

doi: 10.13745/j.esf.2016.04.022

基于核密度估计的碎屑颗粒年龄分析及应用： 松辽盆地构造事件定年

宋 鹰¹, 张俊霞^{2,*}, Andrei Stepashko³, 袁万明⁴, 丛旭日⁵

1. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580
2. 中国地质大学(武汉) 经管学院, 湖北 武汉 430074
3. 俄罗斯科学院 大地构造与地球物理研究所, 俄罗斯 哈巴罗夫斯克 680000
4. 中国地质大学(北京) 科学研究院, 北京 100083
5. 青岛大学 数学系, 山东 青岛 266071

SONG Ying¹, ZHANG Junxia^{2,*}, Andrei STEPASHKO³, YUAN Wanming⁴, CONG Xuri⁵

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China
2. Faculty of Economy and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
3. Institute of Tectonics and Geophysics, Russian Academy of Sciences, Khabarovsk 680000, Russia
4. School of Scientific Research, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China
5. Mathematics Department, Qingdao University, Qingdao 266071, China

SONG Ying, ZHANG Junxia, STEPASHKO A, et al. Decomposition the detrital grain ages by Kernel Density Estimation and its applications: Determining the major tectonic events in the Songliao Basin, NE China. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 265-276

Abstract: The thermochronology of detrital grains has quickly become a very popular technique for understanding some complicated geological processes, e. g. plate collision, orogeny and sedimentary provenance studies. Detrital single grains from well-dated sedimentary formations contain different age components, serving as mineral tracers in sedimentary systems and record the sediment-forming processes. Therefore how to decompose and visualize the ages faithfully and extract possible geological information are keys to the understanding thermochronology result of detrital grains. Binned Frequency Estimation and Probability Density Estimation are two extensively using approaches. Unfortunately, both of them lack a firm theoretical basis and can produce inaccurate results when data quantity or quality is low. This paper introduces a statistical technique for analyzing isotope age, called Kernel Density Estimation (KDE), which involves the age data, but explicitly takes into account the analytical uncertainties by inherent adaptive bandwidth functions. Such adaptive functions vary the bandwidth according to the local density, avoiding the uncertainties from analytical errors and age abundance. Finally, we used the KDE to study two independent thermochronology date sets in northeast China: the zircon U-Pb ages of Phanerozoic granitoids in Great Xing'an Range and the single grain fission track ages of detrital apatite in the Songliao Basin. The estimated age pattern coincides with the regional tectonics and tectono-sedimentary records in the study area. It also gives more accurate chronological constraints to some major regional tectonic events. Thus, the KDE proves to be a valid statistical approach for geologic age decomposition.

Key words: detrital grains; thermochronology; Kernel Density Estimation; Songliao Basin; tectonic-thermal evolution

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2015-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402171); 国家科技重大专项(2011ZX05009-001); 山东省自然科学基金项目(ZR2013DQ013); 中央高校基本科研业务费专项(16CX02038A)

作者简介: 宋 鹰(1982—), 男, 博士, 讲师, 矿产普查与勘探专业, 主要从事盆地地动力学研究。E-mail: yingsong@upc.edu.cn

* 通讯作者简介: 张俊霞(1965—), 女, 硕士, 副教授, 构造地质学专业。E-mail: jxzhang@cug.edu.cn

摘要:碎屑矿物热年代学是了解板块碰撞、造山带抬升剥露以及盆地沉积等地质事件的重要途径之一。同一沉积区内碎屑颗粒通常是多来源的,含有不同的年龄组分,如何获得真实的年龄组分分布样式,进而准确地提取出地质年龄信息是碎屑颗粒年龄分析的关键。由于受到数学原理、组距选择和样品分析测试误差等因素的影响,常用的地质年龄频率分布图和概率密度曲线难以得到真实的年龄分布样式。本文引入一种新的同位素年龄数据统计方法——核密度估计法。该方法以同位素年龄数据为基础,根据数据密度和测试误差自适应变换带宽函数,减少了测试误差和样本数量的干扰,有效地提高了年龄分解精度。该方法尤其适用于同位素年龄样本数量少的研究新区以及测试误差大的碎屑颗粒年代学数据分析。本文应用核密度估计法,对大兴安岭地区显生宙花岗岩锆石 U-Pb 年龄数据库和松辽盆地碎屑磷灰石裂变径迹年龄数据进行了分析,所得到的年龄分布样式不但与区域地质背景、盆地构造-沉积记录等地质事实相吻合,还进一步准确约束了区域构造事件的年代界限。因此核密度估计法是一种能合理有效地进行地质年龄分布样式分析的先进统计方法。

关键词:碎屑颗粒;热年代学;核密度估计;松辽盆地;构造热演化史

中图分类号:P588.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)04-0265-12

0 前言

自 20 世纪 70 年代以来,随着放射性同位素理论的发展以及分析测试技术的进步,碎屑矿物热年代学理论与技术方法日渐成熟^[1-2]。以高温锆石 U-Pb 测年、中温白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 测年以及低温锆石、磷灰石、榍石等的裂变径迹和 U-Th/He 测年为主要手段的大量研究实例证明了碎屑矿物热年代学是解决沉积区物质来源、源区(剥蚀区)形成和剥露历史、古地貌重建、盆地热史恢复以及约束地层年龄等问题的有效途径^[3-12]。

锆石是碎屑沉积物中的常见副矿物,在风化、剥蚀、搬运过程中具有极强的稳定性,而且富含放射性同位素 U、Th 等,所以锆石 U-Pb 法成为了记录埋藏-造山-剥蚀多个构造事件的地质计时器^[13-15]。钾长石、角闪石、黑云母等适用于 Ar 同位素体系研究的矿物也广泛存在于各类岩石中,并且 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学测定的母体元素钾为常量元素,分析过程只需测定 Ar 同位素比值,因此,该方法有效运用于各类构造热事件的研究,成为了精确定年的可靠手段之一^[14,16-20]。锆石、磷灰石的裂变径迹由于具有独特的退火动力学特征,其年龄和长度分布可记录物源区上地壳岩石隆升-剥露历史,若经历热重置后则可记录了沉积区的沉降-隆升历史,因此,为沉积盆地物源分析及热史演化提供了有效约束^[1,21-24]。由此可见,碎屑矿物热年代学在地质学领域已具有举足轻重的地位,加之诸如 ID-TIMS、LA-ICP-MS、SHRIMP 等先进的现代测试技术,可以方便快捷地测得大量的定年数据^[25-30],故在短短的几年中,国内外涌现出大量碎屑矿物颗粒同位素定年数据及相关

的地质分析成果。

与仅记录单次地质事件的岩浆岩和变质岩年代学不同,由于碎屑矿物颗粒来源具有多样性,表现为同一样品的碎屑颗粒年龄数据通常是由多期不同的年龄组分所构成^[31-37],所以碎屑矿物年代学侧重于利用样品中一定数量的单颗粒定年结果来获得完整的年龄分布样式。面对如此众多且分布复杂的年龄组分,如何运用恰当的统计学方法获得准确合理的年龄分布样式,并用直观清晰的图件表达出来,这是碎屑颗粒年龄分析的关键所在。在目前的实际应用中,频率分布估计与概率密度估计是碎屑年龄谱分析中常用方法,可以简单直观地展示年龄数据分布情况以及峰值年龄,与之有关的各种数据处理软件如 Isoplot^[38]、AgeDisplay^[39] 等为这两种方法的广泛使用提供了便利条件,因此格外受到地质学家的青睐。不过,将数理统计原理与地质同位素年龄数据对比却发现,在统计学原理上,这两种常用的统计方法存在一些固有的、往往被人们所忽视的缺陷,而正是这些缺陷会对年龄分布的样式造成误判,进而导致错误的地质解释。

本文介绍一种新的年龄分布统计和分析方法——核密度估计法(Kernel Density Estimation)。该方法遵循严格的统计学原理,以数据样本为基础,可以根据测试误差通过专门的变带宽函数自动变换带宽,从而有效降低了人为分析误差的干扰,提高了年龄分布分析的分辨率、准确度和合理性。下面,首先讨论碎屑年龄分析中常用的频率分布估计和概率密度估计两种方法的原理和特点。在此基础上详细介绍核密度估计法的原理和优点,并分别应用随机数据和研究实例验证其在碎屑颗粒年龄分析中的可靠性和准确性。最后,应用该方法对中国东北松辽

盆地碎屑磷灰石裂变径迹年龄分布进行分析,试图精确约束盆地早白垩世中晚期—新生代多期重要的隆升降温事件的具体时间界限。

1 常用地质年龄统计方法及存在的问题

1.1 频率分布估计法(Binned Frequency Estimation)

将测量数据绘制成频率直方图是单变量概率密度估计的一种最简单方法,也是将年龄分布样式可视化的最传统的图件。频率直方图不用借助数学公式或计算机软件,在野外用方格纸即可绘制,简易直观,可用于定性分析重要地质事件年龄表观特征,如峰值时间、持续时间和间歇期等^[39-40]。

频率直方图的统计学原理是基于:假设碎屑颗粒年龄总体中有 n 个观测值,分别是 x_1, x_2, \dots, x_n , 直方图的初始值为 x_0 , 组距为 h , 则直方柱的区间范围为 $[x_0 + ih, x_0 + (i+1)h]$, 年龄分布的函数估计可用下式^[41]表示:

$$\hat{f}(x) = \frac{n_i}{nh} \quad (1)$$

其中 n_i 表示第 i 个区间内年龄的个数。

频率直方图在数据展示上具有简单直观且易于理解的特点,但在用于分析同位素年龄数据时,这种方法从原理上存在两个固有的缺陷:(1)频率直方图是基于“绝对数值”或“准确数值”的可视化图件,并未考虑同位素年龄所包含的测试误差^[39-40]。由于实验条件(例如中子通量、铀含量、晶体表面积等)、测量方法、样品状态以及其他因素的差异,这种测试误差可能从低至百分之几(如 U-Pb 与 Ar-Ar 定年)到高达百分之几十(如裂变径迹定年)。严格来说,用一组有测试误差的同位素年龄数据,绘制直方图是有问题的。(2)频率直方图中的“直方”宽度,即组距的选择,会显著影响年龄分布样式。随着组距的变化,相应的年龄峰值位置和明显程度会随之发生变化^[40]。如果组距过小,直方图就会出现大量的“峰值”,表现为“锯齿状”(undersmoothing)特征,无法对每个峰值进行合理的地质解释,如图 1(a)的组距 $h=2$ Ma,出现了至少 9 个峰值;反之,组距过大,只有少数的峰值,直方图表现的过度平滑(oversmooth),造成年龄分辨率降低,如图 1(c)的组距 $h=10$ Ma,仅有 1、2 个峰值。

1.2 概率密度估计法(Probability Density Estimation)

为了分析具有测试误差的同位素年龄分布,

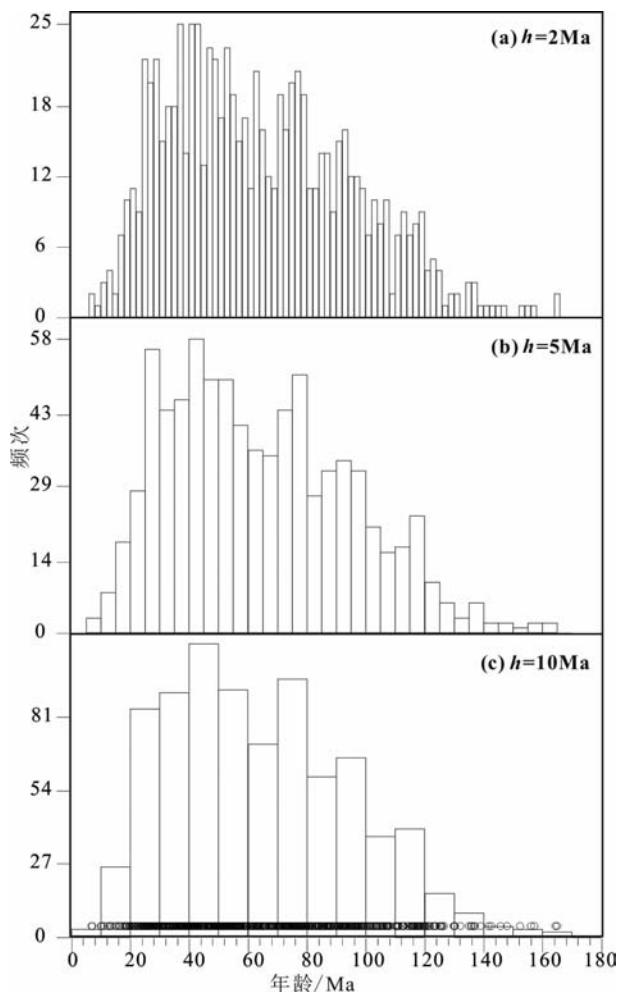


图 c 中的密集圆圈表示单颗粒磷灰石年龄数据点位置。

图 1 组距(h)选择对频率直方图年龄分布样式的影响
(数据来自本文松辽盆地碎屑磷灰石单颗粒裂变径迹年龄数据库, $n=804$)

Fig. 1 A series of histograms based on the same data illustrating different age patterns due to changes in bin width

Hurford 等^[42]在 1984 年首次引入了概率密度估计的统计方法。概率密度曲线是用连续平滑的曲线表现概率密度分布情况^[43],可由下式^[44]表示:

$$\hat{f}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G[\tau; \tau_i, \text{SE}(\tau_i)^2] \quad (2)$$

$$G[x; \mu, \sigma^2] = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}[(x-\mu)/\sigma]^2} \quad (3)$$

其中, τ_i 和 $\text{SE}(\tau_i)$ 表示第 i 个颗粒的年龄及其标准差, $G[\cdot]$ 表示均值为 μ 、标准差为 σ 的高斯函数。

概率密度曲线实际上是将每个颗粒年龄 τ_i 用服从均值为 τ_i 、标准差为 $\text{SE}(\tau_i)$ 的高斯函数表示,然后经逐点叠加得到的一条连续光滑的曲线^[45]。目前,概率密度估计是碎屑年龄谱分析方面使用的最主流的方法,许多常用年龄分析软件亦基于概率密度估计

原理,如处理 U-Pb 年龄常用的 Isoplot^[38]、处理裂变径迹年龄的 Binomfit^[44]等。

虽然概率密度估计法考虑了每个矿物颗粒同位素年龄的分析误差^[4],而且地质学家也在具体实践对这种方法进行了一些修正^[44,46],但是,从统计原理上,概率密度估计法仍不够完善,具体有以下几个原因:(1)碎屑年龄谱的概率密度估计曲线是经过所有单颗粒年龄的高斯函数叠加而得到,而每个高斯函数的带宽实际上是由其对应单颗粒年龄的分析误差所决定。因此,对于测试精度高、误差小的单颗粒年龄,高斯函数具有较小的宽度和显著的峰值。这些高质量的年龄数据对最终的年龄分布估计结果的贡献相应地较大;与此同时,其他一些误差相对较大的年龄数据,便被忽略或者是弱化。显然,概率密度估计过分突出数据样本中高质量年龄数据及其所在峰值年龄区间,而刻意忽略一些误差大的年龄和构造间歇期,造成某些构造间歇期跨度被拉长,年龄数据的测试误差值则被“加倍平滑”(double smoothing),导致最终整体统计误差也随之加倍。(2)如果数据精度普遍较高,即带宽较小,经过逐点叠加后,概率密度估计曲线将呈现尖锐、离散形态,不易识别主要峰值年龄区间;如果年龄数据普遍误差较大,带宽相应较大,得到过于宽泛、平滑的概率密度估计曲线,不仅降低了分辨率,也容易发生峰值偏离^[43,45,47]。

由此可见,虽然概率密度估计法具有应用广泛、表达直观等优点,但实际上,从统计学原理和过程来看,这种方法增加了统计误差,难以反映真实准确的年龄谱分布样式,进而影响合理的地质解释。

2 核密度估计法(Kernel Density Estimation)

核密度函数估计法,简称核密度估计,虽然与概率密度估计在表观上基本相同,但其统计学原理和方法完全不同。核密度估计是以数据样本点密度为基础,通过核函数来控制同一组样本中不同误差的数据对总体密度函数贡献的大小,使最终的估计结果更贴近实际情况。该方法已在多个研究领域,诸如军事^[48]、金融学^[49]、信号学^[50]、机械动力学^[51]、林学^[52]等得到广泛应用,是一种先进的密度估计法^[53-54]。目前,在地质年代学领域,已有部分少数国外学者应用该方法开展碎屑年龄谱分析^[22,47,55],国内至今尚无相关的理论或研究实例。

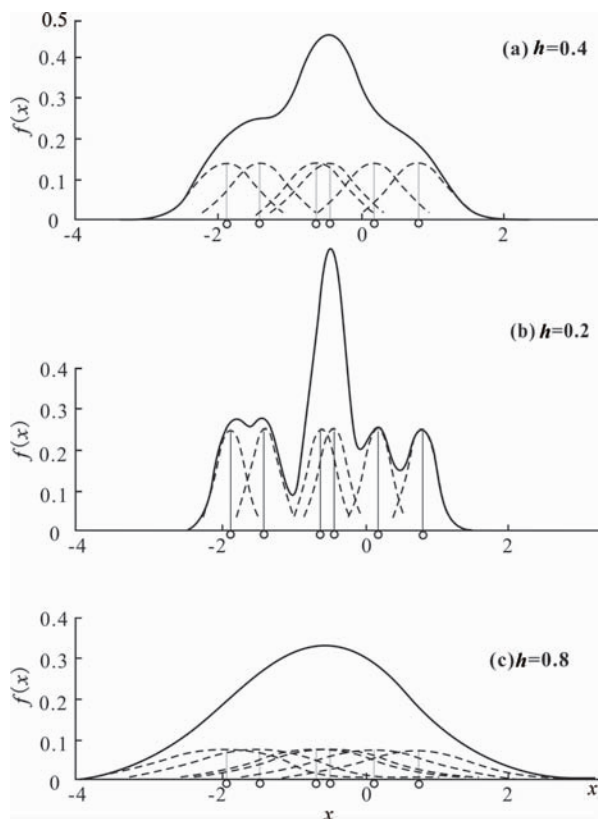
2.1 核密度估计原理

假设样本数据 X 服从概率密度分布总体 $f(x)$, $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示 X 的一组测量值,则 $f(x)$ 的核密度估计实际上是将一系列样本点 x_i 用平滑且峰值突出的核函数表示(图 2a 虚曲线),赋予大小为 $1/n$ 的权重;然后,将所有核函数逐点叠加得到一条光滑曲线(图 2a 实曲线),即核密度估计曲线,可由下式^[41]表示:

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (4)$$

其中 $K(\cdot)$ 表示核函数, h 表示核函数的带宽 (bandwidth), 控制曲线的平滑度和精确度。同时核函数 K 满足:

$$K(x) \geq 0, \int_{-\infty}^{+\infty} K(x) dx = 1 \quad (5)$$



圆圈和竖线表示样本数据点的位置;虚线表示位于每个数据点的核函数;粗实线表示核函数经叠加后的概率密度估计曲线。

图 2 不同带宽(h)对核密度估计曲线形态的影响
(修改自文献^[41])

Fig. 2 The influence of bandwidth value (h) on the curves of kernel density estimation

核函数的作用相当于权函数,可以根据距离 $(x-x_i)$ 分配各个样本点对总体密度估计贡献的不同程度,有高斯核函数(Gaussian)、三角核函数(triangular)及二次核函数(epanechnikov)等多种表达

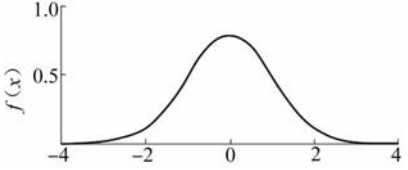
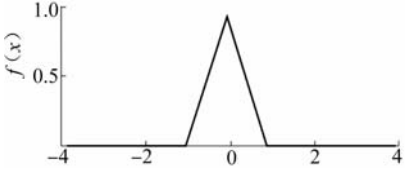
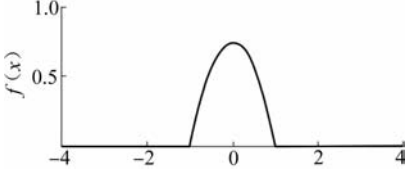
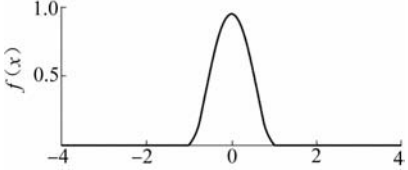
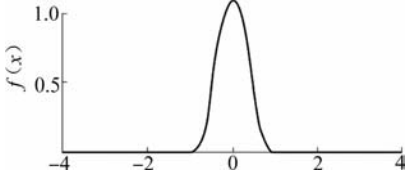
形式^[41],并对应不同的曲线形态(表 1),其中高斯函数是核函数中最常用的选项^[45,56]。

2.2 核密度估计特性——自适应变带宽

理论和模拟结果表明,核密度估计带宽(h)的选择是得到最佳估计结果的关键,而核函数的选择对估计结果的影响并不十分显著^[47]。选择合适的带宽可以估计样本的优势区间,也可避免其他噪音峰值的干扰(图 2a)。由于核函数曲线与横坐标轴之间围限区域的总面积始终恒定为 1,因此核函数曲线的高度会随着带宽的增大而减少。如果带宽取值过小,核函数对概率密度的分配会过于局限在 x 附近,造成曲线峰值尖锐、波动大、形态不稳定,无法识别年龄分布的总体特征(图 2b);如果带宽取值过大,距离较远的点会分担了对 x 的部分权重,曲线形态会过于平缓,分辨率降低,易丢失年龄分布的细节信息^[41,45](图 2c)。因此,最优带宽的合理选择非常关键,需要实现稳定性和分辨率之间的平衡。

在使用核密度估计法解决实际问题过程中,大多数使用了固定带宽($h=1.06 \sigma n^{-1/5}$, σ 表示数据样本的误差)。但是,地质上碎屑颗粒的物质来源具有多样性,表现为年龄组分多且含量差异大,而且每个样本年龄的误差范围不同,常用的固定带宽法并不适合碎屑颗粒年龄分布的统计要求。因此,对于碎屑颗粒同位素年龄谱的分布分析,使用自适应变带宽函数进行核密度估计,即带宽值可随数据密度的变化而自行进行适应性调整。当数据点比较稀疏的时候,带宽值增大,曲线相对平滑;当数据点比较密集时,带宽值减小,可以获得高分辨率的估计^[47]。实现自适应变带宽的方法,主要是基于积分均方误差(mean integrated squared error)原理,通过计算定义域内每个点的最优带宽值,得到不同的变带宽函数 $h(x)$ ^[48]。常用的变带宽函数有基于单个样本点数值的“气球带宽函数”^[57]、基于样本整体的“样本带宽函数”^[58]和综合上述二者特点的“扩散方程带宽函数”^[59]等。

表 1 常用核函数及其曲线形态^[41]
Table 1 Typical kernel functions and their graphic visualizings ^[41]

名称	表达式	图形
Gaussian	$K(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}x^2},x\in\mathbf{R}$	
Triangular	$K(x)=\begin{cases} 1- x , & x\in[-1,1] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	
Epanechnikov	$K(x)=\begin{cases} \frac{3}{4}(1-x^2), & x\in[-1,1] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	
Quartic	$K(x)=\begin{cases} \frac{15}{16}(1-x^2)^2, & x\in[-1,1] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	
Triweight	$K(x)=\begin{cases} \frac{35}{32}(1-x^2)^3, & x\in[-1,1] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$	

因此,核密度估计是从样本数据本身出发,利用其特有自适应带宽特点逐点改变带宽,最大限度贴近样本真实分布情况,不仅使峰值估计能够达到较高精度,而且有效提高了拟合曲线的灵活性,即便是应用于复杂多变的碎屑年龄谱分布样式分析,也能得到理想的估计结果。

2.3 核密度估计的优势

核密度估计与概率密度估计存在一定相似性,两者都是经过一系列正态分布逐点叠加,但两者在带宽选择上存在根本差异。核密度估计的带宽是由局部数据密度所决定的,其光滑度和分辨率在变带宽函数的驱动下会随数据密度变化而变化,而概率密度估计的带宽则是由样本分析误差决定。

为清晰展现核密度估计和概率密度估计之间的差别,并说明核密度估计法在碎屑年龄谱分布统计上的优势,本文分别使用这两种方法,对随机生成的3组数据样本(表2)和大兴安岭地区显生宙花岗岩锆石 U-Pb 年龄数据库^[60]进行密度估计分析。其中,核密度估计以高斯函数为内核,并应用“扩散方程带宽函数”实现带宽变换。

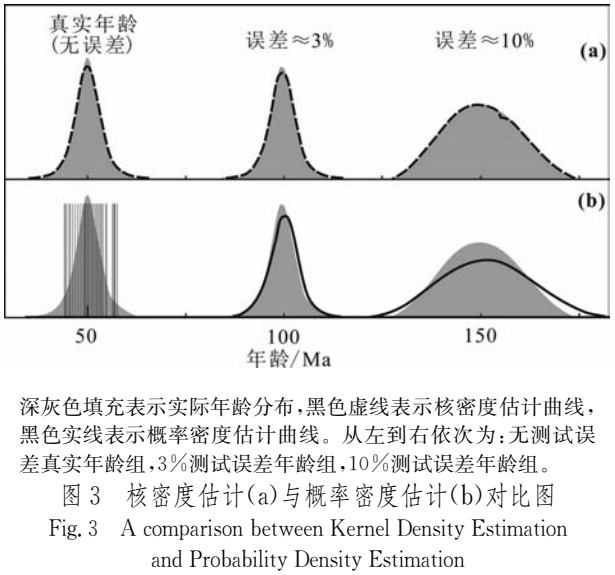
表 2 验证统计方法有效性和准确度的随机年龄数据表

Table 2 Random age dataset creating by EXCEL,
for testing KDE approach

编号	第 1 组		第 2 组		第 3 组	
	真实年龄 (无误差)/Ma	测量年龄/ Ma	误差 (±3%)/Ma	测量年龄/ Ma	误差 (±10%)/Ma	
1	44.21	94.04	2.82	126.41	12.64	
2	44.63	94.99	2.85	131.93	13.19	
3	45.63	95.45	2.86	133.80	13.38	
4	46.06	96.23	2.89	134.09	13.41	
5	46.57	96.49	2.89	135.90	13.59	
...	
46	54.88	103.74	3.11	163.10	16.31	
47	54.91	104.23	3.13	163.16	16.32	
48	56.44	105.26	3.16	163.50	16.35	
49	57.04	105.30	3.16	165.02	16.50	
50	57.68	108.39	3.25	173.53	17.35	

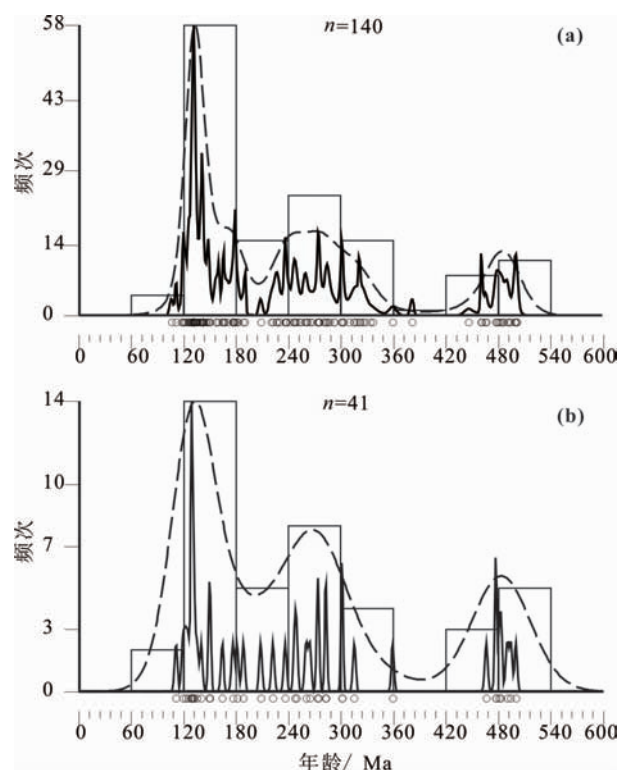
(1)随机数据样本分析。表2是利用EXCEL软件随机生成3组精度不同的数据样本,用于模拟3组不同测试误差的同位素年龄数据。第1组数据代表一组真实的同位素年龄组,精度极高、误差无限接近零,整组真实峰值位于(50±3) Ma 区间;第2、3组数据分别代表有误差的同位素年龄组,两组的测试误差分别约为3%和10%,两组的真实峰值年

龄分别为位于(100±3) Ma 和(150±10) Ma 区间。核密度估计结果表明(图3a),3组数据的估计峰值分别收敛于50 Ma、100 Ma、150 Ma,与实际峰值年龄区间基本一致,为理想无偏估计。而概率密度估计出现了比较大的偏差(图3b):由于第1组数据样本是不存在误差的真实年龄,所有高斯函数的带宽达到极小值,造成每个数据点的高斯函数曲线都呈尖峰形态,叠加后得到概率密度曲线也为一系列离散尖峰,无法识别峰值(图3b左图);第2、3组数据分别存在3%和10%的测试误差,两组数据的概率密度曲线呈单峰形态,但随着误差增大,概率密度曲线越来越趋于宽缓平滑,偏移量也越来越大。其中对于第3组测试误差为10%的数据(图3b右图),由于高斯函数对每个单颗粒年龄的测试误差都产生“双重平滑”效应,曲线分辨率明显降低,造成第三组数据的概率密度曲线过于平滑(oversmooth),峰值估计结果相对于真实峰值发生了大约3.4 Ma 偏移。可见,概率密度估计受数据精度影响较大,而核密度估计受数据测试精度影响相对较少,针对不同精度数据,均能有效展示其分布样式。



(2)锆石 U-Pb 年龄样本分析。图4数据来源于中国东北大兴安岭地区显生宙花岗岩锆石 U-Pb 年龄数据库^[60],其中大部分为 LA-ICP MS 年龄,少部分为 SHRIMP 和 TIMS 年龄,共计140个年龄样本。如果对整个数据库140个年龄样本进行密度估计,那么在核密度估计曲线中(图4a中虚线),可以清晰识别出480、260和130 Ma 处3个特征峰值;在概率密度估计曲线中(图4a中实线),也可以识别

出最优势的 130 Ma 峰值,但是在 200~350 Ma 区间和 440~500 Ma 区间曲线形态相对离散,呈锯齿状,估计效果并不理想。



(a)数据库中所有 140 个锆石 U-Pb 年龄的密度估计;(b)数据库中随机选取 41 个锆石 U-Pb 年龄的密度估计。横轴下密集圆圈表示年龄数据点位置。

图 4 中国东北大兴安岭地区显生宙花岗岩锆石 U-Pb 年龄数据核密度估计曲线(虚线)和概率密度曲线(实线)
(年龄数据来自文献[60])

Fig. 4 Kernel density estimation(dashed lines) and probability density estimation (solid lines) of zircon U-Pb ages of Phanerozoic granitoids in Great Xing'an Ranges, NE China

如果从 140 个年龄中随机任意抽取 41 个年龄样本数据,即在样本数量较少的情况下再次进行密度估计,两种曲线的形态都发生明显变化。其中概率密度曲线(图 4b 中实线)在数据样本减少的情况下分裂为一连串离散尖峰,无法分辨有效年龄信息,而核密度估计曲线(图 4b 中虚线)仍然表现为平滑的 3 个峰值,但 3 个峰值的位置出现明显偏移。可见,即便在样本数据较少的情况下,核密度估计仍然可以获得峰值信息;而概率密度估计结果受样本数量影响较大。

综上所述,核密度估计法均以数据本身为基础变换带宽,准确揭示数据分布样式;这种自适应带宽变换特性,提高了核密度估计使用的灵活性、结果的准确性,尤其是适合一些测试标准差较大的同位素

年代学数据(如裂变径迹年龄)或一些年龄数据有限的研究新区等复杂情况,最大限度地从数据中提取有效信息。

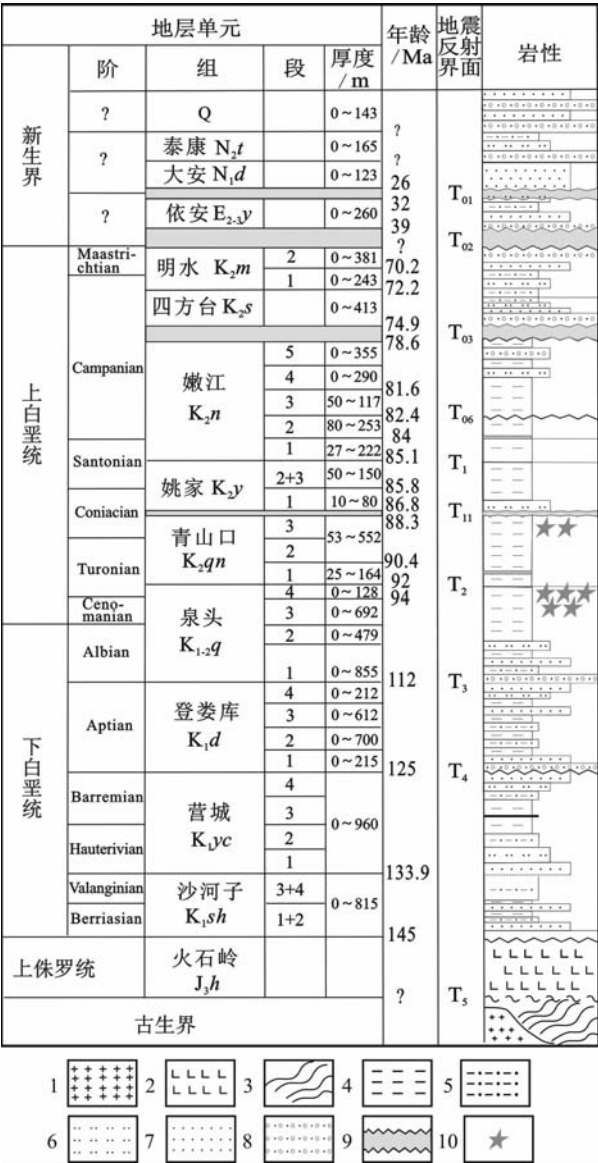
3 松辽盆地碎屑磷灰石裂变径迹年龄的核密度估计

3.1 研究区概况

松辽盆地是中国东部最重要的陆相盆地,它不仅盛产石油,而且保存有近乎完整的白垩纪地质记录^[61-62](图 5),为研究中国东部构造和沉积事件提供了重要依据。构造上,松辽盆地是一个断陷-拗陷叠合盆地,其构造演化可以划分为早期断陷、中期拗陷和晚期反转。目前普遍认为早白垩世早期火石岭组至登娄库组为同裂陷阶段,整个盆地由一系列断陷盆地组成;而从早白垩世末期泉头组时期开始进入裂后热沉降阶段,形成了统一的大型拗陷盆地;至晚白垩世盆地进入构造反转阶段,形成大庆长垣等规模巨大的反转构造^[63]。

近年来,通过对新的高品质地震剖面构造解释、松科 1 井多学科综合研究等证据表明^[63-65],盆地反转隆升可能开始于青山口组末期—姚家组初期。在盆地晚白垩世和新生代地层中识别出显著的沉积间断和区域性角度不整合面,意味着松辽盆地在裂后期演化阶段经历了多幕次大幅度构造隆升事件。然而,这种幕式反转隆升到底有几幕,每幕隆升对应的具体时间界限等重要科学问题还不清楚。由于新生代沉积记录在整个盆地范围内的大规模缺失,很难应用传统的沉积-构造解析法来研究盆地晚白垩世—新生代反转隆升的历史。

磷灰石裂变径迹定年技术具有方法学比较成熟、封闭温度低、磷灰石广泛存在等特点,而且盆地内部岩心样品中碎屑磷灰石经历了物源区冷却剥露阶段和沉积成岩后埋藏升温、再隆升冷却等一系列复杂的构造-热演化过程,所以表现出复杂的年龄分布特征。一些样品埋藏比较浅,且靠近隆起区,在沉积成岩埋藏过程中没有经历过热重置,因此保留了物源区的热史信息;而一些靠近中央拗陷区的样品,地温梯度高,埋深大,只记录了比较年轻的热史信息。下面试图用核密度估计法分析盆地内位于不同构造部位的 30 口钻井岩心样品的碎屑磷灰石裂变径迹年龄分布样式,来精确约束松辽盆地裂后期主要的隆升降温事件的幕次及时间界限。



1—花岗岩;2—火山岩;3—变质岩;4—泥岩;5—粉砂岩;6—细砂岩;7—中砂岩;8—粗砂岩;9—沉积间断;10—裂变径迹定年取样点。

图5 松辽盆地地层柱状图
Fig. 5 Late Jurassic-Cenozoic stratigraphy of the Songliao Basin

3.2 磷灰石裂变径迹定年及核密度估计

主要选取覆盖松辽盆地北部东南隆起区、东北隆起区、北部倾没区、中央坳陷区、西部斜坡区等构造单元的30个钻井岩心砂岩样品作为研究对象,取样地层为泉头组三、四段和青山口组二、三段顶部,取样深度为现今埋深500~1500 m。获得岩心样品首先经过粉碎,重矿物分选、提纯得到磷灰石颗粒;每个样品优选晶形好、颗粒大的磷灰石进行制靶与蚀刻,统计其自发径迹;送入反应堆辐照后,统计其诱发径迹。最终计算出所有颗粒的单颗粒年龄和样品本身的中心年龄。辐照中子通量采用CN5标

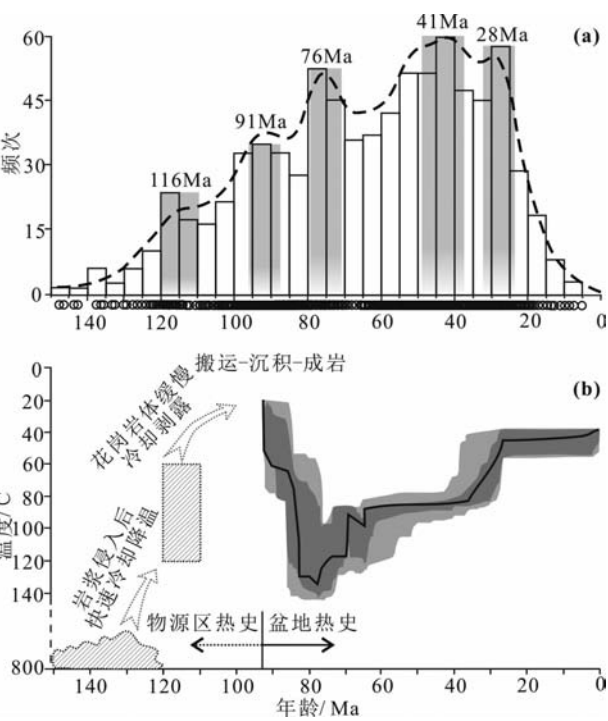
准玻璃,Zeta常数为 389.4 ± 19.2 。

由于油田对钻井岩心取样重量的限制,本研究的松辽盆地磷灰石裂变径迹定年测试样本数量偏少,平均每个样品只测试了27个磷灰石颗粒,如果直接采用二项式拟合法进行年龄组分分解^[44,46],所得到的年龄组分没有统计学意义。此外,由于碎屑磷灰石U含量偏低,定年测试标准差普遍较大,单颗粒测试标准差可达20%甚至更多,因此,如果应用概率密度估计法对整体年龄进行分析,这些年龄数据会被高斯函数“双重平滑”,造成分析误差的加倍或峰值年龄的偏移。为了提高年龄统计分析的精度,利用核密度估计软件(Density Plotter 6.3)^[47]对研究区30个样品中804个磷灰石单颗粒裂变径迹年龄进行了统计分析。核函数采用高斯函数,并应用“扩散方程带宽函数”实现带宽变换,最终获得了多峰分布的年龄分布样式,包括5个高峰区间及其对应的峰值年龄,分别为(图6a):120~110 Ma,峰值年龄为116 Ma;95~88 Ma,峰值年龄为91 Ma;80~73 Ma,峰值年龄为76 Ma;52~39 Ma,峰值年龄为41 Ma;32~26 Ma,峰值年龄为28 Ma(图6a)。

为进一步验证峰值区间,阐明盆地构造热演化史,采用HeFTy 1.8.2软件^[66]对盆地东南隆起区长54井的样品进行热史反演模拟,退火模型为默认的Ketcham模型^[67],采用Monte Carlo拟合方法,T-t曲线模拟数目为20000条,利用过井地震剖面、钻井分层数据、井区镜质体反射率(R_o)数据作为热史模拟的地质约束条件,得到最佳拟合曲线如图6b所示。

3.3 碎屑磷灰石裂变径迹年龄分布样式的地质解释

(1)120~110 Ma:物源区花岗岩的快速冷却降温。核密度估计曲线中第一个峰值区间出现在120~110 Ma,峰值年龄为116 Ma。由于所有样品取样点地层年龄均小于100 Ma,所以该峰值区间主要来自样品中一部分未经历热重置的碎屑磷灰石年龄,直接反映了源区热历史。研究^[63]表明,在泉头组和青山口组时期,盆地以西部物源为主,沉积物主要来自于盆地西缘的大兴安岭地区花岗岩的剥露。根据大兴安岭显生宙花岗岩锆石U-Pb年龄分布样式(图4a)可见,该地区最强烈的岩浆侵入期为中晚侏罗世一早白垩世中期,并在130 Ma达到顶峰,随后快速减弱。日本科学家Himeno团队^[68]对大兴安岭地区花岗岩的锆石裂变径迹研究发现,在115~110 Ma大兴安岭花岗岩经历了8~15 °C/Ma的快速冷却



(a)一核密度估计结果,其中横轴下方圆圈表示数据点位置;(b)一构造-热演化曲线,左半部分为推测的物源区热史演化路径,右半部分为盆地长 54 井构造-热史曲线,纵轴(温度)在 140~800 °C 区间不成比例。
图 6 松辽盆地碎屑磷灰石裂变径迹年龄核密度估计及构造-热史模拟结果

Fig. 6 Kernel Density Estimation of fission track ages of detrital apatite grains (a) and tectono-thermal history of the Songliao Basin (b)

降温,与这一研究结果一致。因此,120~110 Ma 峰值区间进一步限定了大兴安岭地区早白垩世岩浆大规模侵入后一次快速降温阶段的具体时间界限。

(2)95~88 Ma:约束地层年龄或 Turonian 阶快速隆升事件。核密度估计曲线中第二个峰值区间出现在 95~88 Ma,峰值年龄为 91 Ma。根据白垩纪大陆科学钻(松科一井)所确定的高精度年代学格架^[62,69-70],本文的两个主要取样层位中,泉头组三、四段的年龄为 94~92 Ma,青山口组二、三段的年龄为 90.4~88.3 Ma。核密度估计曲线上的第二个峰值区间,可以与松科一井其他定年方法所取得的结果相互补充,准确地将泉头组三、四段至青山口组二、三段的地层年龄限定在 95~88 Ma。此外,最新松辽盆地构造^[64]和区域大地构造^[65,71-73]研究成果表明,在 90 Ma 左右太平洋板块发生一次重大运动学重组事件,大洋板块运动方向和速度均发生明显改变,对东亚大陆边缘产生强烈挤压,东北盆地群自东向西被整体抬升,松辽盆地内的物源方向由

西部物源为主快速转变为东部物源为主,并进入裂后期构造反转阶段。因此,本峰值区间还可能反映 Turonian 阶快速隆升事件的准确峰值为 91~90 Ma,即在区域大规模隆升背景下,古地形发生明显变化,周缘的物源区快速地隆升冷却剥露,造成沉积通量突然增加,大量的沉积物被迅速搬运到盆地中。

(3)80~73 Ma:嫩江运动。80~73 Ma 的峰值区间是核密度估计曲线在白垩纪时期最显著的特征,该峰值区间很好地约束了嫩江组末期—四方台组沉积前盆地构造抬升运动的起始时间,这次构造运动造成了盆地沉积物普遍降温 and 剥露,湖盆大规模缩小,一般被称为“嫩江运动”。关于嫩江运动的准确起始时间,一直未有定论。有的研究认为“嫩江运动”时间在 73 Ma^[63]或 70 Ma^[74]左右。Scott 等将松科一井的年代地层学数据与全球白垩纪剖面 and 层型标准点(GSSP)数据库(CRETCS3.1)进行精细对比^[70],结果显示在嫩江组和四方台组之间至少存在 4 Ma 沉积间断,从而认为嫩江运动的可能的起始时间是 75~79 Ma。但是新的地震剖面的构造解释发现,除了嫩江组和四方台组之间存在明显角度不整合之外,在嫩江组中上部和四方台组中下部也发育有多个次级的沉积间断界面。这些新发现的小的不整合面以及 80~73 Ma 的显著峰值区间,均表明“嫩江运动”的持续时间可能比松科一井所确定的 4 Ma 要更长,可能达到 7 Ma 左右,即从嫩江组中晚期开始,盆地就经历了频繁的升降运动,至嫩江组末期(80~79 Ma)盆地整体隆升剥露,这种大规模的隆升至少持续到四方台组初期才开始震荡式的衰落,盆地再次沉降。因此,80~73 Ma 峰值区间,更准确地将“嫩江运动”的肇始和終了的时间分别厘定为 80 Ma 和 73 Ma。

(4)52~39 Ma,32~26 Ma:新生代多幕次、大幅度的隆升构造。松辽盆地的新生代经历了复杂的构造隆升和剥露运动,造成大量晚白垩世地层被抬升剥蚀,新生代沉积物厚度薄,沉积范围非常有限,依安组、大安组和泰康组主要分布在松辽盆地的中、西部地区,其中在全盆地范围内缺失整个古新世和早始新世的地层。对新生代构造隆升事件的研究以往只能局限于少量的沉积记录和碎屑磷灰石年龄的粗略估计^[75]。尽管缺乏完整的新生代层序以及地震反射等其他地质记录,但是核密度估计曲线的变化趋势却揭示了新生代期间松辽盆地曾发生过多幕次、大幅度的隆升运动。白垩纪末期—新生代初期,

盆地开始大规模的构造隆升,表现为裂变径迹年龄频次逐渐增多,直至最大的峰值区间出现在 52~39 Ma,指示着新生代构造运动的主幕时限,在地震剖面上表现为显著的 T02 高角度不整合面,盆地内大庆长垣、东南隆起等大型隆升构造主要在该时期形成。值得注意的是,这次大规模的隆升是区域性的,在中国东部许多盆地中均可追索,可能与印度洋板块与太平洋板块新生代期间一次重大的运动学调整有关^[76];然后是一个 5~10 Ma 构造间歇期,在这个短暂的构造平静期,沉积了依安组(E₂—E₃)地层;之后,新生代的第二个峰值区间 32~26 Ma 出现,盆地再次发生隆升降温,这是最后一幕的大规模隆升降温事件,也是主要隆升构造的最终定型期。由于中新世后(23~0 Ma)的磷灰石裂变径迹年龄存在较大的分析标准差,所以,暂时还无法对松辽盆地最末期的演化做出可靠的约束。根据松辽盆地西部斜坡区新近纪孢粉组合研究成果^[77-78],可以推测在 26 Ma 之后到 Aquitanian 阶(23.03~20.44 Ma)时期盆地构造活动显著减弱,逐渐沉积了大安组(20.44~11.62 Ma)、泰康组(11.62~3.6 Ma)地层。

4 结论

(1)论文引入了碎屑颗粒年龄数据统计分析的新方法——核密度估计法。该方法以样本点的密度和误差为基础,通过核函数控制同一组样本数据中不同误差的数据点对总体密度估计的贡献大小,采用自适应可变换带宽函数,逐个地对每个年龄数据改变函数带宽。因此,核密度估计法受样本测试精度的影响小,可以有效地克服频率分布估计法和概率密度估计法的固有缺陷,即便在年龄样本数量较少、标准差较大的情况下,也可以通过该方法提取有用的信息,最大限度贴近年龄的真实分布样式。核密度估计法尤其适用于裂变径迹等标准差相对较大的同位素年龄数据分析和复杂的多来源的碎屑颗粒年龄谱的无偏估计。

(2)利用核密度估计法对大兴安岭地区显生宙花岗岩锆石 U-Pb 年龄数据和松辽盆地碎屑磷灰石年龄数据进行了密度估计,并获得了合理的年龄分布样式。根据核密度估计的结果,大兴安岭地区花岗岩的侵入主要有早奥陶世(480 Ma)、中一晚二叠世(260 Ma)和早白垩世(130 Ma)等 3 个幕次,其中早白垩世(130 Ma)为花岗岩侵入的主幕。在核密

度估计曲线上可以识别出松辽盆地裂后期主要有 5 次大规模隆升降温事件及对应的时间界限:第一幕,120~110 Ma,对应盆地西部物源区,即大兴安岭花岗岩侵入后的快速冷却降温;第二幕,95~88 Ma,进一步准确约束了泉头组三、四段—青山口组二、三段的地层年龄,还可能反映了 Turonian 阶的松辽盆地东部区域性快速隆升事件;第三幕,80~73 Ma,对应嫩江组末期—四方台组沉积初期盆地大规模的构造抬升运动,约束了“嫩江运动”的准确的起始时间;第四幕和第五幕分别为 52~39 Ma 和 32~26 Ma,对应松辽盆地新生代期间发生的多幕次、大幅度的隆升事件,东南隆起、大庆长垣等盆地内大型隆起构造主要形成于始新世中期,并于渐新世末期—中新世早期最终定型。

参考文献

- [1] Bernet M, Garver J I. Fission-track analysis of detrital zircon [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2005, 58(1): 205-237.
- [2] Reiners P W, Ehlers T A, Zeitler P K. Past, present, and future of thermochronology [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2005, 58(1): 1-18.
- [3] Eynatten H, Dunkl I. Assessing the sediment factory: The role of single grain analysis [J]. Earth-Science Reviews, 2012, 115(1/2): 97-120.
- [4] Gehrels G. Detrital zircon U-Pb geochronology: Current methods and new opportunities [M]//Cathy B, Antonio A. Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances. Oxford: John Wiley & Sons, 2011: 47-62.
- [5] 裴先治,李佐臣,李瑞保,等.祁连造山带东段早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄:源区特征和沉积时代的限定 [J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 205-224.
- [6] 陈熠,方小敏,宋春晖,等.准噶尔盆地南缘新生代沉积物碎屑锆石记录的天山隆升剥蚀过程 [J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 225-233.
- [7] 王非,师文贝,朱日祥. ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学中几个重要问题的讨论 [J]. 岩石学报, 2014, 30(2): 326-340.
- [8] 曹凯,王国灿, van der Peter B, 等. 热年代学年龄温度法和年龄高程法的应用条件:对采样策略及年龄表达的启示 [J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 347-357.
- [9] 王国灿. 沉积物源区揭露历史分析的一种新途径:碎屑锆石和磷灰石裂变径迹热年代学 [J]. 地质科技情报, 2002, 21(4): 35-40.
- [10] 沈传波,梅廉夫,凡元芳,等. 磷灰石裂变径迹热年代学研究的进展与展望 [J]. 地质科技情报, 2005, 24(2): 57-63.
- [11] 袁万明,杨志强,张招崇,等. 安徽省黄山山体的隆升与剥

- 露[J]. 中国科学: D辑, 2011, 41(10): 1435-1443.
- [12] 常健, 邱楠生, 李佳蔚, 等. 塔里木盆地与南天山的耦合关系: 来自(U-Th)/He 年龄的新证据[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 234-243.
- [13] Shen C B, Donelich R A, O'sullivan P B, et al. Provenance and hinterland exhumation from LA-ICP-MS zircon U-Pb and fission-track double dating of Cretaceous sediments in the Jiangnan Basin, Yangtze block, Central China[J]. Sedimentary Geology, 2012, 281: 194-207.
- [14] Pierce E L, Hemming S R, Williams T, et al. A comparison of detrital U-Pb zircon, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ hornblende, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ biotite ages in marine sediments off East Antarctica: Implications for the geology of subglacial terrains and provenance studies[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 156-178.
- [15] Roberts N M, Spencer C J. The zircon archive of continent formation through time[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2015, 389: 197-225.
- [16] Brewer I D, Burbank D W, Hodges K V. Downstream development of a detrital cooling-age signal: Insights from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ muscovite thermochronology in the Nepalese Himalaya[J]. Geological Society of America Special Paper: Penrose Conference Series, 2006, 398: 321-338.
- [17] Roy M, van de Flierdt T, Hemming S R, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of hornblende grains and bulk Sm/Nd isotopes of circum-Antarctic glacio-marine sediments: Implications for sediment provenance in the southern ocean[J]. Chemical Geology, 2007, 244(3/4): 507-519.
- [18] Vermeesch P, Avigad D, McWilliams M O. 500 m. y. of thermal history elucidated by multi-method detrital thermochronology of North Gondwana Cambrian sandstone (Eilat area, Israel)[J]. Geological Society of America Bulletin, 2009, 121(7/8): 1204-1216.
- [19] 周久龙, 罗照华, 贺怀宇, 等. 河北大庙铁矿床黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及其地质意义[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 110-117.
- [20] 胡荣国, 邱华宁, Wijbrans J, 等. 柴北缘鱼卡多硅白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其外来 ^{40}Ar 来源探讨[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 216-227.
- [21] Ruiz G M H, Seward D, Winkler W. Detrital thermochronology: A new perspective on hinterland tectonics, an example from the Andean Amazon Basin, Ecuador[J]. Basin Research, 2004, 16(3): 413-430.
- [22] Fillon C, Gautheron C, Vander B P. Oligocene-Miocene burial and exhumation of the Southern Pyrenean foreland quantified by low-temperature thermochronology[J]. Journal of the Geological Society, 2013, 170(1): 67-77.
- [23] Yuan W, Dong J, Carter A, et al. Mesozoic-Tertiary exhumation history of the Altai Mountains, northern Xinjiang, China: Constraints from apatite fission track data[J]. Tectonophysics, 2006, 412(3/4): 183-193.
- [24] 高洪雷, 刘红旭, 何建国, 等. 东天山地区中-新生代隆升-剥露过程: 来自磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 249-260.
- [25] Kröner A, Wan Y S, Liu X M, et al. Dating of zircon from high-grade rocks: Which is the most reliable method[J]? Geoscience Frontiers, 2014, 5(4): 515-523.
- [26] 陈文, 万渝生, 李华芹, 等. 同位素地质年龄测年技术及应用[J]. 地质学报, 2001, 85(11): 1917-1949.
- [27] Cocherie A, Robert M. Laser ablation coupled with ICP-MS applied to U-Pb zircon geochronology: A review of recent advances[J]. Gondwana Research, 2008, 14(4): 597-608.
- [28] Wiedenbeck M, Bédard L P, Bugoi R, et al. GGR biennial critical review: Analytical developments since 2012 [J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 2014, 38(4): 467-512.
- [29] 杨江海, 殷鸿福. 高精度锆石 U-Pb 年代学 10 年发展: 浅谈中国科学家的机遇和挑战[J]. 地学前缘, 2014, 21(2): 93-101.
- [30] 杨亚楠, 李秋立, 刘宇, 等. 离子探针锆石 U-Pb 定年[J]. 地学前缘, 2014, 21(2): 81-92.
- [31] Andersen T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation[J]. Chemical Geology, 2005, 216(3/4): 249-270.
- [32] 朱文斌, 万景林, 舒良树, 等. 裂变径迹定年技术在构造演化研究中的应用[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 593-600.
- [33] 闫义, 林舸, 李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(2): 184-190.
- [34] 金中国, 周家喜, 黄智龙, 等. 贵州务川—正安一道真地区铝土矿碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(6): 226-239.
- [35] 王策, 梁新权, 周云, 等. 莺歌海盆地东侧物源年龄标志的建立: 来自琼西 6 条主要河流碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的研究[J]. 地学前缘, 2015, 22(4): 277-289.
- [36] 李忠, 高剑, 郭春涛, 等. 塔里木块体北部泥盆—石炭纪陆缘构造演化: 盆地充填序列与物源体系约束[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 35-52.
- [37] 赵红格, 刘池洋, 王海然, 等. 鄂尔多斯盆地西北缘早—中侏罗世延安期碎屑锆石 LA-ICP-MS 定年及其物源意义[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 184-193.
- [38] Ludwig K. User's manual for Isoplot 3. 75, a geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2012, 5: 1-75.
- [39] Sircombe K N. AgeDisplay: An EXCEL workbook to evaluate and display univariate geochronological data using binned frequency histograms and probability density distributions [J]. Computers and Geosciences, 2004, 30(1): 21-31.
- [40] Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. Detrital zircon analysis of the sedimentary record[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 277-303.
- [41] Silverman B W. Density Estimation for Statistics and Data Analysis[M]. London: Chapman and Hall, 1986: 1-178.
- [42] Hurford A, Fitch F, Clarke A. Resolution of the age structure of the detrital zircon populations of two Lower Creta-

- aceous sandstones from the Weald of England by fission track dating[J]. Geological Magazine, 1984, 121(4): 269-277.
- [43] Galbraith R. The trouble with “probability density” plots of fission track ages[J]. Radiation Measurements, 1998, 29(2): 125-131.
- [44] Brandon M T. Probability density plot for fission-track grain-age samples[J]. Radiation Measurements, 1996, 26(5): 663-676.
- [45] Galbraith R. On plotting OSL equivalent doses[J]. Ancient TL, 2010, 28(1): 1-10.
- [46] Brandon M T. Decomposition of fission-track grain-age distributions[J]. American Journal of Science, 1992, 292: 534-564.
- [47] Vermeesch P. On the visualisation of detrital age distributions[J]. Chemical Geology, 2012, 312: 190-194.
- [48] 于传强, 郭晓松, 张安, 等. 基于估计点的滑动窗宽核密度估计算法[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 231-235.
- [49] 唐林俊, 杨虎, 张洪阳. 核密度估计在预测风险价值中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2006, 35(10): 29-35.
- [50] 叶菲, 罗军, 高兴荣, 等. 基于滑动窗宽的非参数变宽直方图方法研究[J]. 现代防御技术, 2014, 42(2): 106-110, 149.
- [51] 张保强, 陈国平, 郭勤涛. 结构动力学模型确认问题的核密度估计方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 29-36.
- [52] 崔恒建, 王雪峰. 核密度估计及其在直径分布研究中的应用[J]. 北京林业大学学报, 1996, 18(2): 67-72.
- [53] 李存华, 孙志挥, 陈耿, 等. 核密度估计及其在聚类算法构造中的应用[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(10): 1712-1719.
- [54] 尹训福, 郝志峰, 杨晓伟. 快速核密度估计算法研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(31): 1-4.
- [55] Clift, P D, Carter A, Nicholson U, et al. Zircon and apatite thermochronology of the Nankai Trough accretionary prism and trench, Japan; Sediment transport in an active and collisional margin setting[J]. Tectonics, 2013, 32(3): 377-395.
- [56] Berger G. An alternate form of probability-distribution plots for DE values[J]. Ancient TL, 2010, 28(1): 11-21.
- [57] Loftsgaarden D O, Quesenberry C P. A nonparametric estimate of a multivariate density function[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1965, 36(3): 1049-1051.
- [58] Breiman L, Meisel W, Purcell E. Variable kernel estimates of multivariate densities[J]. Technometrics, 1977, 19(2): 135-144.
- [59] Botev Z I, Grotowski J F, Kroese D P. Kernel density estimation via diffusion[J]. Annals of Statistics, 2010, 38: 2916-2957.
- [60] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-30.
- [61] Wang C, Feng Z, Zhang L, et al. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SK1 borehole sites in Songliao Basin, northeast China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 385: 17-30.
- [62] 王璞珺, 赵然磊, 蒙启安, 等. 白垩纪松辽盆地: 从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 99-117.
- [63] Feng Z Q, Jia C Z, Xie X N, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, Northeast China[J]. Basin Research, 2010, 22(1): 79-95.
- [64] Song Y, Ren J, Stepashko A A, et al. Post-rift geodynamics of the Songliao Basin, NE China: Origin and significance of T11 (Coniacian) unconformity[J]. Tectonophysics, 2014, 634: 1-18.
- [65] Song Y, Stepashko A A, Ren J. The Cretaceous climax of compression in Eastern Asia: Age 87-89 Ma (late Turonian / Coniacian), Pacific cause, continental consequences[J]. Cretaceous Research, 2015, 55: 262-284.
- [66] Ketcham R A. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2005, 58(1): 275-314.
- [67] Ketcham R A, Donelick R A, Carlson W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales[J]. American Mineralogist, 1999, 84: 1235-1255.
- [68] Himeno O, Ohira H, Liu Z, et al. Provenance ages of Cretaceous strata in the Songliao Basin, Northeast China inferred from fission track data[J]. International Geology Review, 2001, 43(10): 945-952.
- [69] Wan X, Zhao J, Scott R W, et al. Late Cretaceous stratigraphy, Songliao Basin, NE China: SK1 cores[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 385: 31-43.
- [70] Scott R W, Wan X, Wang C, et al. Late Cretaceous chronostratigraphy (Turonian-Maastrichtian): SK1 core Songliao Basin, China[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(4): 357-367.
- [71] Stepashko A A. The Cretaceous dynamics of the Pacific plate and stages of magmatic activity in Northeastern Asia[J]. Geotectonics, 2006, 40(3): 225-235.
- [72] Stepashko A A. Spreading cycles in the Pacific Ocean[J]. Oceanology, 2008, 48(3): 401-408.
- [73] Norton I O. Speculations on Cretaceous tectonic history of the northwest Pacific and a tectonic origin for the Hawaii hotspot[J]. Geological Society of America, Special Papers, 2007, 430: 451-470.
- [74] 侯启军, 冯志强, 冯子辉, 等. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 21-103.
- [75] 方石, 张志强, 刘招君, 等. 松辽盆地新生代热演化及地层定年[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(5): 923-928.
- [76] Ren J, Tamaki K, Li S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. Tectonophysics, 2002, 344: 175-205.
- [77] Wan C, Sun Y, Xue Y, et al. Neogene palynological assemblages in the west slope of Songliao Basin and their geological implications[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(10): 2486-2497.
- [78] 薛云飞, 万传彪. 松辽盆地来 D13 井地层划分对比研究[J]. 微体古生物学报, 2015, 32(1): 28-42.