

地质热年代学及其应用

李小明¹⁾ 谭凯旋^{1 2)}

1)中国科学院边缘海地质重点实验室,广东广州 510640;

2)南华大学 建筑工程与资源环境学院,湖南 衡阳 421001

摘要 本文简单介绍地质热年代学的含义、应用和进展,并重点介绍了裂变径迹与⁴⁰Ar/³⁹Ar热年代学。

关键词 热年代学 应用 裂变径迹 ⁴⁰Ar/³⁹Ar

Thermochronology and Its Geological Application

LI Xiaoming¹⁾ TAN Kaixuan^{1 2)}

1)Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry and South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong, 510640; 2) College of Architecture, Resource and Environment, Nanhua University, Hengyang, Hunan, 421001

Abstract This paper describes in brief the implication, application and progress of thermochronology, with emphasis placed on fission track and ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronology.

Key words thermochronology application fission track ⁴⁰Ar/³⁹Ar

自20世纪80年代以来,地球科学的文献中频繁出现热年代学(thermochronology)一词,据此,本文简单介绍热年代学的含义和应用现状。

1 热年代学的提出和含义

地质年代学是20世纪50年代初期由于同位素地质年龄测定方法的出现而开始的,结束了地球科学研究中仅有相对时标的年代,早期被不少学者称为“绝对年龄”。但经过不太长的时间,随着同位素地质年龄测定方法的广泛应用和深入研究,大量新的矛盾和新的问题出现,以及等时线年龄的应用,发现应用“绝对年龄”这一名称是不够科学的,应该采用“同位素地质年龄”,对于单一的年龄值则往往称为“表面年龄”。大量研究结果证明这一认识是十分重要的。

随着同位素年龄数据的大量积累,出现了同一岩体不同矿物,同一矿物不同定年方法年龄数据相互不一致的矛盾现象。为了解释这些矛盾现象,20世纪60~70年代提出与发展了冷却年龄的理论概念。冷却年龄不同于结晶年龄,它是指岩石形成

以后冷却到子体同位素丢失路径和积累量相比可以忽略不计时的温度并开始放射性计时的年龄,这一温度称为封闭温度,冷却年龄总小于结晶年龄。热年代学就是考虑封闭温度的影响,或冷却年龄的差异而提出的概念。地质体在不同的发展阶段受到不同的热动力作用,不同矿物的封闭温度与活化能存在显著的差异,同一矿物不同方法的年龄数据就会不一致。方法不同,封闭温度可能不一样,因而所测量的同位素地质年龄就会不同,其地质意义也不同,这就需要进行合理的地质解释。很显然,热年代学是对同位素地质年代学的进一步认识和发展。

实际上,封闭温度就是由表面年龄给出的那一个时间点的温度,它是以扩散理论为理论依据的,并与冷却史直接相关。矿物晶体的放射成因子体丢失是通过热扩散和子体元素以一定的速度离开晶格位置与逸散两种方式发生的,故封闭温度可由下式估算出(Dodson, 1973):

$$E/RT_c = \ln[(-AD_0RT_c^2)(a^2ET')] \quad (1)$$

式中, T_c 为封闭温度; A 为与晶体形态有关的常数; D_0 为 T 等于 ∞ 时的 D 值; D 为扩散系数; a

为扩散线径; R 为气体常数; E 为扩散活化能; T' 为冷却速度。这就是人们常称的 Dodson 模式,它是假设在一个有限的温度区间(接近于封闭温度),其地质体在冷却过程中的时间(t)和温度($1/T$)呈线性相关。

Dodson(1973)根据封闭温度的原理,把时间与温度联系起来,建立了 Dodson 模式,导致热年代学的产生。Dodson(1973)封闭温度和冷却理论的提出,无疑是整个同位素地质年代学研究的一个巨大进步。已被广泛地应用在许多热年代学研究中,并获得了相当的成功。与此同时,在应用中也暴露出存在的问题,特别是理论模式与实际观测之间的偏离,在 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学研究中,最突出的是对碱性长石的研究。Dodson 模式中假设样品具有单一的,或者说均匀的扩散域,而对大多数缓慢冷却的碱性长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱来说,与根据 Dodson 模式所计算出的年龄谱往往出现十分明显的区别,而且利用阶段加热实验测定的 ^{39}Ar 计算出的 Arrhenius 曲线也出现了明显的线性偏离,这种偏离显然也与 Dodson 假设是不一致的。为此,研究者提出了一个新的扩散模式——氩的多重扩散域模式(简称 MDD 模式;Lovera 等,1989),MDD 模式是 Dodson 模式在理论和应用上的扩展。MDD 模式主要考虑了矿物颗粒大小的一种分布影响,不同扩散域可能具有相同或不同的活化能。

地质体的形成与演化是个漫长的地质过程,有些同位素定年方法所测定的同位素年龄只反映地质体形成后期某一演化温度阶段的年代,也是通常所称的热年代学。在同位素定年方法上,出现了裂变径迹热年代学(王世成,1996;Hasebe 等,2001)、氩-氩热年代学(Coleman 等,1998)和(U-Th)/He 低温热年代学(Zhou 等,2003;Balestrieri 等,2005)等。

2 热年代学的应用

随着同位素封闭温度理论的提出和发展,热年代学开始出现并成为地质年代学的研究方向之一。传统热年代学的研究主要集中于基岩样品的研究,主要是根据同一同位素体系不同高程的样品年龄或利用同一样品中不同的同位素体系封闭年龄的差异来求得基岩体冷却、剥露的历史。现在热年代学已用来研究盆地的构造热历史,以及矿床的形成年代和演化史(Wagner 等,1992;张峰等,1992;陈文寄等,1996;邱华宁,1999;Yuan 等,2001)成矿流体活动与成矿作用同位素定年(Duddy 等,1998),

中、低温热年代学研究方法的出现,在这方面取得了可喜的成绩。热年代学反映了地质体受热的“历史”和(或)过程”。

2.1 裂变径迹热年代学

裂变径迹热年代学是在深入研究矿物中裂变径迹的退火规律并成功地应用于地质热历史研究的基础上发展起来的核径迹技术的新领域,主要研究矿物中裂变径迹的退火规律;发展定量描述裂变径迹参数随温度和时间变化规律的退火模型;建立从裂变径迹参数获取温度随时间变化关系的热史模拟方法,以及探索裂变径迹技术在地质热历史研究中的应用的新途径。已获得重要进展,形成一个十分活跃的学科分支。

裂变径迹热年代学在地质上的应用很广泛,主要包括地质体的年龄测定(Arne 等,1989;Wagner 等,1992;张峰等,1992),构造带的构造运动研究(Wagner 等,1992;Calmus 等,1999;Spikings 等,2001),山脉的隆升剥蚀史(Fitzgerald 等,1997;Johnson,1997;Poupeau 等,1998;Rahn 等,1999),沉积物源的研究(Hurford 等,1984;Brand 等,1992;Zheng 等,2003),含油气盆地的热历史重建(Crowley 等,1991)和断裂带的断裂时期(Kohn 等,1997;Balesbier,2005)等。

2.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法在实验上采用阶段升温技术,是根据不同矿物岩石中氩的析出特性以及准备解决的地质问题的需要,选择若干温度段,把各温度区间所萃取的氩分别进行 Ar 同位素分析得到相对应的阶段年龄,各阶段析出的氩量和同位素丰度以及阶段年龄不尽相同,因此可以显示出比常规 K-Ar 法更多的信息。经历热事件样品的年龄谱可在低温阶段出现低年龄(可能接近于热事件的年龄),在高温区出现高年龄(可能接近于样品成岩年龄)。

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 热年代学就是利用 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 法提供的时间和温度的双重信息,得出同一矿物在不同温度时的年龄,探讨地质体的构造热演化历史(Coleman 等,1998;Reid 等,2005)。结合碱性长石中氩的 MDD 模式,在年轻火山岩年龄测定、新生代以来沉积盆地热历史研究、新构造运动及沉积岩年代学研究、成矿年代测定、构造非平稳运动研究方面取得了可喜的成果(Lovera 等,1989;陈文寄等,1996)。

3 热年代学应用进展

地球科学研究者运用 Dodson 模式研究构造-热

事件,出现了构造-热年代学。20世纪90年代以来,由于构造理论、概念和方法的更新,伴随着测年技术的突飞猛进和测年方法的日益增多和完善,将构造热年代学扩展为构造年代学(杨巍然等,1996)。另外,变质作用 p - T - t 轨迹的建立需要提取每次热事件的年龄信息,架起时间与温度之间关系的桥梁,需要进行热年代学研究(Goodge等,1992)。

近年来(U-Th)/He定年方法以及与宇生同位素、裂变径迹等联合使用在低温热年代学应用上的优势吸引人们以此开展构造、地形地貌演化等方面的研究(Zhou等,2003; Balestrieri等,2005)。另外,黑云母 α -反冲径迹定年可能成为火山灰年代学和热年代学的一种方法(Glasmacher等,2003)。

碎屑颗粒热年代学是根据热年代学原理,以沉积地层中未重置碎屑颗粒为研究对象,从而研究其沉积源区特征及热演化历史的一种年代学方法。由于锆石 FT、磷灰石 FT、钾长石 K-Ar 体系的封闭温度低,它们从封闭深度被剥露于地表并被搬运沉积到盆地中所经历的时间较短,因而成为碎屑颗粒热年代学的主要研究对象。是把山体抬升、剥露与盆地沉积联系起来的年代学方法,反映盆-山耦合作用的历程(Hurford等,1984; Brandon,1992; Zheng等,2003)。

总之,热年代学是利用对温度灵敏的放射性定年方法来重建地质体热历史的科学,已成为地质年代学的一个重要研究方向,并广泛深入到地球科学的各个研究领域。

参考文献

陈文奇,李齐,马宗晋. 1996. 构造非平稳运动定量研究的 MDD 模式制约. 地球科学, 21(3):277~279.

王世成. 1996. 裂变径迹热年代学的新进展. 核技术, 19(10):577~580.

杨巍然,简平. 1996. 构造年代学——当今构造研究的一个新学科. 地质科技情报, 15(4):39~43.

张峰,杨科佑. 1992. 黔西南微细粒浸染型金矿床裂变径迹成矿时代的研究. 科学通报(17):1593~1595.

Arne D C, Green P F, Duddy I R et al. 1989. Regional thermal history of the Lennard Shelf Canning basin from apatite fission track analysis: Implications for the formation of Pb-Zn ore deposits. Austral. J. Earth Sci., 36:495~513.

Balestrieri M L, Stugan F M, Persano C et al. 2005. Geomorphic development of the escarpment of the Eritean margin, southern Red Sea from combined apatite fission track and (U-Th)/He thermochronology. Earth and Planetary Science Letters, 231:97~110.

Brandon M T. 1992. Decomposition of fission-track grain-age distribu-

tions. American Journal of Science, 292:535~564.

Calmus T, Poupeau G, Bourgeois J et al. 1999. Late Mesozoic and Cenozoic thermotectonic history of the Mexican Pacific margin (18° to 25°N): new insight from apatite and zircon fission-track analysis of coastal and offshore Plutonic rocks. Tectonophysics, 306(2):163~182.

Coleman M E, Hodges K V. 1998. Contrasting oligocene and miocene thermal histories from the hanging wall footwall of the South Tibetan detachment in the central Himalaya from ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronology, Marsyandi Valley, Central Nepal. Tectonics, 17(5):726~740.

Crowley K D. 1991. Thermal history of Michigan basin and southern Canadian shield from apatite fission track analysis. Journal of Geophysical Research, 96:697~711.

Dodson M H. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. Contribu. Mineral. Petrol., 40:259~274.

Duddy I R, Green P F, Hegarty K A et al. 1998. Dating and duration of hot fluid flow events determined using AFT(Ar) and vitrinite reflectance-based thermal history reconstruction. Geological Society Special Publication, 44:41~51.

Fitzgerald P G, Stump E. 1997. Cretaceous and cenozoic episodic denudation of the Transantarctic Mountains, Antarctica: New constraints from apatite fission track thermochronology in the Scott Glacier region. Journal of Geophysical Research, 102:7747~7765.

Glasmacher U A, Lang M, Klemme S et al. 2003. Alpha-recoil tracks in natural dark mica: Dating geological samples by optical and scanning force microscopy. Nuclear Instruments and Methods in Physical Research B 209:351~356.

Goodge J W, Dallmeyer R D. 1992. ⁴⁰Ar/³⁹Ar mineral age constraints on the Paleozoic tectonothermal evolution of high-grade basement rocks within the Ross Orogen, Central Transantarctic Mountains. Journal of Geology, 100:91~106.

Hasebe N, Tagami T. 2001. Exhumation of an accretionary prism——results from fission track thermochronology of the Shimanto Belt, southwest Japan. Tectonophysics, 331:247~267.

Hurford A J, Fitch F J, Clarke A. 1984. Resolution of the age structure of the detrital zircon populations of two lower Cretaceous sandstones from the Weald of England by fission-track dating. Geol. Mag., 121:269~274.

Johnson C. 1997. Resolving denudational histories in orogenic belts with apatite fission-track thermochronology and structural data: An example from southern Spain. Geology, 25(7):623~626.

Kohn B P, Feinstein S, Foster D A et al. 1997. Thermal history of the eastern Gulf of Suez, II: Reconstruction from apatite fission track and ⁴⁰Ar/³⁹Ar K-feldspar measurement. Tectonophysics, 283:219~239.

Lovera O M, Richter F M, Harrison T M. 1989. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronometry for slowly cooled samples having a distribution of diffusion domain sizes. J. Geophys. Res., 94(17):917~935.

Poupeau G, Saddiqi O, Michard A et al. 1998. Late thermal evolution of the Oman mountains subophiolitic windows: Apatite fission-track

- thermochronology. *Geology*, 26(12):1139~1142.
- Rahn M K ,Hurfurd A J ,Frey M. 1997. Rotation and exhumation of a thrust plane :Apatite fission-track data from The Glarus thrust , Switerland. *Geology* ,25(7):599~602.
- Spikings R A ,Seward D ,Winkler W et al. 2000. Low-temperature thermochronology of the northern Cordillera Real ,Ecuador :Tectonic insights from zircon and apatite fission track analysis. *Tectonics* , 19(4):649~668.
- Wagner G A ,Haute P V D. 1992. Fission Track Dating. Postfach Ferdinand Enke Verlag.
- Reid A J R , Wilson C J L , Phillips D et al. 2005. Mesozoic cooling across the Yidun Arc , central eastern Tibetan plateau :a reconnaissance $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ study. *Tectonophysics* , 398 :45~66
- Yuan Wanming , Hou Zengqian , Li Shengrong et al. 2001. Fission track evidence on thermal history of Jiama polymetallic ore district , Tibet , Science in China(Series D) , 44(Sup.) : 139~145.
- Zheng Dewen , Zhang Peizhen , Wan Jinglin et al. 2003. Late Cenozoic deformation subsequence in northeastern margin of Tibet——Detrital AFT records from Linxia basin. *Science in China Series D-Earth Science* 46(S2) 266~275.
- Zhou Zuyi , Xu Changhai , Reiners P W et al. 2003. Late Cretaceous-Cenozoic exhumation history of Tiantangzhai region of Dabieshan orogen : constraints from (U-Th)/He and fission track analysis. *Chinese Science Bulletin* 48(11) : 1151~1156.