

# 地球科学中时间段的定年问题 ——一种不同于地球化学的地球物理定年方法

刘德良

(中国科学技术大学地球和空间科学学院,安徽合肥 230026)

**摘要:**地质事件时间结构的度量有两种方法,一是测算事件发生时间点的距今时间,另一是测算事件过程的时间段的持续时间。作为时间点的测量方法,地球化学的同位素地质年代学经过近百年的发展,在国际上已很成熟(其误差精度一般为百万年量级),但这一方法不能测算地质事件持续时间。测定地质事件始末的时间间隔,则需要地球物理的构造地质年代学研究,这是目前国际前沿研究的一个新领域。经过努力,现今探索了一种测定地质事件时限年龄的方法(一般误差精度为万年量级),其工作程序主要分为四个阶段:构造地质工作——观测构造改造序次强度;构造物理工作——测算差应力和应变速率,这是地球物理定年的基本环节;构造化学工作——求算构造变形地质体的体积因子;构造数学工作——求算构造形成时限。我们已将该方法应用于中国东部和西南韧性剪切带的研究,获得了一定的成果。但此方法还不成熟,若要使之成为尚在创建中的构造地质年代学的有效理论,还需要进一步完善,本文探讨了构造地质年代学的发展前景,指出了当前地质定年工作存在的局限性。

**关键词:**地质事件;时间段;构造地质年代学;时间点;同位素地质年代学

**中图分类号:**P545 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.0253-2778.2011.01.001

专家  
论坛

## Duration measurement in geological sciences — A geophysical approach

LIU Deliang

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** There are two ways of measuring the time structure of geological events: the time-point at which

**收稿日期:**2010-11-01; **修回日期:**2010-12-28

**基金项目:**国家自然科学基金(40972134)资助。

**作者简介:**刘德良,男,1938年生,教授,博士生导师。南京大学大地构造专业毕业,1961年分配到中国地质科学院转调安徽地质研究所,从事野外地质构造调查和工程地质勘测;后调安徽石油地震勘探大队,从事构造地球物理的分析和解释;再调石油地质实验室,从事岩石矿物的物理鉴定和化学分析;1978年至今在中国科学技术大学任教,主讲了野外地质学(I、II)、动力地质学、构造地质学、解析构造学、板块构造学、中国大地构造学、构造地球化学等课程。随着工作单位、工作地区的调动,工作任务和经费来源的变动,科研任务的目标、内容、性质亦历经了不断地变换,但主要从事构造地质物理、构造地质化学、构造地质年代学、石油天然气及CO<sub>2</sub>气成藏的研究。至今参与国家及部委的科研-工程项目计44项,负责了其中的20项,并提交了经过鉴定的综合研究报告20部,发表论文200余篇,主笔和合作出版教材和专著10种。主要成果:超大型深层洞库工程地质勘测、深层次区域地质构造分析、显微超显微构造物理化学分析,开展了天然气成藏构造声学鉴定的探索,特别是开启了构造地质年代学构造形成时限应变速率法定年的探索性研究。  
E-mail: Liudl@ustc.edu.cn



an event occurred and its duration. Although the isotopic geochronological method, after nearly a century of development, is now a mature approach to the time-point measurement of a geological event (generally with a precision of a millions years' error), it is incapable of measuring its duration. The measurement of a geological event from beginning to end requires an insight into structural geochronology, a new field at the forefront of international research. A geophysical approach was thus proposed (generally with a precision of  $10^4$  years' error). The approach can be divided into four steps: tectonic-geological work — observation of order and intensity of tectonic reworking; tectonic-physical work — measurement of differential stress and strain rates, a basic component in geological dating; tectonic-chemical work — calculating volumetric factors of deformed geological bodies; and tectonic-mathematical work — calculating the duration of structure formation. The approach has been applied to the study of the ductile zone in East and Southwest China and some results have been achieved. The approach is not yet mature and further improvement is needed for it to qualify as an effective theory of structural geochronology. The prospects of structural geochronology were given and its application limitations were pointed out.

**Key words:** geological event; duration; structural geochronology; time-point; isotopic geochronology

## 0 引言

古代我们的先人关注时间的性能。伟大的孔子早在两千多年前就在川上曰：“逝者如斯夫，不舍昼夜”。如是告诉人们，时间如流水，永恒流逝；时间是有方向的，在这个方向上，处于地球环境时空中的人们能观测的是过去的而不是未来的<sup>①</sup>。唐代大诗人李白写道：“青天有月来几时？我今停杯一问之。”北宋大文豪苏轼在《水调歌头》一词中亦有名句：“明月几时有？把酒问青天，不知天上宫阙，今夕是何年？”发问月亮的生日，这牵涉到宇宙的年龄究竟多大，宇宙诞生表示时间的开始吗，在它创生前有时间吗？千余年来人们一直不断的考究，至今也只能算是有了个占主导性的认识<sup>[1]</sup>。

依据广义相对论，人们测算现今所能认识的宇宙，已经生活了约 137.5 亿年。银河系的形成稍晚一些，大约在 100 亿年前。地球与球粒陨石基本是同时形成的，地球成生至今约有 45.67 亿年的历史。但是也存在对现有的观测持怀疑者，强调可能存在年龄比大爆炸还要古老的遥远星系；或者如部分（研究构成宇宙的普通物质、暗物质和暗能量及其各部分之间是如何相互联系）学者的猜想，星系团开始形成的时间比原先预计要早上百亿年；甚至认为我们认识的宇宙只不过是居于一个黑洞中的产物。当今对于大爆炸初期物质形态，已有了探测的初步条件，但对于爆炸前宇宙组成物质的形态则完全无法评估。

① 与范洪义教授私人通信。

人们关于时间的概念并不一致，但是存在主导性的意见。亚里士多德认为，时间是运动和运动持续量的度量<sup>[2]</sup>。牛顿认为，可能没有这样一种均匀运动的东西可以用来准确的测量时间，所有的运动都可能是加速的或减速的，但是绝对时间的流逝却不会有任何变化<sup>[3]</sup>。当今普遍认为，时间是一种物质存在的客观形式。

## 1 地质学中的时间概念

了解时间首要的是了解物质运动的历史。地质历史系统的编年表即地质年代表<sup>[4]</sup>，它经常与其相应的地层层序表合为一张表（表 1），以集中反映出无机界（岩矿）与有机界（生物）演化的顺序和过程及阶段。

### 1.1 地球物质、空间、时间的三位一体

李白在《春夜宴从弟桃花园序》中写道：“天地者，万物之逆旅也；光阴者，百代之过客也。”抑或是说，空间系物质的客舍，而物质运动的历史则展现了时间。地质学的时间论首先的是了解地质历史。地质体可以建造、改造和转移，唯独其历史不能营造和改变。

地球的生存由很多因素决定，而归根结底由时空决定。时间的一维绵延和空间的三维广延<sup>[2]</sup>都是物质延展性的表现。时间的流逝可展示出地球组成结构不断地发展变化，而时空的大系统环境决定了地球演化类似周期性的螺旋式发展。地质科学中的时间，其均匀性、持续性、流逝性等主要性能基本是由地球物质在空间运动中的极盛峰值量、阶段持续

表 1 中国区域年代地层(地质年代)表  
Tab. 1 China regional chronostratigraphic (geochronologic) scale

宇(宙)	界(代)	系(纪)	统(世)	年龄/Ma	原始生物植物	动物	
显生宙 (宙) PH	新生界(代) Cz	第四系(纪) Q	全新统(世)Qh 更新统(世)Qp	0.01 2.60		←现代人	
		新近系(纪) N	上新统(世)N <sub>2</sub> 中新统(世)N <sub>1</sub>	5.3 23.3		←古猿	
			古近系(纪) E	渐新统(世)E <sub>3</sub> 始新统(世)E <sub>2</sub> 古新统(世)E <sub>1</sub>	32 56.5 65		
				白垩系(纪) K	晚白垩统(世)K <sub>2</sub> 早白垩统(世)K <sub>1</sub>	96 137	←被子植物
			侏罗系(纪) J		上(晚)侏罗统(世)J <sub>3</sub> 中侏罗统(世)J <sub>2</sub> 下(早)侏罗统(世)J <sub>1</sub>	205 227 241	
		三叠系(纪) T		上(晚)三叠统(世)T <sub>3</sub> 中三叠统(世)T <sub>2</sub> 下(早)三叠统(世)T <sub>1</sub>	250 257 295		
				二叠系(纪) P	上(晚)二叠统(世)P <sub>3</sub> 中二叠统(世)P <sub>2</sub> 下(早)二叠统(世)P <sub>1</sub>	320 354 372	←裸子植物
		石炭系(纪) C			上(晚)石炭统(世)C <sub>2</sub> 下(早)石炭统(世)C <sub>1</sub>	372 386	
			泥盆系(纪) D	上(晚)泥盆统(世)D <sub>3</sub> 中泥盆统(世)D <sub>2</sub> 下(早)泥盆统(世)D <sub>1</sub>	410 438	←蕨类植物	←两栖类 ←鱼类
				志留系(纪) S	上(晚)志留统(世)S <sub>3</sub> 中志留统(世)S <sub>2</sub> 下(早)志留统(世)S <sub>1</sub>	490 500 513	
	奥陶系(纪) O		上(晚)奥陶统(世)O <sub>3</sub> 中奥陶统(世)O <sub>2</sub> 下(早)奥陶统(世)O <sub>1</sub>		543 543 543		←无脊椎动物
		震旦系(纪) Z	上(晚)震旦统(世)Z <sub>2</sub> 下(早)震旦统(世)Z <sub>1</sub>	630 680			
	南华系(纪) Nh		上(晚)南华统(世)Nh <sub>2</sub> 下(早)南华统(世)Nh <sub>1</sub>	800 900			
			青白口系(纪) Qb	上(晚)青白口统(世)Qb <sub>2</sub> 下(早)青白口统(世)Qb <sub>1</sub>	1000 1200		
	蓟县系(纪) Jx			上(晚)蓟县统(世)Jx <sub>2</sub> 下(早)蓟县统(世)Jx <sub>1</sub>	1400 1600		
		长城系(纪) Ch	上(晚)长城统(世)Ch <sub>2</sub> 下(早)长城统(世)Ch <sub>1</sub>	1800 2300			
	长沱系(纪) Ht			2500	←菌藻类		
		太古宙 (宙) AR	新太古界(代) Ar <sub>3</sub>		2800		
	中太古界(代) Ar <sub>2</sub>			3200	←原始菌藻类		
	古太古界(代) Ar <sub>1</sub>			3600			
	始太古界(代) Ar <sub>0</sub>						

【注】 据全国地层委员会等简化

量、速度变化量等的演变所标示。

地质学中的时间和空间及物质是统一的,地质体的组成(沉积岩、岩浆岩、变质岩及其组合中的矿物、元素、同位素等)和结构及其演化是一个整体。可测量的表观时间(非绝对时间)是地质体变革的极强值、时限值、速度值等的量度。

## 1.2 地球超级节律性变革的主因

两千多年前先哲荀子在《天论》中指出:“天行有常,不为尧存,不为桀亡。”释意宇宙暨地球的一切变化,有一定的规律,不以人的意志为转移。那么,主要规律是什么,又主要取决于什么呢?

地球演化特征变化是分阶段的。地球形成以来最重大的演化事件莫过于多次穿过银河系银道面期间而导致的翻天覆地变化。即是说,地球决定性的超级变故主要是由其变动于银河系中所处环境的控制,这从银河系整体而言系内因,从地球个体而言系外因;而且,地球随时间延续的发展过程中,充分体现了其变革的时间节律。地球演变的时间节律与空间位移密不可分,标志着时空的整体性。地球变革的阶段性显示有两个超大级别的周期<sup>[5]</sup>,或许更宜称为时段:(265±60)Ma(百万年)时段和(33±3)Ma时段。其(265±60)Ma系银河年的时段,即太阳系绕银河系旋转一周所需要的时间,在一个银河年内可以8次穿越银道面;(33±3)Ma的时段乃与太阳系穿越银道面有关,即太阳及其家族相隔两次穿越银道面的时限。其相应地质事变显著,可回溯历史查证,渐新世距今32 Ma,古新世距今65 Ma,晚白垩世距今96 Ma,早白垩世距今137 Ma等等。这些地质变革时间皆近于(33±3)Ma的倍数,由此可见地质与天文的相关关系。在银道面附近星际物质密集分布,运行到此间的地球受到大量陨星和彗星的撞击作用,伴随着地球内部结构性的变革,更加增强了地球组成结构的重新调整。银河年(265±60)Ma时段与地球演变时段具有惊人的一致性,即银河年时段与地球表层岩石圈(由地表及其下伏地幔顶部组成)板块(平均厚度约为地球半径的1/60)的聚合-离散变化的时段具有一致性。

地球构造演化显现为稳定期与活跃期的转换、渐变期与突变期的交替。全球大多数陆块大致在中元古代末期,于1 100 Ma前后<sup>[5]</sup>(约相当4个银河年)汇聚成罗迪尼亚(Rodinia)超大陆。在其经历了漫长的相对稳定时期渐变式的发展后,大致在新元古代中期,于800 Ma前后(约相当3个银河年)再

度活跃发生突变式的变革,但不再是各陆块之间的相向聚敛,而是发生于超大陆内部的裂解背离。大致在古生代末期,于260 Ma前后(约相当一个银河年)全球大多数陆块再一次相对快速地聚合成潘基亚(Pangea)超大陆。这种分久必合与合久必分于各时段各地段的表现绝非相同。地质演变具有单向性(不可逆性),并具有无限延续发展的阶段性特征,在阶段期间呈均匀性变化,而在阶段始末呈突发性变化。

地球生物演化亦具有阶段性特征,依据古生物兴衰在地层中生物层序和生物体共同的DNA记录,可以得知生物的演化呈现为均匀渐变与间断突变的交替,包括生物辐射性集群绝灭和爆发性异常繁盛及阵发性快速演变。大致在太古宙中期(中太古代)即繁殖有简单微小非吸氧的原始生物,而且得到迅猛扩张;太古宙晚期(新太古代)到元古宙初期(古元古代)，“大氧化事件”大气中含氧量渐趋增加,使得原始生物渐趋灭绝而需氧生物渐趋繁衍,以至古元古代晚期到中新元古代发育的菌藻类主体已经不同于此前的原始菌藻类;乃至显生宙初期(古生代寒武纪)生物大爆发;此后全球生物又发生了五次大灭绝<sup>[6]</sup>(表2)。

表2 显生宙全球五次生物大灭绝示意图  
Tab.2 Diagram of five global mass organism extinctions in the Phanerozoic Eon

代	纪	年龄/Ma	
新生代	第四纪		人类出现
	新近纪		哺乳动物时代 被子植物时代
	古近纪		
中生代	白垩纪	65	白垩纪末大灭绝
	侏罗纪		恐龙时代 苏铁植物时代
	三叠纪	205	最早的鸟类
	三叠纪		晚三叠世大灭绝
古生代	二叠纪	250	二叠纪末大灭绝
	石炭纪		蕨类植物时代
	泥盆纪	360	最早的爬行动物
	志留纪		晚泥盆世大灭绝
	寒武纪	570(540)	最早的昆虫 最早的有颌类鱼
	奥陶纪	438	奥陶纪末大灭绝
	寒武纪	570(540)	寒武纪生物大爆发

【注】据戎嘉余简化

### 1.3 地球各部分运动速率的差异

速率属于时间的范畴. 地球表层不同地块, 乃至地壳、地幔、地核彼此之间的运动速率是不同的. 现代大陆板块内部扩张带的运移速度一般小于 1 cm/a, 大西洋洋脊的扩张速度较快也仅在 1~2 cm/a, 最大扩张速度发生在东太平洋洋脊, 可达 13 cm/a<sup>[5]</sup>. 总体而言, 地球上部岩石圈板块的水平运动速度还是远远大于地幔的运移速度, 可是地球固体内核转动速度却比地壳—地幔竟然快了许多万倍. 这是凭据近 30 年来完成穿越地核的地震波的研究发现的. 地球内核是不均一的, 有很小的系统变化, 使内核的对称轴比地球旋转轴每年向东偏移 1.1°<sup>[7]</sup>.

## 2 地质学中的时间点和时间段

时间, 既可以是指事件过程里的某一点(时点), 亦可以是指事件过程起点至终点的一段(时段). 作为研究目标的地质事件的时间可归为两类, 一是事件发生时间节点的距今时间, 一是事件过程时间节点的持续时间. 两者缺一, 则是不完全的. 具体地说: 其一, 是以地质(球)化学为主的同位素地质年代学定年, 测定地质事件发生距今时间, 系事件发生时间点的年龄, 以所测平均峰值起算至今的年数为年龄数, 其研究的实质好比查问“哪天开会”; 其二, 是以地质(球)物理为主的构造地质年代学定年, 测定地质事件过程持续时间, 系事件始末时间段的年龄, 以所测保存在事件过程中形成的岩石矿物中的时间信息即事件起讫时限的年数为年龄数, 其研究的实质好比查问“会议天数”. 地质学关于时间的表述, 还常涉及地质运动或地质事件进展的变速时间. 不宜将其列为时间点、时间段之外的另类, 它当是地质体以不同速度向同一方向运动达到同一空间跨度界线点所需时间及其相差时间, 或是说, 相比同一时间段内地质体向一个方向运动所经过距离的差异. 可想而知, 这里表述的变速时间乃属于时间段的范畴.

### 2.1 时间点的定年

一般所谓的同位素地质年龄, 通常是指事件发生时刻(高峰平均值)距现在(传统指公元 1950 年)两者间的单位时间值.

根据同位素地质年代学定年, 求算放射性年龄的公式是<sup>[8-9]</sup>:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{D}{P} + 1 \right)$$

式中,  $t$  为年龄;  $\lambda$  为衰变常数;  $D$  为矿物或岩石中放

射成因的子体同位素含量;  $P$  为现存的放射性母体同位素含量.

近几十年来建成了一系列的同位素地质定年方法<sup>[8-11]</sup>, 包括 Rb-Sr, Sm-Nd, U-Th-Pb, K-Ar, Ar-Ar, Re-Os, Lu-Hf, La-Ce, La-Ba, K-Ca, U 系, 裂变径迹,  $C^{14}$  及其他宇宙成因核素  $Be^{10}$ ,  $C^{136}$ ,  $I^{129}$ ,  $Al^{26}$  等. 其中 K-Ar, Rb-Sr, U-Pb, Ar-Ar 等, 主要用于测定较古老岩石的年龄; 而  $C^{14}$  等的半衰期短, 主要用于测定最新的地质事件和人类早期活动遗物的年龄.

主要依据同位素地质定年, 在 2000 年国际地科联公布的<sup>[4]</sup>太古宙时间限定在距今 25 亿年以前, 目前已记录到一颗锆英石大致显示的地壳岩石的最老年龄可达 44 亿年; 元古宙在距今 25~5.4 亿年间; 显生宙距今 5.4 亿年到现在. 显生宙分为古生代在距今 5.4~2.5 亿年间, 中生代在距今 2.5~0.65 亿年间, 新生代距今 0.65 亿年至现在. 中国地质年代划分, 可参见“中国区域地层(地质年代)表”<sup>[4]</sup>, 其与国际地质年代划分基本一致.

应当指出, 过往的一些同位素地质定年争议, 许多问题出在采样的代表性和准确性上. 采集测试具有代表性样品, 这是一切高精度测试获得有价值、非扭曲性或非误导性结果的首要环节. 而野外采样的准确, 则需要反复进行野外地质和室内镜下深入细致的观测与判定. 对于试验中偶然性获得的新奇数据, 宜待可重复性获得该数值之后, 再作出肯定性的论断和报道.

同位素地质定年的原理是基于放射性元素具有固定的衰变常数, 但有的半衰期时间太短很快蜕变成殆尽, 只有较长半衰期的放射性元素(表 3)方才有用; 并且, 要求所测矿物或岩石中含放射性同位素

表 3 常用于同位素地质定年的放射性同位素及其半衰期

Tab. 3 Conventional radioactive isotope elements and their half-life

母体同位素	子体同位素	半衰期/Ma
$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$	4 500
$^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}$	713
$^{232}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}$	14 100
$^{87}\text{Rb}$	$^{87}\text{Sr}$	49 000
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$	1 300
$^{14}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	0.005 73

【注】 据中国科学院地球化学研究所

蜕变后剩下的母体同位素必须有足够的含量,能够被分离出来,够用才可以;而且,蜕变成的子体同位素易于富集并保存了下来,够用才可行. 这些严格的先决条件的满足程度,显然不是百分之百都可以达到的,这势必影响到所测同位素地质定年的可信程度.

再者,鉴于母体同位素与子体同位素皆可能经受后期地质作用<sup>[12]</sup>被混杂过剩和部分丢失,以及如此微量的放射性同位素测量的人为误差,因此在采信同位素定年时,应该能够对于其所测试样的地质环境的沿革及其相应岩矿成分的变化,有清晰的认识和深刻的理解.

## 2.2 时间段的定年

地质事件的持续时间或地质事件所造就的地质体的组成结构的形成时限,通常是依据地质现象的综合分析而间接判断的. 即根据沉积地层内古生物化石显示生物的进化顺序,结合沉积岩层的沉积顺序、岩浆脉体的侵入顺序、地质构造的复合顺序、变质岩石的变质顺序、磁性地层的极性转换顺序等,综合判定地质相对时间的先后顺序,进而判定地质事件之初与事件之末的时间段年龄. 由于通常上述地质顺序残缺不全,所得出的只能是估计的结果,造成不同研究者的认知差异很大,特别是其估认得出的相对地质时间间隔可相差千万年、亿年,因而失去真实性和实际意义.

以往没有办法直接测试给出地质事件过程持续时间定量的年龄值,这不只是因为地质建造的不完备性和地质改造的破坏性限制了综合判定地质事件时限的真实性和精确性;而且在于发生深部断裂构造运动过程时间的短时性(一般不超过十万年、百万年的量级),然而测定第四纪之前地质历史的同位素定年方法的误差精度之大(一般为几十至几百万年)大到了不着边际的程度;更重要的原因还在于,现代同位素地质定年方法并不可能一次性直接给出地质事件的过程时间. 因此,如要测量古构造地质形成时限,必须另辟蹊径,需要探究测定远古地质事件误差精度不超过万年级的构造地质物理化学定年方法. 根据刘德良、苏永军、杨晓勇、曹高社、方国庆、李振生、杨强、吴小奇等人的探索<sup>[13-19]</sup>,运用构造地质自组织系统,直接测定构造运动过程中产生的构造(成因)岩石中的同构造(产生的)矿物的形成时限,以标定地质构造运动事件的时限.

构造地质年代学应变速率法定年,求算的构造

形成时限的工作程式如下.

(I) 构造地质工作——观测构造改造的序次强度

综合分析研究对象所处的大地构造和区域构造环境、中型构造和小型构造条件、显微构造形貌和超显微构造组态,以判定所研究地质体经历的构造作用的期次、序次、强度及其相应的变形机制.

(II) 构造物理工作——测算差应力和应变速率求算差应力

不同学者推导出的公式中参数不尽相同,目前看来,2008年 Shimizu<sup>[20]</sup>提出的求算差应力  $\sigma$  公式最为合理:

对  $\beta$ -石英适用

$$\sigma = 3.52 \times 10^2 \times d^{-0.8} \exp\left(\frac{6.98 \times 10^2}{T}\right)$$

对  $\alpha$ -石英适用

$$\sigma = 2.17 \times 10^2 \times d^{-0.8} \exp\left(\frac{1.19 \times 10^3}{T}\right)$$

式中,  $d/\mu\text{m}$  为石英颗粒直径;  $T/\text{K}$  为绝对温度;  $\sigma/\text{MPa}$  为差应力.

求算应变速率

Hirth 等<sup>[21]</sup> 综合分析了前人的工作,并结合实验样品和自然样品的对比分析,提出了如下公式:

$$\dot{\epsilon} = 10^{-11.2} f_{\text{H}_2\text{O}} \sigma^4 \times \exp(-135\,000/RT)$$

式中,  $\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$  表示应变速率;  $f_{\text{H}_2\text{O}}$  为水的活度;  $R$  为理想气体常数 ( $R=8\,314\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ).

(III) 构造化学工作——求算构造变形地质体的体积因子

依据构造岩常量、微量、稀土元素组成的测试结果, Grant<sup>[22-23]</sup> 用质量等比线分析法, 确定构造岩的体积因子 ( $f_V$ ):

$$f_V \left( \frac{P_A}{P_0} \right) = \frac{M_A}{M_0} \quad (1)$$

$$C_i^A = \frac{M_0}{M_A} (C_i^0 + \Delta C_i) \quad (2)$$

对于每一个组分  $i$ , 式(2)的表达均不同. 如果设定某些特别组分(不活动组分), 即  $\Delta C_i = 0$ , 则  $C_i^A/C_i^0 = M_0/M_A$ , 亦即浓度比可以近似地代替质量比. 再由式(1)求出体积因子  $f_V$ .

(IV) 构造数学工作——求算构造形成时限

在稳态流变情况下, 韧性剪切过程中应变速率  $\dot{\epsilon}$  保持不变, 根据微积分原理, 微小  $dt$  时间体积的改变量  $dV$  等于  $dt$  时体积量  $V$  与体应变速率  $\dot{\epsilon}$  的乘积, 从而建立起方程<sup>[13-19, 24]</sup>:

$$dV/dt = -\dot{\epsilon} \cdot V$$

负号表示体积减少。对上式积分,得  $V^A = V^0 e^{-\dot{\epsilon}t}$ , 即体积因子  $f_V = V^A/V^0 = e^{-\dot{\epsilon}t}$ 。求解该方程,可以获得构造时限为

$$t = -(\ln f_V)/\dot{\epsilon}$$

把体积因子  $f_V$  和应变速率  $\dot{\epsilon}$  一起带入上式计算,即得到构造形成时限  $t$ 。

### 3 构造地质年代学展望

地球科学各学科皆存在年代学问题,然而只有地球化学的同位素地质年代学得以形成并发展成为一门独立的学科,其关键是具有独特的研究方法。以往在地学界难得见有构造地质年代学一词的使用<sup>[24]</sup>,对其内涵、外延所以没有人去考究,只因构造地质学缺少自组织成熟的定年方法。本文探索的构造形成时限应变速率定年方法是否可以作为构造地质年代学建构的基石之一,尚待其拓展研究历程的考验。

#### 3.1 提高构造地质年代学研究实地采样的准确度和试验测算的精确度

构造地质年代学与同位素地质年代学定年的可信度,都首先取决于采样的代表性和准确性。如果不能可靠地鉴别和确切地分离出一定数量与迭次构造变质中某特定变质事件相关的构造矿物,即便有确定的显微探测技术,也是枉然。一些科研中常有的错误,并不在于缺少先进的仪器和各种的模式,而可能在于从野外基本地质观测的欠缺性和室内用于测试的构造矿物及其组合识别的可靠性。这就是为什么本文特别强调,无论是构造地质还是同位素地质定年,都务必把宏观-显微-微观-超微观构造地质作为定年系统工程首要的不可或缺的工作。

构造地质年代学(应变速率法)定年精度,虽然可达万年级,但所采用的原理和方法是借鉴物理学和化学的。物理化学的实验试体材料简单,温压条件明确可控,试验过程时间很短,而在地球大自然实验室里,情况复杂得多。要排除构造地质年代学定年中尚存的不确定因素,需要提高时限测算全过程各个环节的准确度。固然,构造地质年代学时限定年的创建和发展,还有赖于物理化学与地质学相结合整体水平的改进和提高。然而,构造地质年代学定年其他不同思路和方法的探索与现有方法的嫁接也很重要,特别是在测试各序列工作中对于所用物理化学公式最恰当的选择,以便能够与实际地质历史

环境符合匹配,这对于减少测年的不确定性和提高精确性,是非常现实而大有可为的。

#### 3.2 促进构造地质年代学与同位素地质年代学的相互结合

地质年代学如能有构造地质年代学与同位素地质年代学相结合的方法,最有可能定量地解决一些重大的地质演化问题。这需要了解地质体中具有指示岩石矿物生存转换状况的某些元素和同位素的成分变化(如较为稳定的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值)与其所赋存地质体中具有指示结构构造相应变革状况的差应力和体积应变及流变速率的变化之间的相关关系。即是说,了解地质事件过程(时间)需要通过地质体的成分(物质)与结构(空间)相结合的研究。可以构造形成时限的比较构造学的研究为基础,从而为区域构造的对比增添标志,进而为大地构造的重建提供依据。

#### 3.3 加强构造地质年代学在地质和资源及环境科学中的应用

尽管应变速率定年方法还有待改进提高,然而以同一方法进行不同时代不同地区地质对比研究,实践表明这还是无大碍、有效果的。因此,在比较构造学中的应用具有广阔的前景,在某些深成矿产(如韧性剪切带金矿)和深源污染(如幔源 CO<sub>2</sub>)生成时限对比研究中也许是有助的。不待说,科学的应用乃科学应有之路;科学潜在的应用价值是科学发展不可或缺的动力。

#### 3.4 探讨构造地质年代学现有构造形成时限定年的价值

地质年代学包括了地质(球)化学的同位素地质年代学(可以直接测算地质事件峰值时间点距今年龄)和地质(球)物理的构造地质年代学(可以直接测算地质事件过程时间段持续年龄),两者互补。同位素地质年代学已有近百年的发展历程,现已成为一门成熟的学科,形成了系统的理论和方法<sup>[8-11]</sup>;然而,构造地质年代学则处于创建阶段<sup>[24]</sup>,还不成熟,尚未形成系统的理论构架和综合的分析方法。

虽然已经提出了反应速率法、扩散速率法、应变速率法等<sup>[15]</sup>,以及引述 Pfiffner<sup>[25]</sup>针对较弱变形变质岩石,通过有限应变测量也可推算变形时限等的介绍,但只是进行了一种应变速率方法有限的实践<sup>[16-18]</sup>。尽管如此,现有的工作已展示了这种构造地质定年方法是如何一步步建立的<sup>[15,19]</sup>,它的目标、理念、方法、应用的基本要点,以及目前工作的局

限性和不确定性。可以肯定的是,对于自然现象时间性的探索,以测定地质事件时限年龄,作为解释地球历史信息的一种语言和工具,势必有助于构造地质年代学的建立,亦有利于认识地质事件的节律和序列从定性到半定量的进步。已经在尽力积累实验资料,这会有利于后续工作开展。何况,发展已较成熟的同位素地质年代学所依据的母体同位素与子体同位素都可能在后期历经诸多地质作用过程中多次经受不同程度的混杂和丢失,似乎也还存在自然变化过程中的不确定性,又何必苛责尚在探索中的构造地质年代学定年所凭借的物理化学公式运用于自然过程的不确定性。至少业已证明,构造地质年代学测定构造形成时限的现实可能性。无论如何,现有的探索具有激励他人探讨的价值。

**致谢** 感谢中国科学院王德滋、常印佛、戴金星、王水、李曙光、郑永飞院士、中国地质大学万天丰教授、北京大学郑亚东和刘瑞琦教授、南京大学孙岩教授、浙江大学杨树锋教授、中国科学技术大学陈道公、陈江峰、范洪义、向守平和完绍龙教授曾经给予的启示、讨论和帮助。

#### 参考文献(References)

- [1] 向守平. 天体物理概论[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2008: 239-332.
- [2] 刘辽, 赵峥, 田贵花, 等. 黑洞与时间的性质[M]. 北京:北京大学出版社, 2008: 220-226.
- [3] 亚历山大·科瓦雷著. 从封闭世界到无限宇宙[M]. 张卜天, 译. 2版. 北京:北京大学出版社, 2008:161.
- [4] 全国地层委员会. 中国区域年代地层(地质年代)表. 北京:地质出版社, 2002: 5-7.
- [5] 万天丰. 中国大地构造学纲要[M]. 北京:地质出版社, 2004:283-287.
- [6] 戎嘉余. 华南地质历史时期生物大灭绝和复苏的初步研究[M]//陈宜瑜. 创新者的报告(5). 北京:科学出版社, 2000.
- [7] Song Xiaodong, Richards P G. Seismological evidence for differential rotation of Earth' Sinner core [J]. Nature, 1996, 382: 221-224.
- [8] Faure G. Principles of isotope geology [M]. 2nd ed. John wiley and Sons, 1986.
- [9] 陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 地球化学[M]. 2版. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009: 228.
- [10] 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2005:1-24.
- [11] 陈骏, 王鹤年. 地球化学[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- [12] 中国科学院地质化学研究所. 地质地球化学进展[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1980.
- [13] Liu Deliang, Su Yongjun, Yang Xiaoyong. Microstructural and geochemical analysis on limit of time series of mineralization in Susong metamorphic phosphorous deposit [J]. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(3): 1 111-1 115.
- [14] 刘德良, 曹高社, 杨晓勇, 等. 韧性构造地质事件时限的确定:一种构造物理定年方法探索[J]. 高校地质学报, 2000, 6(1):29-33.
- [15] 刘德良, 曹高社, 杨晓勇, 等. 构造形成时限测定方法的探索[J]. 地球科学进展, 2000, 15(A):467-469.
- [16] 刘德良, 曹高社, 李振生, 等. 郟庐断裂南段主断裂韧性剪切带形成历时时限的探索[J]. 地学前缘, 2002, 9(2):475-482.
- [17] 刘德良, 杨强, 吴小奇, 等. 郟庐断裂安徽段桴槎山韧性剪切带的形成时限初探[J]. 地质科学, 2006, 41(2): 333-343.
- [18] 吴小奇, 刘德良, 李振生, 等. 滇西主高黎真韧性剪切带糜棱岩形成时限的初探[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(2):136-141.
- [19] 吴小奇, 刘德良, 李振生. 初论韧性断裂构造形成时限的研究方法[J]. 地质科学, 2007, 42(1):199-208.
- [20] Shimizu I. Theories and applicability of grain size piezometers: The role of dynamic recrystallization mechanisms[J]. Journal of Structural Geology, 2008, 30(7):899-917.
- [21] Hirth G, Teyssier C, Dunlap J. An evaluation of quartzite flow laws based on comparisons between experimentally and naturally deformed rocks [J]. International Journal of Earth Sciences, 2001, 90(1): 77-87.
- [22] Grant J A. The isocon diagra: A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration [J]. Economic Geology, 1986, 8(8):1 976-1 982.
- [23] Grant J A. Isocon analysis: A brief review of the method and applications[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30(17/18):997-1 004.
- [24] 刘德良, 沈修志, 陈江峰, 等. 地球与类地行星构造地质学[M]. 2版. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009: 466-467.
- [25] Pfiffner O A, Ramsay J G. Constraints on geological strain rates: arguments from finite strain states of naturally deformed rocks[J]. J Geophys Res. 1982, 87 (B):311-321.