

(U-Th)/He 低温热年代学技术在造山带隆升-剥蚀过程研究中的应用

杨波¹⁾, 丁俊¹⁾, 杜谷¹⁾, 陈智梁¹⁾, 胡志中¹⁾, 王杰²⁾, 陶成²⁾

1) 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081;

2) 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 无锡, 214151

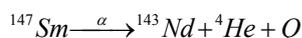
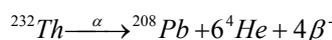
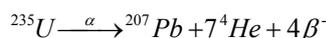
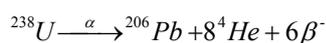
1 序言

近年来, 随着低温热年代学实验技术的日益完善, (U-Th)/He 热年代学技术以其封闭温度低(磷灰石 75℃左右, 锆石 170℃左右)的特点, 和裂变径迹(FT, 磷灰石退火温度 110℃左右, 锆石退火温度 250℃左右)以及 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等热年代学方法联用, 成为造山带隆升-剥蚀机制研究的最有效手段之一。

2 (U-Th)/He 热年代学基本原理及实验技术方法

2.1 基本原理

岩石中磷灰石、锆石等矿物中的氦主要是由 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 经 α 衰变产生(少量经 ^{147}Sm 衰变产生, 大多数情况被忽略):



通过测定矿物内现存的 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th (有时还须测 ^{147}Sm) 和 ^4He 的含量, 根据放射性同位素定年原理, 见以下公式(忽略了 Sm):

$$^4\text{He}(t) = 8^{238}\text{U}(t)[\exp(\lambda_{238}t) - 1] + 7^{235}\text{U}(t)[\exp(\lambda_{235}t) - 1] + 6^{232}\text{Th}(t)[\exp(\lambda_{232}t) - 1]$$

式中: $^4\text{He}(t)$ 、 $^{238}\text{U}(t)$ 、 $^{235}\text{U}(t)$ 、 $^{232}\text{Th}(t)$ 均为时刻 t 矿物中这些元素的含量, λ_{238} ($1.55125 \times 10^{-10}/\text{a}$)、 λ_{235} ($9.8485 \times 10^{-10}/\text{a}$)、 λ_{232} ($4.9475 \times 10^{-11}/\text{a}$) 为衰

变常数, t 为累计时间, 即所需要的氦年龄值。

2.2 实验技术方法

(U-Th)/He 实验技术方法相比其他技术方法较为复杂, 国外实验室经多年的不断探索和完善, 目前已经形成一套较为成熟的实验技术方法流程, 国内 (U-Th)/He 实验室的方法建立也正在积极进行当中, 但目前公开发表的数据均出自国外实验室, 由于实验技术方法的滞后, 一定程度影响了国内 (U-Th)/He 方法的应用研究。目前较为常用的方法流程主要分为以下四个步骤:

(1) 单矿物挑选

在双目体式显微镜下(带数码照相和测量功能), 从已经分选出的单矿物(磷灰石、锆石等)中挑选晶体尽量完好, 无明显裂缝和杂质, 颗粒较大(晶体最短轴直径最好大于 70 微米), 不含包裹体(或包裹体尺寸在 10 微米以内)的单矿物颗粒(3-6 颗), 在显微镜下对矿物的形状和尺寸进行照相、准确测量。然后将挑选出的单矿物颗粒逐一装入特制的金属胶囊内(磷灰石一般用 Pt 胶囊, 锆石用 Nb 胶囊)。

(2) 单矿物氦的提取和测量

将装入金属胶囊中的矿物通过激光加热法进行氦的提取(锆石 1200℃, 磷灰石 1000℃), 重复加热 2-3 次, 确保单矿物颗粒完全释出 ^4He , 根据气体同位素稀释剂法原理(加入一定量的 ^3He), 用气体同位素质谱测定 ^4He 含量。

(3) 单矿物中 U、Th 含量的测定

将已测定过氦含量的单矿物胶囊逐一取出、完全消解(磷灰石用 HNO_3 , 锆石用 $\text{HF} + \text{HNO}_3$), 同样使用同位素稀释剂法(加入定量的 U、Th 同位素稀释剂), 在 ICP-MS 上测得 U、Th 的含量, 利用

年代学公式计算得出初始氦年龄。

(4) 氦年龄的校正

由于 α 粒子的发射效应和样品单矿物颗粒本身存在的或多或少的缺陷, 则要求必须对使用年代学公式计算得出的初始氦年龄进行校正。Farley 等提出了据颗粒形状和大小校正具较长射程 α 粒子氦年龄的定量模型。目前国际上绝大多数实验室均采用该方法获得校正系数 (Ft) 和氦校正年龄。

3 造山带隆升-剥蚀的应用研究

造山带隆升-剥蚀过程研究一直以来都是地球科学研究的前沿热点, 而目前 (U-Th)/He、裂变径迹 (FT) 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法等多种低温热年代技术的综合应用为确定造山带隆升-剥蚀研究中诸多问题提供了更为详细的数据信息, 这些数据能够直接反映造山带主要的隆升-剥蚀时代和剥蚀速率。

House (House M A. et al., 1998) 利用磷灰石的氦封闭温度低这一特点, 测定了 Sierra Nevada 的古地形年龄, 说明 San Josquin 和 King rivers 大峡谷最晚的切割时间为 70-80Ma, 该研究中, 在 Sierra Nevada 南部的岩体上, 沿 200km 长的剖面, 在约 2km 的高程收集了 36 个样品, 测试了它们的 (U-Th)/He 年龄, 年龄范围为距今 44.5-84.6 Ma, 这些样品的年龄和地形都有很好的对应关系。Bullen (Bullen M E. et al. 1999) 研究了吉尔吉斯天山山脉晚新生代的构造活动, 通过裂变径迹方法与 (U-Th)/He 方法的联合制约, 给出了详细的快速冷却的时间及速率。Kirby E. 等 (Kirby E. et al. 2002) 通过对龙门山构造带几个中生代的侵入岩体的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 (U-Th)/He 测年数据分析认为龙门山-岷山一带与其西侧的黑水一带经历的不同剥蚀历史, 前者的快速剥露开始时间为 13~5 Ma, 剥蚀速率从 $<0.1\text{mm/a}$ 增加到 1-2 mm/a, 而后者新生代期间处于匀速缓慢剥蚀状态 (3°C/m.y.), 提出了青藏高原东缘快速隆升剥露起始时间在上新世前, 但不早于中新世 (5-10Ma)。Clark et al. (2005a, 2005b) 采用磷灰石裂变径迹和 (U-Th)/He 年龄-高程法也将青藏高原东南缘的快速剥蚀开始时间置于 13-9 Ma, 剥蚀速率从 0.01mm/a 增加到 $0.25-0.5\text{mm/a}$ 。Godard (et al. 2009a) 对龙门山中段彭灌杂岩和雪隆包岩体采用锆石 (U-Th)/He 年龄-高程法也揭示出 11-8Ma 开始的快速剥露事件, 平均

剥蚀速率约 0.65mm/a , 并将其揭示为冲断成因。

近年来, 国内学者对 (U-Th)/He、裂变径迹 (FT) 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法等低温热年代学的综合应用研究也取得了快速的进展, 周祖翼等 (周祖翼, 许长海等, 2003) 利用大别山天堂寨花岗岩体的磷灰石、锆石的 (U-Th)/He 数据和裂变径迹数据对大别山天堂寨地区晚白垩世以来的剥露过程进行了应用研究。邱楠生等 (邱楠生, 秦建中, 王杰等, 2008) 利用镜质组反射率 (R_o) 和磷灰石与锆石的 (U-Th)/He 年龄一起模拟了川东北地区三叠纪以来的构造-热演化特征。万景林等 (万景林, 郑文俊等, 2010) 通过磷灰石的 (U-Th)/He 和裂变径迹年龄, 获得祁连山北缘开始隆升的时间为 9.5Ma, 隆升的速率为 $(0.5\pm 0.1)\text{mm/a}$, 晚新生代以来与祁连山北缘断裂相关的缩短速率为 $(1.4\pm 0.2)\text{mm/a}$ 。许长海等 (许长海, 周祖翼等, 2010) 运用磷灰石、锆石的裂变径迹和 (U-Th)/He 的低温热年代学方法, 对大巴山弧形构造带的形成以及与两侧隆起的关系进行了分析研究, 认为南大巴山弧形构造带在 153Ma-100Ma 的快速冷却抬升期 ($1.44-1.90^\circ\text{C/Ma}$) 就是大巴山弧形构造带的形成期, 南大巴山弧形带的形成与其两侧黄陵和汉南-米仓山刚性隆起的隔挡作用关系密切, 支持了该弧形构造带与扬子板块主动向北西的推挤作用有关这一观点。田云涛等 (田云涛, 朱传庆等, 2011) 利用多类低温热年代学数据对晚白垩世以来川东北的剥蚀历史进行了综合分析。

4 结论

(1) (U-Th)/He 热年代学技术以其封闭温度低 (磷灰石 75°C 左右, 锆石 170°C 左右) 的特点, 在造山带演化尤其是后期隆升-剥蚀过程研究中发挥着不可替代的作用。

(2) 在造山带隆升-剥蚀应用研究过程中, 单一的低温热年代方法数据往往不能有效揭示造山带在某一阶段的演化过程, 所以需采用多类低温热年代学技术方法的制约和对多种方法数据 ((U-Th)/He、裂变径迹 (FT) 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法等) 的综合分析, 结合研究区地质背景, 才能对造山带隆升-剥蚀过程进行详细、正确的阐述。

(3) 低温热年代学技术的应用研究离不开实验技术方法的支撑, 重视和加强我国低温热年代学实验室的建设是深入开展应用研究的基础保障。