

地质矿产部“八五”
学科生长点课题

前寒武纪大陆地壳演化示踪

陆松年 杨春亮 蒋明媚 李怀坤 李惠民 等著

地质出版社

地质矿产部“八五”学科生长点课题

前寒武纪大陆地壳演化示踪

陆松年 杨春亮 蒋明媚 李怀坤 李惠民 等著

地质矿产部天津地质矿产研究所

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系地质矿产部“八五”学科生长点“前寒武纪大陆地壳演化路径示踪”课题研究成果。著者在分析现代各种测年方法适用性的基础上,适时地指出了 U-Pb 法和等时线法所面临的问题;介绍了利用多种方法鉴别岩浆成因锆石和变质重结晶锆石的标志及合理判别等时线年龄的理论基础、判别参数、步骤和结果。书中利用我国大量 Sm-Nd 和铅同位素资料,探索了我国前寒武纪陆块和活动带基底壳-幔分离和地壳活化再造的标志、形成峰期和特点。在划分同位素地球化学块的基础上,讨论了塔里木、华北、扬子陆块和南华、秦岭、兴安活动带的大地构造特性和相互关系。书中还介绍了利用稀土元素、 $p-T-t$ 轨迹研究陆壳演化的方法和实例,以及同位素地球化学库的建立与开发应用的特色。最后应用各种示踪方法,据所获得的资料讨论了华北前寒武纪大陆地壳生长模式。本书内容丰富,方法新颖,理论与实践相结合,阐明了许多地质问题。

此书可供从事地球科学工作的专业人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

前寒武纪大陆地壳演化示踪/陆松年等著.-北京:地质出版社,1996.6

ISBN 7-116-02043-8

I. 前… II. 陆… III. 前寒武纪-地壳运动-示踪法-研究 IV. P534.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 08746 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:肖叶 王璞

*

北京印刷学院印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 图版:2 页 字数:237000

1996 年 6 月北京第一版·1996 年 6 月北京第一次印刷

印数:1—500 册 定价:15.80 元

ISBN 7 116-02043-8

P·1542

前言

本书是地质矿产部“八五”学科生长点“前寒武纪大陆地壳演化路径示踪”课题的研究成果。课题研究工作始于1992年下半年,1995年底结束。

大陆地壳演化是大陆地壳在地质历史发展过程中物质运动和变化的过程,它所包含的内容极其广泛。我们的研究侧重在地壳演化过程中物质变化的过程,将研究内容限定在前寒武纪大陆地壳演化过程中壳-幔物质的分离和壳内活化再造,主要是通过同位素年代学、地球化学和变质作用 p - T - t 轨迹等研究方法,力图勾画出大陆地壳演化的踪迹。为了对大陆地壳演化有一个完整的思路,按照地壳物质的来源和形成方式,可将地壳分为四个端元类型(图1)。

初始地壳:由地幔物质直接形成的地壳称为初始地壳,形成初始地壳的事件称为造壳事件。初始地壳是地幔物质部分熔融的直接产物,所以构成初始地壳的物质主要是镁铁质和超镁铁质岩石。

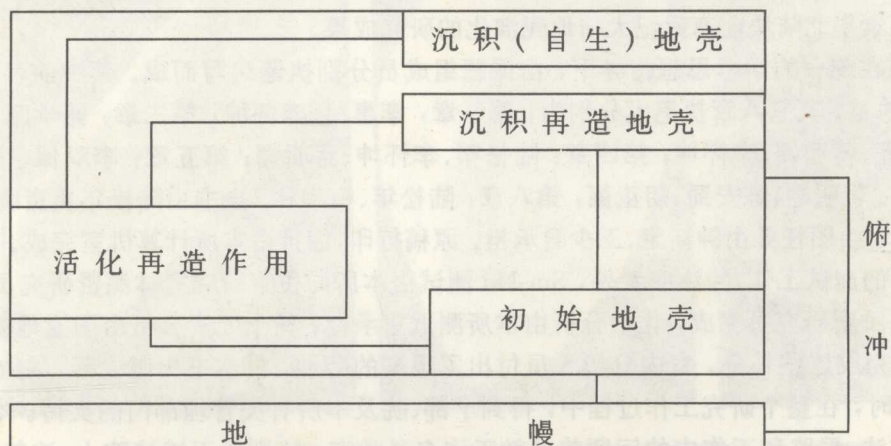


图1 大陆地壳的四种类型及其相互关系

活化再造地壳:由先存地壳的深熔作用形成的新地壳称为活化再造地壳,这一事件称为活化再造事件。它是壳内物质循环和再分配的结果。活化再造地壳既可由先存的初始地壳经过部分熔融而成,也可由先存活化再造地壳或沉积再造地壳深熔而成,其主要岩类是花岗岩岩石。

沉积再造地壳:由于先存地壳的隆升、剥蚀和沉积作用而形成的新地壳称为沉积再造地壳。显然,在沉积再造地壳形成过程中,水圈、气圈和生物圈的表生地质作用有着重要影响。

沉积(自生)地壳:由化学或生物化学作用形成的沉积地壳,如放射虫硅质岩、生物碳酸盐岩和蒸发岩等。这类地壳与深部作用的成因联系不密切,是在表生作用下形成的自生地壳。

除上述四种大陆地壳端元类型外,壳-幔或壳-壳混合形成的地壳也占有重要位置。我们的研究任务就是要通过各种有效的方法,鉴别不同的地壳类型,揭示大陆地壳随着时间的推移相互转

换的过程,揭示大陆地壳演化的阶段性、继承性和不同地质构造单元的特点,并进而探讨区域成矿作用与地壳演化的内在联系。

前寒武纪为全球最重要的造壳时期。虽然国外地质学家对前寒武纪太古宙和元古宙地壳增生速率的估计不尽相同(McCulloh 等, 1978; Reymer 等, 1987), 但基本一致的认识是现代地壳的规模在前寒武纪已基本形成。显生宙只是在构造特别活跃的地带有少量的造壳, 而主要的地质作用为壳内物质的活化再造。

目前, 国内外研究大陆地壳演化的一般趋势是充分利用新技术、新方法讨论大地构造学等经典地质学范畴的科学问题, 并取得了令人瞩目的进展。其中, 加拿大地质学家霍夫曼(P. F. Hoffman, 1988, 1989)的研究成果较有代表性。他利用同位素地质学、岩石地层学、变质地质学和地球物理资料讨论了北美克拉通的前寒武纪构造格架和演化。我国地质学家对我国东部, 主要是华北克拉通前寒武纪地壳演化问题也做了详细工作, 并进行了有益的探讨。

我们的研究工作, 在充分吸收和借鉴前人研究经验和成果的基础上, 根据研究者的实践、地质认识和基本思路, 利用公开发表的大量原始资料, 进行资料的二次开发, 并着重在华北陆块北缘、山东、豫陕一带开展了野外调查, 分析了必要的样品, 对这些地区的前寒武纪大陆地壳演化进行了示踪研究。作为学科生长点, 课题研究工作更偏重于方法学的分析和应用。因此, 本书前七章着重阐述了同位素年代学研究过程中锆石成因矿物学、等时线年龄合理性判别的研究成果, 以及 Sm-Nd 同位素、铅同位素、稀土元素、 p - T - t 轨迹、数据库等方法所获得的进展, 而第八章则是应用上述方法探索华北陆块前寒武纪大陆地壳演化的研究成果。

本书系在统一的学术思想指导下, 由课题组成员分别执笔编写而成。其中前言、结语由陆松年、杨春亮执笔; 其它八章执笔人分别为, 第一章: 李惠民、李怀坤; 第二章: 鲍学昭; 第三章: 陆松年、杨春亮、蒋明媚、李怀坤; 第四章: 陆松年、李怀坤、蒋明媚; 第五章: 李双保; 第六章: 梅华林; 第七章: 蒋明媚、陈安蜀、胡正德; 第八章: 陆松年、梅华林。全书由陆松年负责统编, 杨春亮、李怀坤协助。绘图任务由钟新宝、王少君承担。原稿打印、编排由本所计算机室完成。

本书中的测试工作, 除注明者外, Sm-Nd 测试由本所同位素研究室林源贤研究员完成, U-Pb 测年由李惠民副研究员完成, 化学分析由本所测试室承担, 稀土元素分析由国家地质实验测试中心完成。为完成这些任务, 室内分析人员付出了艰辛的劳动, 借本书出版之际, 向他们表示诚挚的谢意。同时, 在整个研究工作过程中, 得到了部、院及本所有关管理部门的支持。本课题研究人员就研究方法、思路和工作中的问题曾求教于许多科学家, 特别是王鸿祯院士、沈其韩院士、李廷栋院士、白瑾、沈保丰、刘敦一、张寿广等研究员给予了指导和帮助, 作者一并致以谢意。最后, 要特别感谢孙培基高级工程师和朱明玉研究员为本书的顺利完成和出版所给予的无私帮助。

目 录

前 言

第一章 大陆地壳演化时间维的确定及存在问题	(1)
第一节 U-Pb 同位素测年法	(1)
一、U-Pb 测年法比较	(2)
二、U-Pb 年龄数据的地质解释	(3)
三、U-Pb 测年方法的改进	(4)
第二节 等时线法	(6)
第三节 多种同位素测年体系的比较和综合运用	(6)
第二章 测年过程中的锆石成因矿物学研究	(8)
第一节 锆石成因矿物学研究方法概述	(8)
第二节 锆石成因矿物学研究方法分述	(10)
一、显微镜下锆石特征研究	(10)
二、锆石的扫描电镜研究	(10)
三、锆石成分分带及成因标型意义	(11)
四、锆石结构标型研究	(13)
五、岩浆结晶锆石和变质重结晶锆石的鉴别标志	(17)
第三节 测年工作中锆石成因矿物学的应用	(18)
一、对中国最古老锆石的成因研究	(18)
二、麻粒岩相岩石中锆石成因判别	(19)
第三章 Sm-Nd 同位素地质年代学和地球化学	(23)
第一节 Sm-Nd 同位素参数的计算及其地质意义	(23)
一、Sm/Nd 值和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值	(23)
二、单个样品的钐同位素初始比值 I_{Nd}	(25)
三、模式年龄 T_{DM} 和 T_{CHUR}	(25)
四、样品偏离球粒陨石钐同位素比值程度的 ϵ_{Nd} 值	(25)
五、样品偏离球粒陨石钐同位素程度的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值	(25)
第二节 Sm-Nd 等时线年龄合理性判别	(26)
一、判别参数	(28)
二、判别方法和步骤	(29)
第三节 判别实例分析	(31)
一、辽宁清原太古宙清原群斜长角闪岩 Sm-Nd 等时线判别	(31)
二、太行山阜平群高级变质岩 Sm-Nd 等时线判别	(31)
三、内蒙古兴和桑干杂岩基性麻粒岩包体 Sm-Nd 等时线年龄研究	(33)
四、Sm-Nd 混合等时线实例分析	(35)
五、利用同位素参数检查人为等时线的实例	(35)

第四节 等时线年龄的地质意义	(38)
一、Sm-Nd 等时线年龄大于 U-Pb 年龄	(38)
二、Sm-Nd 等时线年龄接近 U-Pb 年龄	(39)
三、Sm-Nd 等时线年龄小于 U-Pb 年龄	(39)
第五节 中国前寒武纪大陆地壳演化的 Sm-Nd 同位素示踪信息	(40)
一、理论前提	(41)
二、中国最古老的大陆地壳信息	(43)
三、几个前寒武纪陆块的 Sm-Nd 同位素特征及铍同位素地球化学分区的讨论	(47)
四、太古宙铍同位素地球化学块	(50)
五、元古宙铍同位素地球化学块	(53)
第四章 铅同位素地球化学示踪	(57)
第一节 理论基础	(58)
第二节 太古宙铅同位素特征	(59)
第三节 元古宙铅同位素特征	(60)
一、东升庙铅-锌矿	(61)
二、高板河铅-锌矿	(61)
三、关门山铅-锌矿	(61)
第四节 显生宙铅同位素特征	(63)
一、乌拉山金矿	(63)
二、河北张家口小营盘金矿	(64)
三、冀东金厂峪金矿	(64)
四、吉林夹皮沟金矿	(66)
五、胶东玲珑金矿	(66)
六、河南小秦岭金矿	(66)
第五节 铅同位素地球化学构造分区讨论	(67)
一、铅同位素地球化学块	(68)
二、华南铅同位素地球化学块的进一步划分	(70)
第五章 地壳演化过程中稀土元素的示踪	(72)
第一节 稀土元素地球化学应用的理论基础和方法	(72)
一、稀土元素在矿物中的分配系数(K_d)	(72)
二、岩石成因的定量模拟	(73)
三、蚀变交代作用对岩石稀土元素丰度和分配的影响	(76)
第二节 初始地壳的稀土元素特征	(76)
一、华北陆块太古宙初始地壳的时空演化及稀土元素特征	(77)
二、前寒武纪初始地壳演化小结	(81)
第三节 活化再造地壳	(84)
一、辽北-吉南太古宙高级变质区和花岗岩-绿岩区	(84)
二、冀东太古宙变质基底中的花岗质岩石	(87)
第六章 变质压力-温度-时间(P - T - t)轨迹研究的基本方法和构造模型解释	(89)
第一节 变质 p - T - t 轨迹岩石学研究方法	(89)
一、利用绝对温压计推测 p - T 轨迹的方法	(89)

二、石榴子石环带测定 p - T - t 轨迹方法	(90)
三、实例分析	(91)
四、 p - T - t 轨迹时限的确定	(92)
第二节 变质 p - T - t 轨迹的构造模型	(93)
一、逆冲构造体系的 p - T - t 轨迹	(93)
二、拉张构造体系的 p - T - t 轨迹	(94)
三、深部地壳变质的 p - T - t 轨迹	(94)
第三节 利用 p - T - t 轨迹建立地壳剖面	(96)
第七章 中国前寒武纪同位素年代学和地球化学数据库	(98)
第一节 概 述	(98)
一、建库目的	(98)
二、数据库系统开发和运行的环境	(98)
第二节 数据库文件说明	(99)
一、基础资料库	(99)
二、字典库	(103)
第三节 系统结构与主要模块功能介绍	(105)
一、基础资料库管理子系统	(105)
二、字典库管理子系统	(109)
第四节 数据库系统在本专题研究进程中已发挥的作用	(109)
一、对 Sm-Nd 资料的分析处理	(109)
二、对铅同位素资料的分析处理	(110)
三、ZQTDXT 的特点	(110)
第八章 华北陆块前寒武纪大陆地壳演化示踪	(113)
第一节 晋冀蒙块体的太古宙变质基底	(113)
一、地层系统	(113)
二、造壳事件	(114)
三、地壳的活化再造	(120)
四、前寒武纪大陆地壳演化示踪	(122)
第二节 冀东块体的太古宙地壳演化	(124)
一、太古宙岩石热-构造演化	(124)
二、太古宙地壳演化的同位素年代及地球化学证据	(127)
第三节 鲁东岩块前寒武纪演化示踪	(129)
一、前寒武纪热-构造事件的同位素年代学和地球化学证据	(129)
二、玲珑和牟平-乳山花岗岩演化的新资料	(132)
三、胶南变质基底的同位素示踪信息	(134)
四、热-构造演化讨论	(136)
第四节 华北前寒武纪大陆地壳生长模式讨论	(137)
一、微陆核的形成	(138)
二、垂向增生	(138)
三、侧向增生	(140)
四、块体拼贴	(140)
五、元古宙增生	(140)

结 语	(142)
参考文献	(146)
图版说明及图版	(155)

第一章 大陆地壳演化时间维的确定及存在问题

“地质学是一门时间起特别关键作用的学科。对时间的这种依赖性给地质现象增添了一个独一无二的维”^①。这个时间维在研究大陆地壳演化时起着非常重要的作用。没有时间维的确定,就无法讨论演化问题,更无法研究前寒武纪大陆地壳演化。

在研究大陆地壳演化时间维的过程中,同位素地质年代学起着特别重要的作用。尤其是因为前寒武纪缺少足够的化石资料,在前寒武纪大陆地壳演化时间维的确定中,同位素地质年代学起着举足轻重的作用。因此我们讨论大陆地壳演化时间维的确定及存在问题,主要就是讨论大陆地壳演化研究中同位素地质年代学的应用问题。

近年来,同位素地质年代学新理论和新技术方法的迅速发展,为大陆地壳演化时间维的确定提供了许多可以选择的新方法,为解决过去无法解决的许多问题提供了新途径,有力地促进了大陆地壳演化研究的发展。同位素地质年代学新理论、新技术、新方法的迅速发展,一方面为大陆地壳演化研究带来了更加丰富的地质年代学信息。另一方面,如何对这些过去难以获得的、丰富的地质年代学信息进行合理的地质解释并加以充分利用,便成为大陆地壳演化研究中面临的新矛盾和新问题。这些新矛盾和新问题的解决,有赖于同位素地质年代学的进一步发展,这对同位素地质年代学的发展具有极大的促进作用。本文对近年来广泛应用的一些同位素地质年代学新技术方法,在大陆地壳演化时间维确定中的重要作用及其应用中存在的主要问题,作一些比较深入地研究和讨论。

第一节 U-Pb 同位素测年法

利用 U-Pb 同位素体系进行地质年龄测定,具有利用其他同位素体系无法获得的优越之处。其中最为突出的是铀有两种放射性同位素²³⁸U和²³⁵U,分别衰变成两种铅同位素子体²⁰⁶Pb和²⁰⁷Pb。通过对各种 U-Pb 同位素的测定,对一个测年对象可以同时获得三个年龄值(²⁰⁶Pb/²³⁸U、²⁰⁷Pb/²³⁵U和²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb表面年龄)。这三个年龄值的差异可指示在同位素平衡之后,体系受到干扰的程度,从而可以进行体系内部的自检和校正。这使得 U-Pb 同位素测年法成为同位素地质年代学中最为准确可靠的方法之一,是确定前寒武纪大陆地壳演化时间维的最主要方法。尽管有人尝试过用全岩进行 U-Pb 同位素年龄测定,但迄今为止, U-Pb 同位素测年法主要还是应用于测定锆石、斜锆石、金红石、磷灰石等各种矿物的地质年龄,其中又以锆石作为最主要的测定对象。锆石的普遍应用是因为这种矿物的普遍存在、具有良好的抗化学侵蚀和抗机械破坏性,及其合适的 U、Pb 含量。通过对锆石及其他

① 美国国家研究委员会编(刘树臣等译),固体地球科学与社会,中国地质矿产信息研究院印,1993。

各种矿物的 U-Pb 同位素年龄测定, U-Pb 同位素测年法已经广泛地应用于测定火山作用、岩浆侵入和变质变形以及其他重大地质事件的年龄。

近年来, U-Pb 同位素测定技术的迅速发展, 已使得矿物 U-Pb 同位素测年法的灵敏度和分辨率以及精确度和准确度都有了很大提高。例如利用高灵敏度、高分辨率离子探针质谱, 可以对单颗粒锆石晶体直径约为 $30\mu\text{m}$ 的微区里的 U-Pb 同位素进行快速测定, 从而获得单颗粒锆石晶体不同部位的 U-Pb 同位素年龄(W. Compston 等, 1984)。这就为同一样品中具有复杂成因和不同年龄的锆石的准确测年开辟了新的途径。又如用改进的单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法测定技术, 可以使年龄测定的精度优于 0.05% , 即测定老于 2000 Ma 的锆石或斜锆石的年龄, 其 95% 置信度的实验误差仅为 $\pm 1\text{—}\pm 2\text{ Ma}$ (T. E. Krogh, 1993)。这就使得分辨时间间隔很小的两次地质事件成为可能。也就是说, 极大地提高了 U-Pb 同位素测年法的时间分辨率。随着 U-Pb 同位素测年法的改进, 其在大陆地壳演化时间维的确定中所起的作用越来越大, 并且使得大陆地壳演化研究在近年来取得了许多突破性的进展。如用高灵敏度高分辨率离子探针质谱, 测得西澳大利亚杰克山变沉积岩中的碎屑锆石年龄为 4.3 Ga (W. Compston 等, 1986), 这是地球上已知的最古老的矿物年龄。这一年龄的确定使得对大陆地壳生成和演化历史的认识向前推进了一大步。目前我国除了还没有高灵敏度高分辨率离子探针质谱仪器、因而还无法在国内开展高灵敏度高分辨率离子探针质谱测定工作外, 其他各种 U-Pb 同位素测年方法, 如微量矿物的 U-Pb 同位素测年法, 单颗粒锆石 Pb-Pb 蒸发法和单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释测定法等, 均已开展工作, 并在近年来获得了大量地质年龄数据, 取得了许多突出成果。例如刘敦一等人首先利用锆石 Pb-Pb 蒸发法发现了在我国辽宁、冀东等地存在 38 亿多年的锆石, 并用高灵敏度高分辨率离子探针质谱测定作了验证(Liu D. Y. 等, 1992)。这一发现为在我国寻找和发现更古老的始太古代大陆地壳提供了重要线索, 对全球大陆地壳的生成和演化研究无疑也具有十分重要的意义。笔者等利用单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法测年新技术, 在准确测定了我国蓟县长城系大红峪组火山岩生成年龄(陆松年等, 1991)的基础上, 又准确测定了北京平谷长城系团山子组火山岩的生成年龄(李怀坤等, 1995), 为准确确定作为我国中上元古界标准剖面的蓟县剖面的重要地层形成时代打下了坚实的基础。

在本次研究工作中, 我们对目前国内应用的 U-Pb 同位素测年的各种技术方法作了对比研究, 对一些比较重要的地质体用不同的 U-Pb 同位素测年技术方法进行测定并对测定结果进行比较, 对国内尚未开展工作的一些 U-Pb 同位素测年新技术进行了初步的探索, 获得了许多新的认识和新的成果。现从以下几个方面作进一步的讨论。

一、U-Pb 测年法比较

本世纪 80 年代还在国内外广泛应用的微量锆石 U-Pb 同位素测年法, 由于单颗粒锆石 Pb-Pb 蒸发法和单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释测定法在国内的推广应用而遇到严重挑战。当一个岩石样品只含有单一成因和同一年龄的锆石群时, 用微量锆石 U-Pb 同位素测年法获得的年龄值与用单颗粒锆石测年法获得的年龄值比较相近。但是当在一个岩石样品中含有多种成因和不同年龄的锆石时, 由于微量锆石 U-Pb 同位素测年法需要将许多颗锆石放在一起测定, 获得的是多颗锆石的混合年龄。而不同成因和不同年龄的锆石晶体有时在形态特征上很难区别, 因此用微量锆石 U-Pb 同位素测年法获得的多颗锆石的混合年龄, 地质意义往往不够明确, 甚至毫无地质意义。越来越多的研究成果表明, 前寒武纪岩石中的锆

石群很少是单一成因的。成因和年龄都很复杂的锆石群的存在,常常使常规的微量锆石 U-Pb 同位素测年法给出的年龄值没有明确的地质意义,难以获得应用。而单颗粒锆石测年法则往往会给出比较准确可靠而且有明确地质意义的年龄值。

以蓟县长城系大红峪组火山岩的锆石 U-Pb 同位素测年情况为例,应用常规的微量锆石 U-Pb 同位素测年法获得的下交点年龄为 1487 ± 28 Ma, 上交点年龄为 3530 ± 216 Ma (见图 1—1a)。最初曾根据已有的资料,将下交点年龄 1487 ± 28 Ma 解释为大红峪组地层的生成时代(陆松年等, 1989)。但不久用同一样品中的锆石进行单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法测年时,获得了两组差距明显的年龄。其中一组自形程度较好的锆石给出了 1625 ± 6 Ma 的谐和年龄,而另一组晶形较差的浑圆状锆石的年龄接近 2400 Ma (见图 1—1b)(陆松年等, 1991)。根据锆石的形态特征和地质情况分析, 1625 ± 6 Ma 解释为大红峪组地层的生成时代,而浑圆状锆石是变质基底中的锆石,是大红峪组火山岩中的捕获晶锆石。由于在样品中这部分捕获晶锆石占有相当大的比例,而在显微镜下又很难将这些锆石与岩浆结晶锆石完全分开,因此微量锆石 U-Pb 同位素测年法给出的混合年龄没有地质意义,而单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释测年法则给出了比较准确可靠而且具有明确地质意义的锆石年龄。由于前寒武纪岩石中所含的锆石往往有比较复杂的成因和年龄,岩石生成和早期演化的年代学信息往往仅仅保存在少数锆石晶体或锆石晶体内部的特定微区内。因此在利用锆石 U-Pb 同位素测年法确定前寒武纪大陆地壳演化的时间维时,常规的微量锆石 U-Pb 同位素测年法的作用是很有限的。对已报导的微量锆石 U-Pb 同位素年龄应采取比较谨慎的态度,重要年龄值应采用单颗粒锆石及其微区的 U-Pb 同位素测年法予以验证。

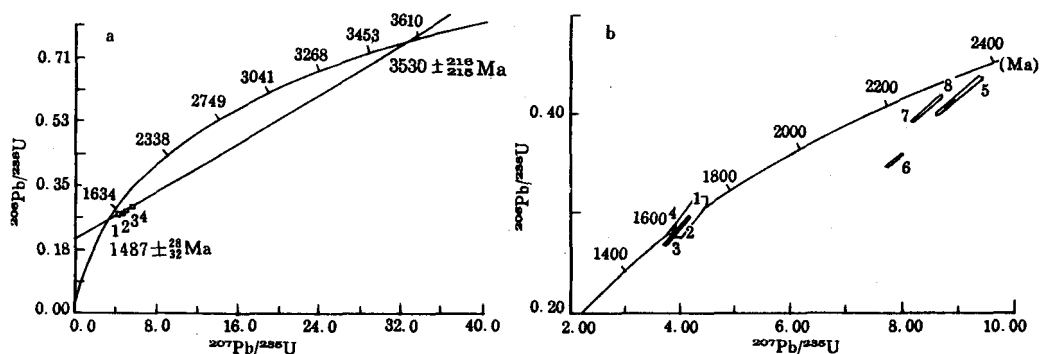


图 1—1 大红峪组火山岩锆石 U-Pb 年龄
a—微量锆石法, b—单颗粒锆石 U-Pb 稀释法

二、U-Pb 年龄数据的地质解释

U-Pb 同位素测年法应用中的一个很重要的问题是对所获得的矿物 U-Pb 同位素年龄的地质意义如何进行合理的解释。当样品中只含有单一成因和同一年龄的锆石时,无论是用常规的微量锆石 U-Pb 同位素测年法还是用单颗粒锆石测年法测定,只能获得单一的年龄信息,其地质解释相对比较简单。但在前寒武纪岩石中往往含有成因和年龄都很复杂的锆石群,当用精确的单颗粒锆石测年法去测定时,往往能获得很丰富的年龄信息。这些丰富的年龄信息的获得,一方面为深入研究前寒武纪大陆地壳的生成和演化创造了条件,另

一方面又增加了对所获得的年龄进行合理的地质解释的难度。如何解释所获得的多种成因锆石的不同年龄的地质意义,往往成为各种不同观点争论的焦点。例如我国最老的残留地壳——辽宁鞍山白家坟子始太古代花岗岩中,既有 3800 Ma 的锆石,又有 3200—3300 Ma 的锆石,还有更年轻的锆石。哪一种锆石的年龄代表花岗岩的生成时代,哪一种锆石是花岗岩中的残留的继承性锆石或捕获晶锆石,哪一种锆石是岩石生成后后期地质作用的产物,一直存在着分歧和争论。对于这一类含有复杂成因和多种年龄锆石的样品,除了根据野外地质观察资料和有关的岩石学、岩石地球化学及其他同位素体系的有关资料对所获得的锆石年龄进行地质解释外,还迫切需要对锆石形态学和成因矿物学进行更深入的研究,从中获取有助于对锆石年龄的地质意义进行合理解释的宝贵信息。目前这方面的研究工作显然远远落后于锆石的测年工作。近年来的研究表明,作为 U-Pb 同位素测年主要对象的锆石,其成因远比过去许多人想象的要复杂得多。除了在火成岩岩浆冷却时会产生岩浆结晶锆石外,在岩石生成后遭受强烈变质作用时,有时也会产生变质成因锆石。甚至在未发生变质作用的岩石中,有时由于较低温度的热液作用的影响,也会产生热液成因锆石。通过对不同成因锆石的特征的研究,找出能够区别这些不同成因锆石的特征,以及这些特征与锆石成因的关系,显然对于合理地解释不同的锆石年龄的地质意义是很有帮助的。在本次研究工作中,我们对此作了一些探索,获得了一些很有意义的成果。我们将在第二章中对此问题作更深入的论述。

三、U-Pb 测年方法的改进

目前 U-Pb 同位素测年的主要技术方法有常规的微量矿物 U-Pb 同位素测年法、单颗粒锆石 Pb-Pb 蒸发法、单颗粒矿物 U-Pb 同位素稀释测定法、高灵敏度高分辨率离子探针质谱法,此外还有目前正在探索、但尚未得到广泛应用的激光探针质谱法和 $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测定法等。上述各种技术方法各有优缺点,各种方法都有一定的适用范围和适用对象。根据不同的测年对象和测年工作的要求,选择不同的测年方法是很重要的。同时,根据大陆地壳演化时间维的确定中不断提出的新问题和新要求,不断改进和完善已有的技术方法和探索新的技术方法也是很重要的。在本项目的研究工作中,根据目前我国的实际情况和我国大陆地壳演化研究的需要,我们着重对单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释测定法进行了较深入的研究和改进。这种方法是在常规的微量锆石 U-Pb 同位素稀释测定法的基础上发展起来的。国外通常利用 $^{205}\text{Pb}-^{235}\text{U}$ 混合稀释剂。我们在国内较缺乏昂贵的 ^{205}Pb 稀释剂的情况下,采用了 $^{208}\text{Pb}-^{235}\text{U}$ 混合稀释剂。经过对测定条件的反复试验,获得了较好的效果。采用经过我们改进的实验方法流程,既可以用 $^{205}\text{Pb}-^{235}\text{U}$ 混合稀释剂,也可以用 $^{208}\text{Pb}-^{235}\text{U}$ 混合稀释剂对单颗粒锆石进行 U-Pb 同位素稀释法测年。这样改进的优点在于,与常规的微量矿物 U-Pb 同位素稀释测年法相比,它可以对单颗粒锆石进行精确的 U-Pb 同位素年龄测定,避免了当所测定的锆石具有复杂成因和多种年龄的晶体时,用常规的微量锆石 U-Pb 同位素测年法仅获得混合年龄的缺点。同时,由于所用于测定的样品量很少,这种方法也可适用于锆石含量很少的镁铁质岩石的 U-Pb 同位素测年。与单颗粒锆石 Pb-Pb 蒸发法相比,经过我们改进的单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释测年法不但适用于锆石样品,也适用于其他多种矿物样品;不但适用于年龄较老的锆石样品,也适用于较年轻的锆石样品,而且测定精度较高。近年来,我们应用改进的单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释测年法测定了我国国内大量的锆石样品,获得了较好的效果,为我国大陆地壳演化研究和地球科学其他方面的研究

提供了大量的极有价值的地质年代学数据。但是,对于一些比较复杂的样品,如对于有较老的内核和较年轻的外壳的成因复杂的锆石样品,用这一方法仍然难以同时获得较老的内核和较年轻的外壳的准确年龄。

除了对已有的 U-Pb 同位素测年方法的改进外,我们近来对目前国内还没有人研究,在国外也只有少数实验室的少数人在探索的 $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测定法进行了初步的探索。这一方法的原理是:在平衡的由 ^{238}U 向 ^{206}Pb 放射性衰变的过程中,中间子体同位素 ^{210}Pb 与母体同位素 ^{238}U 有一固定的比值关系($^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}=5\times 10^{-9}$)。而天然的铀同位素之间也有一固定的比值关系($^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.88$)。基于这些固定比值关系,只要测定 $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的值,即可算出 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的值。这样就把计算 U-Pb 年龄时本来需要测定的子体同位素与其母体同位素的比值转化为只需测定子体同位素的比值。这一方法的优点是:不用加稀释剂,不用测定 U 和 Pb 的元素含量,也不用测定 Pb/U 的值,只测定铅同位素比值,结果不仅可以获得 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,也可以通过计算得到 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄。这有利于简化 U-Pb 同位素年龄的测定程序,有利于单颗粒矿物微区的 U-Pb 同位素年龄测定,具有广阔的应用前景。但是目前在实际应用中,因为 ^{210}Pb 的半衰期很短(22.3 年),其丰度很低,导致 $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值的测定不精确。这一方法目前在国外也只是处于探索阶段(J. I. Wendt 等, 1991; J. I. Wendt 等, 1992)。我们近来从改进同位素测定的质谱仪的测量条件和改变样品的化学处理方法两个方面入手,对这一方法的基本测定条件作了一些初步探索,并尝试用这一方法对一些锆石样品作了测定,获得了初步的有意义的成果。其中主要的有如下几个方面:

(1)为了提高铅同位素测定的灵敏度,从而提高测定 $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值的精确度,我们对用于铅同位素质谱测定的发射剂的化学组成对铅同位素测定灵敏度的影响进行了试验。在对多种化学成分不同的发射剂的性能作全面比较的基础上,筛选出若干种性能较好的发射剂。与过去常用的磷酸-硅胶发射剂相比,新的发射剂使得铅同位素的质谱测定灵敏度提高

表 1—1 某些锆石样品的 $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 法测年结果与经典的 U-Pb 同位素稀释法测年结果的比较

样 号		同 位 素 原 子 比 率						表面年龄(Ma)		
		$\frac{^{206}\text{Pb}^{\text{①}}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}^{\text{①}}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}^{\text{①}}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{210}\text{Pb}^{\text{①}}}{^{208}\text{Pb}}$	$\frac{^{210}\text{Pb}^{\text{②}}}{^{206}\text{Pb}} \rightarrow \frac{^{238}\text{U}^{\text{③}}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{238}\text{U}^{\text{③}}}{^{206}\text{Pb}}$	$t_{\text{U-Pb}}^{\text{②}}$	$t_{\text{U-Pb}}^{\text{③}}$	
8409—1667	1	22544	0.1075	0.1403	$(1.13\pm 0.03)\times 10^{-7}$	$(1.59\pm 0.05)\times 10^{-8}$	3.18	3.187	1780 ± 60	1760 ± 8
	2	2668	0.1084	0.1802	$(1.15\pm 0.03)\times 10^{-7}$	$(1.58\pm 0.05)\times 10^{-8}$	3.17	3.170	1768 ± 60	1768 ± 17
	3	19092	0.1075	0.1275	$(1.14\pm 0.03)\times 10^{-7}$	$(1.59\pm 0.05)\times 10^{-8}$	3.18	3.187	1780 ± 60	1759 ± 17
S9308	1	640	0.0900	0.1409	$(1.24\pm 0.02)\times 10^{-6}$	$(1.75\pm 0.03)\times 10^{-7}$	35.0	35.04	182 ± 4	181.4 ± 1.1
	2	577	0.0706	0.1430	$(1.36\pm 0.03)\times 10^{-6}$	$(1.95\pm 0.04)\times 10^{-7}$	39.0	39.11	163 ± 4	162.8 ± 1.5
	3	96	0.0490	0.1181	$(1.85\pm 0.04)\times 10^{-6}$	$(2.19\pm 0.04)\times 10^{-7}$	43.8	43.92	146 ± 3	145.2 ± 1.0

①为实验测量值;②为计算值;其中, $t_{\text{U-Pb}}$ 为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值;③为同位素稀释法测定值;其中, $t_{\text{U-Pb}}$ 为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值。

了一个数量级以上。这就极大地提高了 ^{210}Pb 同位素测定的准确性,从而明显改善 $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值测定的精确度。

(2)在利用 VG354 型质谱仪进行铅同位素测定时,对质谱仪的测量条件进行了优化。利用高灵敏度的 Daly 检测器对丰度最低的 ^{210}Pb 同位素进行测量,并适当提高光电倍增器的放大倍数。这使得铅同位素的质谱测定灵敏度至少提高了两个数量级以上。同时,为了准确测定丰度相差很大的 ^{210}Pb 和 ^{206}Pb 同位素的比值,我们利用质谱仪和计算机相结合的方式灵活地变换数据采集方式,提高同位素比值测量的精度,也获得了一定的效果。

(3)对几个铀含量较高的锆石样品进行了 $^{210}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测定法测年。所得结果与用传统的 U-Pb 同位素稀释法测年结果基本一致。两种测年方法结果的比较见表 1-1。

第二节 等时线法

等时线法应用较多的有 Rb-Sr 法、Pb-Pb 法和 Sm-Nd 法等。各种等时线法对样品有一个共同的要求:同一等时线的样品必须是同时同源的,并且在成岩或热-构造事件使同位素系统均一化以后处于封闭状态。全岩样品有时很难严格符合这一要求,因此有人采用从单一岩石样品中分离出来的不同矿物作矿物等时线。本世纪 80 年代以前,国内外都有很多用等时线法测年的资料报道。90 年代初以来,国外报导用等时线法测年的资料比较少了,但国内仍有不少用等时线法测年的文献报导。用等时线法测年,特别是利用矿物的 Sm-Nd 等时线测年,有不少成功的例子。有人用 Pb-Pb 等时线法测定某些碳酸盐岩的年龄,在某些地区也获得过成功(B. M. Jahn 等, 1990)。这对前寒武纪沉积岩或变质沉积岩的准确测年这一长期未能解决的难题,是很有意义的探索。但是,用等时线法测年,无论在理论上还是在实际应用技术上,都存在一些需要深入研究的有争议的问题。例如用 Pb-Pb 等时线直接测定前寒武纪沉积或变质沉积岩的年龄,在某些地区应用是成功的,但在另一些地区应用却并不成功。其原因目前从理论上还难以说明。从国内外已发表的文献看,有许多等时线的样品并不符合要求。其中有些等时线属于人为的或混合等时线,其年龄值往往没有明确的地质意义。为了获得准确合理的等时线年龄,必须把握好采样、测试、数据判别、计算等环节。在第三章中,我们将对 Sm-Nd 等时线合理性的判别及其应用的有关问题进行深入的讨论。其中讨论的对 Sm-Nd 等时线判别的方法和程序同样可用来进行对 Rb-Sr 和 Pb-Pb 等时线的判别。经过合理性判别,删除不合理样品的数据点后,所获得的等时线才更符合理论上对等时线的要求。但值得注意的是,即便经过严格处理获得的等时线年龄,由于等时线方法自身的限制,其地质意义有时也是不够明确的,常常难以满足大陆地壳演化研究对时间维确定的要求。许多等时线年龄的地质意义的合理解释,需要借助于其他同位素测年体系的研究以及区域地质学、岩石学、地球化学等资料的研究。

第三节 多种同位素测年体系的比较和综合运用

在大陆地壳演化时间维的确定中,对一些比较复杂和重要的地质年代学问题的研究,仅仅依靠和采用一种同位素体系作为测年手段是不明智的。利用多种同位素测年体系去研究,对多种同位素测年研究的结果进行比较并加以综合运用,有可能获得比较全面的准确

可靠的年龄信息,并且能够对这些年龄信息进行合理的地质解释。

首先,这样做是因为每一种同位素测年体系都有一定的适用范围和适用对象,而且每一种同位素测年体系都会出现“失效”的例外情况(L. P. Black, 1988)。虽然 Rb-Sr 系统和 Sm-Nd 系统“失效”的情况要多一些,但 U-Pb 系统“失效”的情况也是有的。为了避免这种“失效”导致的错误,对一些复杂的和重要的地质年代学问题,采用多种同位素体系的多种测年手段去研究,确实是明智的做法。

其次,如第二节所述,等时线年龄的地质意义有时不够明确,需要结合 U-Pb 年龄或 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年龄来进行解释。而有时候当一个样品中含有复杂成因和多种年龄的锆石,用单颗粒锆石 U-Pb 测年法获得多个不同的锆石 U-Pb 同位素年龄时,也需要结合等时线年龄或 ^{39}Ar - ^{40}Ar 年龄来对不同的锆石 U-Pb 年龄进行合理的地质解释。我们以最常用的 Sm-Nd 等时线年龄与锆石 U-Pb 年龄的比较为例加以说明。锆石 U-Pb 同位素年龄与全岩或矿物 Sm-Nd 等时线年龄通常被认为是比较准确可靠的。两者通常有如下几种关系:

$$1. t_{\text{Sm-Nd}} \approx T_{\text{DM}} \approx t_{\text{U-Pb}}$$

即 Sm-Nd 等时线年龄 $t_{\text{Sm-Nd}}$ 、钨模式年龄 T_{DM} 与锆石 U-Pb 同位素年龄 $t_{\text{U-Pb}}$ 非常接近。这种情况通常代表一次壳-幔分离事件,所获得的年龄值代表所测定样品的生成时代。

$$2. T_{\text{DM}} > \text{或} \gg t_{\text{Sm-Nd}} \approx t_{\text{U-Pb}}$$

即 Sm-Nd 等时线年龄与锆石 U-Pb 同位素年龄非常接近,而钨模式年龄大于或远远大于 Sm-Nd 等时线年龄和锆石 U-Pb 同位素年龄。在这种情况下,Sm-Nd 等时线年龄和锆石 U-Pb 同位素年龄代表所测样品的生成年龄,而钨模式年龄代表“源岩”的形成年龄。对基性-超基性岩来说, T_{DM} 偏老表明有更古老的基性-超基性地壳的存在,包括板底垫托物。而对酸性岩来说,除说明有先存的基性地壳外(部分熔融),还说明可能有先存的酸性地壳存在。

$$3. T_{\text{DM}} \approx t_{\text{Sm-Nd}} > t_{\text{U-Pb}}$$

即钨模式年龄接近 Sm-Nd 等时线年龄,而两者均大于锆石 U-Pb 同位素年龄。在这种情况下,对年龄的解释需特别小心。可能的解释为:① $t_{\text{U-Pb}}$ 代表样品的生成年龄,而 T_{DM} 和 $t_{\text{Sm-Nd}}$ 代表“源岩”的年代信息,即样品在地壳中滞留的时间;② $t_{\text{U-Pb}}$ 代表样品的变质年龄,即所测锆石为变质成因锆石,而 T_{DM} 和 $t_{\text{Sm-Nd}}$ 则代表岩石的生成年龄。在高级变质区常会出现这种情况。

其它同位素测年体系之间的比较,还会有不同的情况。总之,通过多种同位素测年体系的比较和综合运用,有可能获得更加全面的准确可靠的年龄信息,避免片面性和可能发生的错误。

第二章 测年过程中的锆石成因矿物学研究^①

锆石是 U-Pb 测年方法中的主要测年对象。应用锆石 U-Pb 法测年获得了众多有用的年龄数据,提供了地史中,特别是前寒武纪时期地层或热-构造事件的时代信息。但正如前文所述,随着研究工作的深入,发现样品中的锆石群常具有不同时代和不同成因,不但微量锆石 U-Pb 法可能给出混合的地质年代信息,即使应用单颗粒锆石测年,其数据的地质意义也可能具有多解性。未变质样品中锆石可能包括捕获晶、样品形成时结晶的锆石和样品形成后热事件形成的叠加锆石。此时,锆石的外形尚可提供鉴别捕获晶和结晶锆石的证据。前者往往具有浑圆状外形,而后者常为自形好的晶体。但对于前寒武纪变质岩样品来说,就我们的经验,依靠锆石外形已不能区别捕获锆石和样品形成时的锆石。有时在一个样品中,不同外形的锆石经测定具有相同的年龄;而相似外形的锆石反具有不同时代的年龄信息。对于前寒武纪变质岩样品来说,区分岩浆结晶锆石和变质重结晶锆石是最为重要的。因为前者反映的是变质前岩石形成时的年龄,而后者则反映变质作用的年代信息。如果没有锆石成因学的证据,则 U-Pb 年龄的地质解释,必然带有主观性和随意性。这项研究工作近年来已受到国内外地质学家的高度重视。如 H. H. Bostock 等(1994)利用扫描电镜对岩浆锆石、变质锆石等进行的微观结构研究, A. P. C. Abraham 等(1994)对不同成因锆石开展的地球化学研究都获得了重要进展。我们的专项研究工作,基本上是和国际同行同步开展的。研究工作紧紧围绕岩浆结晶锆石和变质重结晶锆石的鉴别标志,通过显微镜、扫描电镜、锆石成分分带的探针研究及锆石结构标型等多种方法的研究工作,积累了宝贵的资料,并为上述两种不同成因锆石提出了初步的鉴别标志。无疑,这项研究工作仍将继续深入进行,但当前的研究成果已为今后的深入研究奠定了良好的科学基础。

第一节 锆石成因矿物学研究方法概述

锆石标准化学式为 $ZrSiO_4$, 属于岛状硅酸盐类,在其晶体结构中 $[SiO_4]$ 四面体与 $[ZrO_6]$ 三角十二面体紧密相连,使它的结构相当稳定,硬度达 7.5—8,具有抗腐蚀、不易被后期地质作用破坏的特点,同时锆石的形成条件很宽,可以形成于岩浆作用过程、变质作用过程(甘晓春, 1993; 汪相等, 1992)及热液作用过程中(李惠民等, 1993),即可产于各类岩浆岩,从低、中级至高级变质岩和天体陨石中。这说明其结晶时温度(t)、压力(p)、组分(c)条件很宽,前人(汪相, 1993)的工作显示锆石可以存在广泛的类质同象替代,其中 Si 可以被 P、Al 等替代, Zr 则可以被 Hf、U、Th、V 等多种离子替代,并发现从基性岩、中性岩至酸性岩中锆石成分存在规律变化,如 ZrO_2/HfO_2 值由大至小的变化就是一例(武汉地质学院矿物教研室, 1979),这些特点说明在地质体的每一次地质作用如岩石形成时的岩

① 该项研究工作主要得到国家自然科学基金会的资助,课题编号 49202021。负责人鲍学昭,参加者陆松年、李惠民、李怀坤、吴昌华、钟长汀、甘晓春、段旭川等。