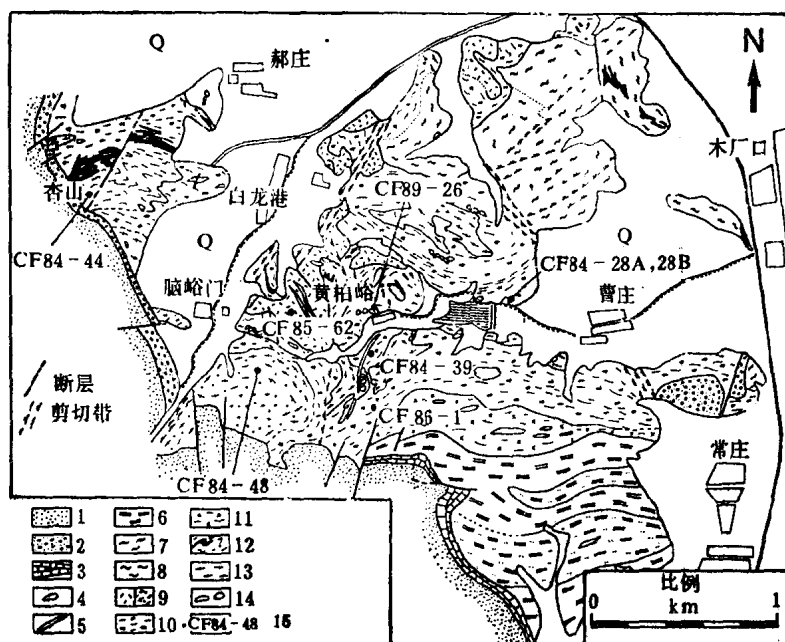


图 1-3 曹庄黄柏峪地区地质略图(据Chen, 1988)及采样位置

- | | | | |
|---------|-------------|---------------|-------|
| 1—砂岩 | 6—变粒岩 | 11—黑云母花岗岩 | } 太古代 |
| 2—麻岩 | 7—麻粒岩(含变粒岩) | 12—BIF + 变沉积岩 | |
| 3—石灰岩 | 8—紫苏花岗岩 | 13—灰片麻岩 | |
| 4—超基性岩石 | 9—石英二长花岗闪长岩 | 14—角闪岩 | |
| 5—基性岩墙 | 10—红色花岗岩 | 15—采样点及样品号 | |

以单独角闪岩体产出。此外还以典型的高级太古代片麻岩地体的包体存在 (Bridgwater等人, 1974, 1976; Chadwick, 1981, 1985; Anhaeusser, 1983), 它们35亿年的Sm-Nd等时线年龄是迄今为止在中国获得的最老的年龄 (Huang 等人, 1986; 江博明 等人, 1987)。在黄柏峪村的主要露头, 角闪岩呈包体或残块镶嵌在已被晚期富钾花岗质岩浆进一步侵入的混合质灰色片麻岩中。在有些地方, 角闪岩地块似乎可沿走向追索, 或被浅灰色片麻岩插入。这个角闪岩—灰色片麻岩组合或许是一个更老的双峰式岩套的残余, 现在分散在较年轻的花岗质地块中。灰色片麻岩已取得32~33亿年的Sm-Nd模式年龄 (TDM) (江博明 等

人, 1987)。野外和地球化学研究表明, 原来的片麻岩的闪长质成分已经被同化、混染, 同时由于晚期花岗岩和伟晶岩脉侵入而受到不同程度的改变。然而, 角闪岩包体似乎具有残存的和它们原始的难熔元素的化学和同位素特征。像REE仍保留其未经改变的状态, 这种状况至少是在包体内部存在。

走向北西的变沉积层产出在黄柏峪村的中南部, 它们包括钙-硅酸盐、铬云母石英岩、榴云岩和条带状铁建造(BIF)。细粒钙-硅酸盐岩与凝灰成因的角闪岩呈互层。这些变沉积物与角闪岩岩层一起被花岗质片麻岩侵入。野外考察这些变沉积物与大约35亿年的角闪岩包体的关系表明它们同时发生了沉积。

在黄柏峪村西边, 上壳岩被多种侵入岩所侵入。这些侵入岩包括富钾粉红色花岗岩、二长花岗岩、含大斑晶钾长石的花岗闪长斑岩、伟晶岩和元古代辉长岩脉。辉长岩脉的准确年龄还不知道, 但是推测它们跨越太古-元古的界限。

在迁安地区东部花岗闪长质片麻岩以深成岩体产出在蟒山、塔山、龙虎山、毕新庄和孟庄地区(图1-2)。它们侵入到迁西杂岩的角闪岩和麻粒岩中。已经认识到这些深成岩体的片麻岩化与区域片麻岩穹窿形成期间的褶皱和上升作用有关(Qian等人, 1987)。

在羊崖山地区(图1-2), 众多的插入的条带状铁建造与长石麻粒岩被紫苏花岗岩和整合的富钾花岗岩席侵入。而且在淡灰色到粉红色的花岗闪长质片麻岩中也发现大量的角闪岩包体。

分 析 技 术

锆石分析在北京中国地质科学院地质研究所同位素地质年代学实验室完成。锆石用标准程序选取, 包括摇床、磁选和重液分离技术, 所有的大小颗粒和磁性组分最后通过手选达到纯净。下面的锆石溶解、U-Pb提取和提纯的化学过程是根据克鲁夫(Krogh)的方法(1973), U和Pb同位素比值用具有可调的多收集器及电子倍加器的Finaigan MAT-261质谱计测定。全流

程Pb和U本底分别是0.6ng和0.02ng, 通过Pb标准NBS982的重复分析。用每a、m、u0.1%分馏来修正Pb同位素比值。用NBS 981标准测定 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值的重现性优于0.02%, 数据回归和年龄计算用一个修改的约克(York)(1969)和路德维格(Ludwig)(1980)的数据处理方法。报导的年龄值和误差被断定为最能代表它们本身的意义。引用的所有误差在95%置信水平下。目前 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值被假定为137.88, 所用衰变常数对 ^{238}U 来说是 0.155125Ga^{-1} , 对 ^{235}U 来说是 0.98485Ga^{-1} 。

除了锆石分离的常规分析方法外, 科伯(Kober)(1987)的单锆石逐级蒸发技术也被用于本研究中。锆石晶体被包裹在一个已经去气处理的铼带中(指蒸发带), 并与另一个铼带(指电离带)成平行的位置安装。在蒸发过程开始时, 首先对电离和蒸发铼带进行短时间加热, 以去掉通常位于锆石表面的普通铅。进一步锆石逐级蒸发、沉积和测定铅同位素, 这些基本上同科伯(1987)所描述的情形一样。在沉积阶段之间电离带被高温去气清洗, 然后这个清洗过的带被用做下次Pb的沉积。在这个去气期间, 为了避免反向沉积, 在清洗电离带时, 蒸发带的温度提高到1000℃, Pb离子束用可放大3000倍的电子倍增器收集。在测定Pb同位素比值时, 已经检测和适当修正了每a.m.u大约0.3%的分馏系数(刘敦一和赵敦敏, 1988)。在每一个单锆石测定前后频繁地检测这个系数, 以避免出现过大的误差。然后, 为计算 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄的统计平均值, 从放射成因Pb含量中扣除非常低的普通Pb含量。在所有的情况下, 对年龄结果来说, 修正是可以忽略的。

结 果

一、曹庄—黄柏峪地区的早太古代岩浆作用

1. 花岗片麻岩(CF84-39)

最初认为这个样品代表英云闪长质灰色片麻岩, 是从黄柏峪附近的主要露头采集的。该片麻岩含有35亿年的角闪岩包体, 同时到处被晚太古代花岗岩侵入。这个样品中的锆石由自形、柱状

和等轴的粉红色、黄色和乳白色颗粒组成，锆石端部圆状，而且也鉴别出具有双晶，包括膝状双晶和集合体（图 1-4）。这些特征表明锆石具有多种成因。以前的作者解释平行生长（包括集合体）代表一个火成成因（Jocelyn和Pidgeon, 1974）。这个样品中所发现的集合体表明至少其中一部分锆石是火成成因。

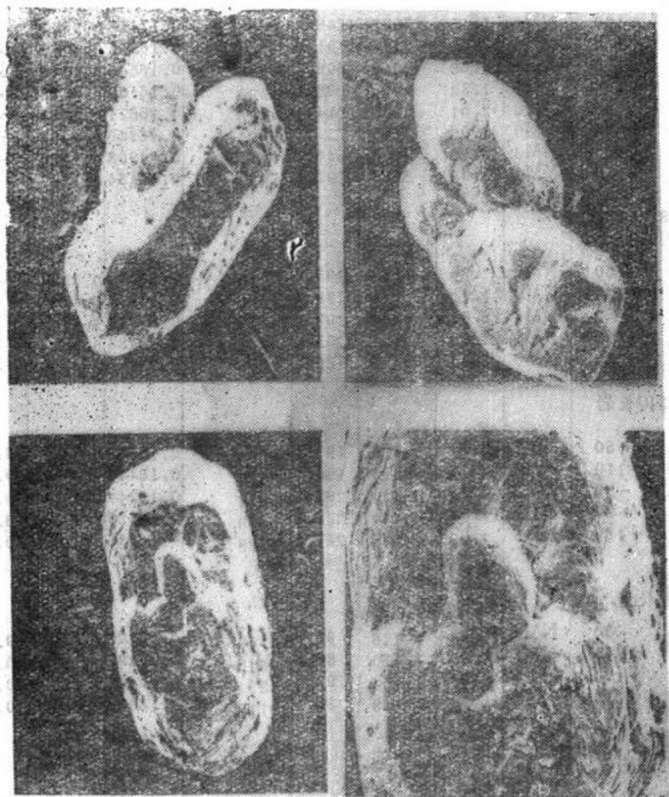


图 1-4 扫描电镜照片，迁安地区黄柏峪CF84-39花岗岩样品中锆石的平行生长、集合体和肘形晶体（大锆石晶体大小大约为 $100\sim150\mu\text{m}$ ）。

由于颗粒太小，不可能根据锆石的颜色和形态分离锆石。8个组分的分析结果表明， Pb/U 同位素比值分布范围很大（表 1-1），数据点非常离散，并且非常不一致（图 1-5），这