

青海都兰县哈日扎多金属矿区构造活动的磷灰石 裂变径迹分析

孙非非¹ 朱传宝¹ 袁万明² 张爱奎¹ 马忠元¹ 郝娜娜² 冯云磊²

1 (青海省第三地质矿产勘查院 西宁 810029)

2 (中国地质大学 北京 100083)

摘要 通过采集哈日扎多金属矿区不同矿带不同岩性的样品,进行磷灰石裂变径迹年代学分析,探讨矿区的构造演化特征。磷灰石裂变径迹年龄于 120–60.2 Ma 变化,具体可分为 120–93 Ma、78 Ma 和 66–60 Ma 三个年龄组,较好地体现了该地区经历不同构造隆升剥蚀作用,120–93 Ma 和 66–60 Ma 分别代表冈底斯地体、喜马拉雅地体先后于早白垩世、晚白垩世时期向北俯冲并与北侧地块碰撞–汇聚的体现,78 Ma 是区域上低级变质作用的反映。磷灰石裂变径迹模拟结果显示,不同样品地质热历史相似,分为三个阶段:160–90 Ma、90–20 Ma、20 Ma 至今,三个阶段分别隆升 0.28 km、1.40 km、1.00 km,总的隆升量为 2.68 km,第三阶段代表青藏高原及周缘新生代重大隆升期,是印度板块与欧亚板块碰撞后持续挤压和后期拉张环境下的整体强烈隆升。

关键词 裂变径迹, 构造活动, 磷灰石, 东昆仑, 青海省

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.120501

Apatite fission track analysis of tectonic activity in Harizha polymetallic ore district, Dulan county, Qinghai province

SUN Feifei¹ ZHU Chuanbao¹ YUAN Wanming¹ ZHANG Aikui²
MA Zhongyuan¹ HAO Nana² FENG Yunlei²

1(Qinghai Third Geology and Mineral Exploration Institute, Xining 810029, China)

2(China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract Background: Harizha polymetallic ore district is located in eastern section of east Kunlun mountains, Qinghai province and belongs to multicycle magmatic arc belt in middle of east Kunlun. A total of four large scale mineralizing zones have been discriminated in north area and mainly fall into tectonic altered rock type. **Purpose:** The tectonic evolution characteristics of Harizha polymetallic ore district is discussed by analyzing the samples with different lithologies collected from different ore belts. **Methods:** The fission track age of apatite was used to calculate the absolute uplift rate of the plateau. **Results:** The apatite fission track ages range from 120 Ma to 60 Ma and could be divided into three units: 120–93 Ma, 78 Ma and 66–60 Ma, which reflected the various tectonic uplift denudation in this region. Units of 120–93 Ma and 66–60 Ma respectively represent the stages when Gangdise terrain and Himalayan terrain subducted to the north, collided and converged with the northern block in early cretaceous and late cretaceous successively. Age of 78 Ma shows the regional low-grade metamorphism. **Conclusion:** The simulation

中国地质调查局地质调查工作项目(No.2011-03-04-06)、国家自然科学基金(No.41172088、No.40872141)和青海省地质调查局项目(青地调勘 2013-103)资助

第一作者: 孙非非, 女, 1986 年出生, 2009 年毕业于泰山学院, 现硕士研究生, 主要从事地质与矿产勘查工作

Supported by China Geological Survey Project (No.2011-03-04-06), National Natural Science Foundation of China (No.41172088, No.40872141) and Geological Survey Project of Qinghai Provincial Bureau (Qinghai geological survey 2013-103)

First author: SUN Feifei, female, born in 1986, graduated from Taishan University in 2009, master student, mainly engaged in geological and mineral prospecting work

收稿日期: 2016-05-04, 修回日期: 2016-08-27

results of apatite fission track reveal that different samples have the similar geological thermal history, which is divided into three stages: 160–90 Ma, 90–20 Ma and 20–0 Ma. The amounts of uplift of these three stages are approximately 0.28 km, 1.40 km and 1.00 km, with 2.68 km as the total amount of uplifting. The stage of 20–0 Ma represents a major cenozoic uplifting in Tibetan plateau and its periphery, which is the result of continuous pressing after the collision between Indian plate and Eurasian plate and the strong uplift under the extension environment afterwards.

Key words Fission track, Tectonic event, Apatite, Eastern Kunlun mountains, Qinghai province

哈日扎多金属矿床是青海省近年来新发现的新型矿产勘查区, 主要成矿类型为斑岩型和构造蚀变岩型, 以往主要进行基础地质和找矿勘查工作, 探讨了哈日扎斑岩型铜矿床特征、成岩成矿环境和找矿潜力^[1-3], 获得了含矿花岗闪长斑岩锆石 U–Pb 年龄为 $(234.5 \pm 4.8) \text{ Ma}$ ^[4-7], 通过锆石裂变径迹分析方法探讨了区内构造活动和成矿时代。不过, 区内晚白垩世以来构造活动状况尚不清晰, 本文将通过矿区不同地质体的磷灰石裂变径迹年代学分析研究, 讨论构造演化历史。

1 地质背景

参照青海省板块构造研究成果^[8-10], 研究区(图1)大地构造位置属东昆中多旋回岩浆弧带, 北接祁漫塔格–都兰新元古代–中元古代缝合带, 南邻东昆

中新元古代–早古生代缝合带。成矿区带的划分上属伯喀里克–香日德印支期金–铅、锌(铜、稀有、稀土)成矿带。区内古老变质岩系发育, 华力西期、印支期构造活动频繁、强度大, 构造作用较复杂, 成矿作用类型多样。

区域上北西向断裂构造系广泛发育, 具有长期活动性; 其次是北东向构造, 大致存在有晚古生代和中生代两期构造活动的特征。研究区出露的地层主要有古元古代白沙河岩组片麻岩、片岩及碳酸盐岩。岩浆活动强烈, 侵入岩主要出露早二叠世花岗闪长岩、(似斑状)二长花岗岩, 早侏罗世二长花岗岩、花岗闪长斑岩等。晚三叠世鄂拉山组晶屑凝灰熔岩、英安岩、含集块凝灰熔岩、英安质熔岩角砾岩等分布广泛。

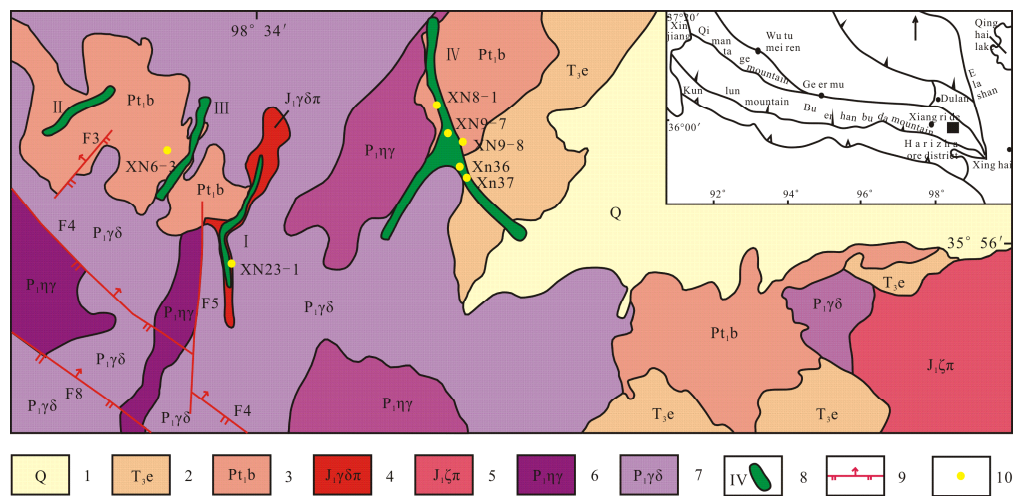


图1 哈日扎多金属矿区地质图与样品位置

1–第四系, 2–晚三叠世鄂拉山组晶屑凝灰岩和英安岩, 3–古元古代白沙河组片麻岩、片岩、砂岩和大理岩, 4–早侏罗世花岗闪长斑岩, 5–早侏罗世钾长花岗岩, 6–早二叠世二长花岗岩, 7–早二叠世花岗闪长岩, 8–矿化蚀变带位置及编号, 9–断层, 10–采样位置及编号

Fig.1 Geological map and sample locations in Harizha polymetallic ore district.

1– Cenozoic, 2– Late Triassic volcanic rocks in Elashan group, 3– Paleoproterozoic metamorphic rocks in Baishahe group, 4– Early Jurassic granodiorite, 5– Early Jurassic adamellite, 6– Early Permian granodiorite, 7– Early Permian granodiorite, 8– Location and number of the altered mineralizing zones, 9– Faults, 10– Sample location and number

哈日扎北区共圈定矿(化)带4条, 均受构造控制。I矿带主要沿近南北向的平移断层(F5)分布, 矿化主要为黄铜矿化、黄铁矿化和孔雀石化, 其中黄铜矿化多呈细粒稀疏浸染状不均匀分布于碎裂状

花岗闪长斑岩体中, 地表斑岩体因黄铁矿氧化淋滤呈现红褐色火烧皮现象, 为斑岩型。II、III、IV矿带成因类型均属构造控制的热液脉型。II、III矿带位赋存于白沙河岩组片麻岩夹片岩岩段的黑云斜长

片麻岩中,严格受北东向断裂控制,带内矿化蚀变主要为黄铜矿化、黄铁矿化、孔雀石化、硅化等,主要沿片麻理裂隙及后期穿插充填的硅质脉体分布,多呈薄膜状、团块状。IV矿带位于早二叠世花岗闪长岩与白沙河岩组碳酸盐岩岩段的外接触带发育的北北西向构造破碎带内,带内见蜂窝状褐铁矿化、黄铁矿化、高岭土化、孔雀石化及硅化等矿化蚀变。

2 样品采集与分析方法

测试样品采集于青海都兰县哈日扎多金属矿区 I、III及IV号蚀变矿化带,样品主要为铜钼矿石及与成矿有关的蚀变岩、花岗斑岩、晶屑凝灰岩及石英闪长岩。野外使用便携式全球定位系统(Global Positioning System, GPS)记录采样点的坐标,单个样品约 5 kg,样品位置见图 1。

将野外采集的岩石样品粉碎,并使粒径与岩石中矿物粒度相适应,一般取 60 目左右大小的颗粒。经传统的摇床初选后,应用电磁选、重液选、介电选、静电选等技术手段,对单矿物进行提纯。

将挑选的矿物制备为实验样品。用环氧树脂法,先将磷灰石置于玻璃片上,用环氧树脂滴固,然后进行研磨和抛光,使矿物内表面露出。在恒温 21℃ 的 $5.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HNO}_3$ 溶液中蚀刻 20 s,揭示其自发

径迹;将低铀白云母外探测器与磷灰石样片一并放入反应堆照射^[11],然后在 25℃ 环境下用 40%氢氟酸蚀刻,揭示诱发裂变径迹;中子照射量选用 CN5 标准铀玻璃标定。依据 Green 建议的程序测定,矿物的裂变径迹在高精度光学显微镜下测量,注意裂变径迹的正确识别非常关键^[12-13]。选择平行 C 轴的柱面,测量矿物自发裂变径迹和诱发裂变径迹密度、水平封闭径迹长度^[14]。依据国际地质科学联合会(International Union of Geological Sciences, IUGS)推荐的 ξ 常数法和标准裂变径迹年龄方程^[15]计算年龄值,本次试验获得的 Zeta 常数为 $392 \pm 18.7(\sigma)$ 。

依据 Green 的方法计算误差,利用 χ^2 值评价所测单颗粒是否属于同一年龄组^[16-17]。 $\chi^2 < 5\%$ 说明单颗粒年龄分布不均匀。如果发现年龄分散,则基于泊松变异的常规分析 Green 无效,而代之以“中心年龄”,中心年龄实质上是权重平均年龄。

3 结果与分析

3.1 实验结果

本次试验共获得 8 个磷灰石裂变径迹分析结果见表 1,磷灰石裂变径迹年龄变化于 (78 ± 6) – (120 ± 6) Ma 之间,总体变化幅度较大。

表 1 哈日扎地区磷灰石裂变径迹分析结果
Table 1 Apatite fission track analysis results for Harizha ore district.

原样号 Sample number	颗粒数 Grain number <i>n</i>	$\rho_s / 10^5 \cdot \text{cm}^{-2}$ (N_s)	$\rho_i / 10^5 \cdot \text{cm}^{-2}$ (N_i)	$\rho_d / 10^5 \cdot \text{cm}^{-2}$ (N_d)	$P(\chi^2)$ / %	中间年龄 Central age ($\pm\sigma$) / Ma	组合年龄 Pooled age ($\pm\sigma$) / Ma	$L(\pm\sigma) / \mu\text{m}$ (N)
XN6-3	28	9.212(3 076)	18.914(6 316)	12.675(8 116)	81.0	120±6	120±6	13.2±2.0(116)
XN8-1	24	10.331(3 079)	25.234(7 521)	12.344(8 116)	0	98±6	98±5	13.0±1.9(113)
XN9-7	28	8.515(1 690)	18.32(3 636)	11.123(8 116)	18.1	100±6	101±6	12.3±1.9(177)
XN9-8	8	7.987(402)	20.227(1 018)	11.903(8 116)	0	90±11	92±7	13.1±1.7(60)
XN15	30	3.836(893)	8.583(1 998)	11.682(8 116)	98.7	102±6	102±6	12.4±1.9(108)
XN23-1	30	3.641(958)	8.771(2 308)	11.462(8 116)	83.4	93±6	93±6	12.4±1.9(101)
XN36	4	2.817(85)	6.429(194)	11.572(8 116)	84.1	99±14	99±14	—
XN37	24	2.394(337)	7.111(1 001)	11.903(8 116)	97.6	78±6	78±6	12.7±1.9(89)

注: N_s 、 N_i 和 N_d 分别为自发径迹数、诱发径迹数和标准径迹数; ρ_s 、 ρ_i 和 ρ_d 分别为自发径迹密度、诱发径迹密度和标准径迹密度; L 为径迹长度; N 为径迹长度数; $P(\chi^2)$ 为 χ^2 检验值

Notes: N_s , N_i and N_d are numbers of spontaneous track, induced track, and standard track, respectively; ρ_s , ρ_i and ρ_d are spontaneous track density, induced track density, and standard track density, respectively; L is mean track length; N is numbers of track length; $P(\chi^2)$ is χ^2 test value.

6 个样品(XN6-3、XN9-7、XN15、XN23-1、XN36、XN37)磷灰石裂变径迹的 χ^2 检验值均大于 5%,样品单颗粒年龄属于同组年龄,其年龄值具有确切的地质意义。同时单颗粒年龄直方图呈现较为典型的单峰式形态分布(图 2),径迹长度分布直方图(图 3)亦呈单峰状,符合受单一热事件控制的

特点,记录了样品经历的构造热事件作用。样品 XN8-1、XN9-8 χ^2 检验值小于 5%,单颗粒年龄及长度配分形态以混合型为主,显示出非典型的双峰式特征,说明由非单一组分年龄组成,而是由多次热事件叠加所致,其年龄分布较离散,应将其年龄分解,使用分解后的年龄进行相关地质分析。使用

BINOMFIT 软件^[18]对样品 XN8-1、XN9-8 的磷灰石裂变径迹年龄进行分解 (图 4), 样品 XN8-1 分解

为 66 Ma、102 Ma 两组年龄, 样品 XN9-8 分解为 60 Ma、112 Ma 两组年龄。

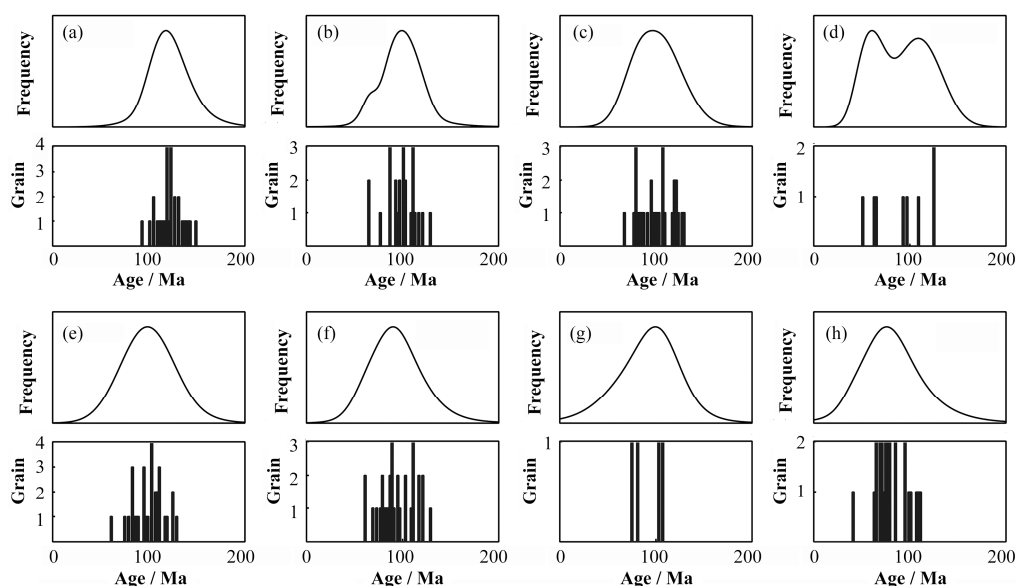


图 2 磷灰石裂变径迹单颗粒年龄直方图及其频率曲线

(a) XN6-3, (b) XN8-1, (c) XN9-7, (d) XN9-8, (e) XN15, (f) XN23-1, (g) XN36, (h) XN37

Fig.2 Apatite single grain age histograms and frequency curves.

(a) XN6-3, (b) XN8-1, (c) XN9-7, (d) XN9-8, (e) XN15, (f) XN23-1, (g) XN36, (h) XN37

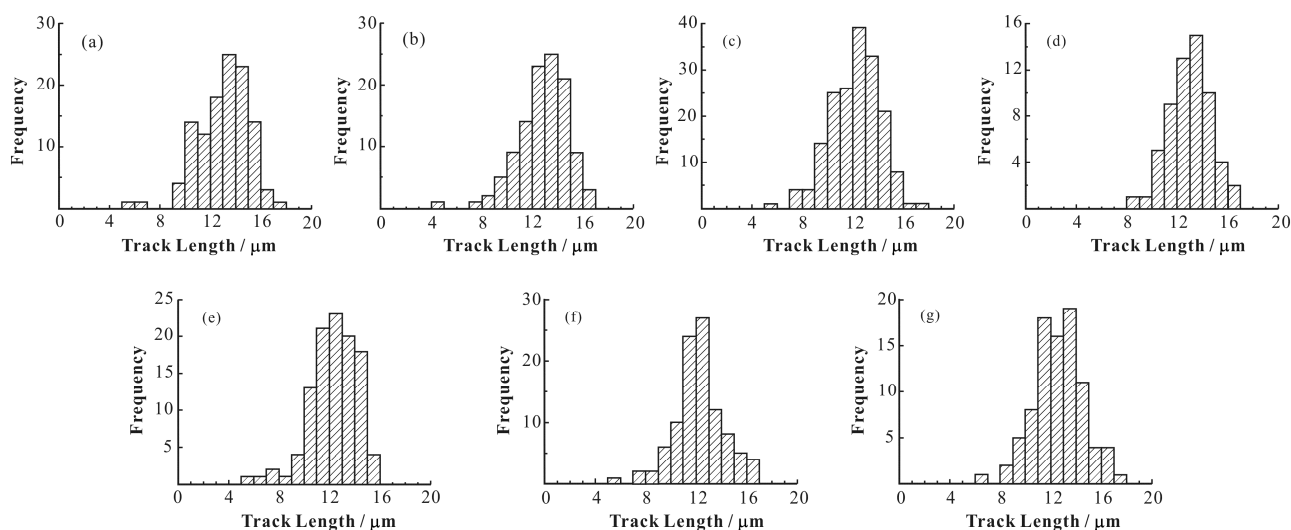


图 3 磷灰石裂变径迹长度分布直方图 (a) XN6-3, (b) XN8-1, (c) XN9-7, (d) XN9-8, (e) XN15, (f) XN23-1, (g) XN37

Fig.3 Histogram of the apatite fission track lengths. (a) XN6-3, (b) XN8-1, (c) XN9-7, (d) XN9-8, (e) XN15, (f) XN23-1, (g) XN37

本次工作测试样品的磷灰石裂变径迹平均长度为 $(12.3 \pm 1.9) - (13.2 \pm 2.0) \mu\text{m}$, 平均径迹长度变化不大, 但是, 径迹长度值相对较小, 长度标准差较大, 在长度分布直方图上分布范围较大 (图 3), 反映岩石形成后受到后期构造热事件的影响, 使得岩石在磷灰石裂变径迹部分退火带滞留时间较长。同时, 磷灰石裂变径迹长度直方图总体呈现单峰特征, 表明受最后一次隆升冷却作用控制明显。

综合 χ^2 检验值大于 5% 和小于 5% 磷灰石裂变径迹数据 (表 1, 图 4), 年龄变化于 60–120 Ma 可分

为如下三组: 120–93 Ma、78 Ma、66–60 Ma, 它们都较好地体现研究区所经历的构造隆升剥蚀作用。磷灰石年龄 120–93 Ma 是早白垩世冈底斯地体向北俯冲碰撞汇聚的响应, 记录了研究区在燕山晚期经历过抬升/冷却事件, 同时也是阿尔金断裂的走滑隆升作用^[19]的体现。磷灰石年龄 78 Ma 记录了区域上发生的一次低级变质作用^[20]。磷灰石年龄 66–60 Ma 代表晚白垩世喜马拉雅地体向北俯冲碰撞, 属于印度板块与欧亚板块碰撞事件对研究区的远程效应^[21]。

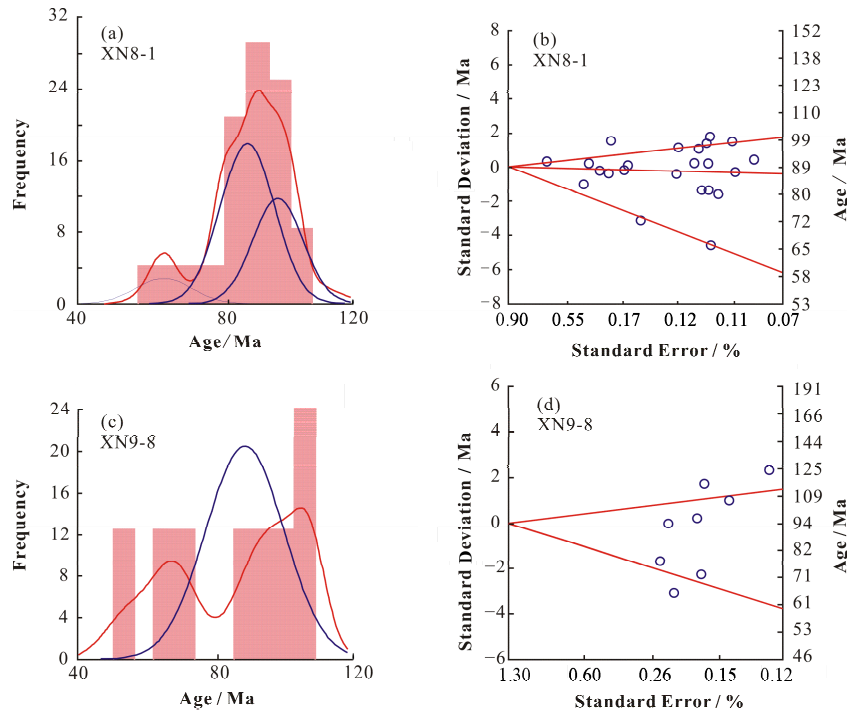


图4 χ^2 检验值小于 5% 的样品(XN8-1、XN9-8)磷灰石裂变径迹年龄分组频率图(a、c)和雷达图(b、d)
Fig.4 Histogram (a, c) and radial plot (b, d) of the single grain ages for sample XN8-1 and XN9-8.

3.2 矿区地质热历史

基于 Ketcham 等^[22]的退火模型,应用 AFTSolve 软件蒙特卡罗逼近法对磷灰石裂变径迹数据进行了模拟。根据实验获得的磷灰石裂变径迹参数和岩石样品的地质背景与条件,诸如径迹长度较短、长度标准差较大、样品在退火带滞留时间较长以及样品单颗粒年龄特征,确定反演模拟的初始条件。模拟温度从高于磷灰石裂变径迹部分退火带的 -130°C 到现今地表温度(约 15°C),模拟时间根据不同样

品年龄特点分别从 160 Ma、130 Ma、120 Ma 到现今。模拟结果见图 5,每个样品均获得了最佳的热历史路径(图 5 中黑色实线),中间深色区域代表反演模拟的较好拟合区,边缘浅色区域代表可接受区。每个模拟图左上角分别标出样品代号、实测径迹长度和模拟径迹长度、实测 Pooled 年龄和模拟 Pooled 年龄以及 $K-S$ 检验值和拟合优度(Goodness of fit, GOF)年龄拟合参数。当 $K-S$ 值和 GOF 值均大于 0.5 时,一般认为模拟结果较好^[23]。

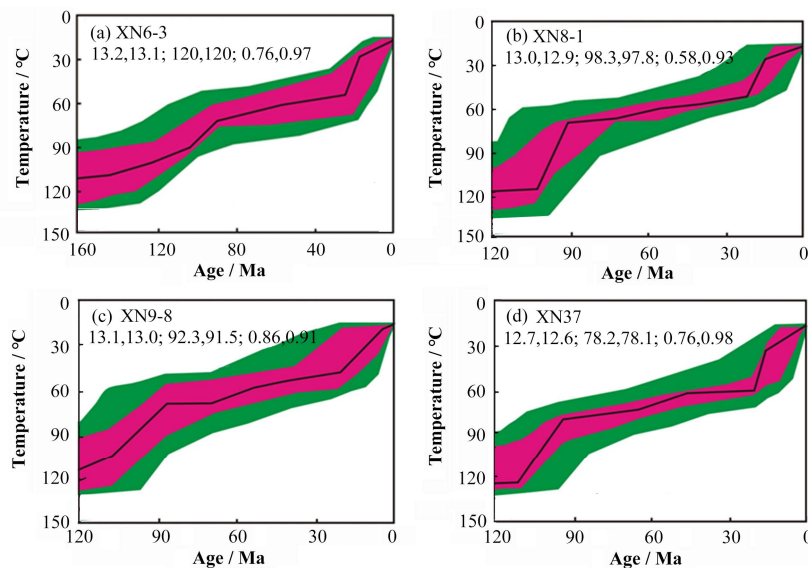


图5 哈日扎地区地质热历史模拟图 (a) XN6-3, (b) XN8-1, (c) XN9-8, (d) XN37
Fig.5 Modeling geological thermal evolution histories in Harizha area. (a) XN6-3, (b) XN8-1, (c) XN9-8, (d) XN37

热历史模拟结果显示各样品经历的热历史十分相似,具有整体隆升的特性,不同的是:(1) III矿带矿化蚀变岩样品 XN6-3 裂变径迹年龄为 120 Ma,为所有样品中最大年龄,模拟结果显示该样品受热事件作用时间较早,约 160 Ma 便达到 120 °C;(2) IV 矿带两个样品(XN8-1、XN9-8) χ^2 检验值小于 5%,经历多次构造热事件,说明IV矿带构造活动复杂;(3) 不同矿带样品经历构造热事件时间不同体现了矿区存在差异隆升的特点,与它们所处构造区块不同有关。

总体上属于三阶段演化历史:(1) 160–90 Ma,温度较高,处于磷灰石裂变径迹退火带底部温度,主体高于 100 °C;(2) 90–20 Ma,缓慢冷却,温度由 100 °C 降至 50 °C,冷却速率为 0.71 °C·Ma⁻¹,为缓慢冷却;(3) 从 20 Ma 到现今,快速冷却温度由 50 °C 降为现在地表温度(平均 15 °C),冷却速率为 1.75 °C·Ma⁻¹,为快速冷却,该阶段为青藏高原及周缘新生代重大隆升冷却期,即印度板块与欧亚板块碰撞导致青藏高原整体强烈隆升^[24–25]。此外第二阶段又可细分为二:在 90–80 Ma 有小的转折,即此前降温相对较快,这一热事件与班公湖–怒江洋闭合到拉萨地块和羌塘地块的碰撞拼合过程^[21]相符,是本次板块构造活动对东昆仑地区的远程效应;此后则冷却较慢,可视为一个较长的平静期,区域上发生一次低级变质作用^[20]。

3.3 隆升速率与隆升幅度

3.3.1 年龄–封闭温度法

年龄–封闭温度法可以为直观评价区域的平均隆升状态提供数据支持^[26]。选取 χ^2 检验值大于 5% 的样品,其所测得磷灰石裂变径迹年龄值即为样品通过裂变径迹封闭温度至今的时间,取磷灰石裂变径迹封闭温度为 110 °C,地表温度为 15 °C,造山带平均地温梯度为 35 °C·km⁻¹^[27]。计算隆升速率公式为:隆升速率×年龄值=(封闭温度–地表温度)/地温梯度。

计算结果显示,各个样品的平均隆升速率分别为 0.023 mm·a⁻¹、0.027 mm·a⁻¹、0.027 mm·a⁻¹、0.029 mm·a⁻¹、0.027 mm·a⁻¹、0.035 mm·a⁻¹,平均值为 0.028 mm·a⁻¹。平均隆升量为 2.71 km。

3.3.2 冷却曲线模拟法

取造山带平均地温梯度为 35 °C·km⁻¹,根据磷灰石裂变径迹对热历史模拟结果,可以计算不同时期的隆升速率和隆升幅度。三个阶段具有的温差和时间差分别为 10 °C 和 70 Ma、50 °C 和 70 Ma、35 °C 和 20 Ma,则三个阶段的隆升速率和隆升幅度分别

为:第一阶段 0.004 mm·a⁻¹ 和 0.28 km、第二阶段 0.020 mm·a⁻¹ 和 1.40 km、第三阶段 0.05 mm·a⁻¹ 和 1.00 km。总的隆升量为 2.68 km,与年龄–封闭温度法计算的隆升量相符。第一阶段的缓慢隆升代表了柴达木盆地周缘山地在燕山期经历过抬升/事件^[28];第二阶段的隆升反映的是拉萨地块与羌塘地块碰撞拼合过程及其后发生的一次低级变质作用^[20–21];第三阶段反映了印度板块与欧亚板块碰撞后持续挤压隆升和后期拉张环境下的整体强烈隆升^[24–25]。

4 结语

应用磷灰石裂变径迹分析技术,对青海省哈日扎多金属矿区不同矿带、不同类型岩矿石进行磷灰石裂变径迹年龄测定并进行构造事件反演,主要取得如下成果:

1) 获得 8 个磷灰石样品的裂变径迹分析结果,磷灰石裂变径迹年龄变化于 120–60.2 Ma,可分为 120–93 Ma、78 Ma、65.9–60.2 Ma 三个年龄组。

2) 哈日扎地区具有三阶段构造热演化历史,即 160–90 Ma、90–20 Ma、20 Ma 至今,三个阶段分别隆升 0.28 km、1.40 km、1 km,总的隆升量为 2.68 km,第三阶段为快速隆升期。

3) 热历史第二阶段中相对快速隆升阶段与班公湖–怒江洋闭合以及拉萨地块与羌塘地块碰撞拼合过程相符,是本次板块构造活动对东昆仑地区的远程效应;缓慢冷却阶段则可视为一个较长的平静期,伴生的是区域上一次低级变质作用。第三阶段代表青藏高原及周缘新生代强烈隆升期,即印度板块与欧亚板块碰撞后持续挤压隆升和后期拉张环境下的整体强烈隆升。

参考文献

- 1 杨平,裴生菊,陈丽娟,等. 青海哈日扎含铜斑岩特征及其找矿潜力分析[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(6): 62–67. DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2010.06.009
YANG Ping, PEI Shengju, CHEN Lijuan, *et al.* Characteristic of copper-bearing porphyry and analysis on the prospecting potential in Harizha of Qinghai[J]. Journal of Qinghai University (Nature Science), 2010, 28(6): 62–67. DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2010.06.009
- 2 韩英善,郭桂兰,张大明,等. 东昆仑东段哈日扎地区含矿斑岩特征及找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2012, 45(1): 33–39. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6248.2012.01.005
HAN Yingshan, GUO Guilan, ZHANG Daming, *et al.*

- Characteristics of ore-bearing porphyry and prospecting potential analysis of Harizha in east Kunlun area[J]. *Northwestern Geology*, 2012, **45**(1): 33–39. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6248.2012.01.005
- 3 马忠元, 李良俊, 周青禄, 等. 东昆仑哈日扎斑岩型铜矿床特征及成因探讨[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2013, **31**(3): 69–75. DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2013.03.012
- MA Zhongyuan, LI Liangjun, ZHOU Qinglu, *et al.* The characteristics of the porphyry copper deposit and its formation in the east Kunlun Harizha area[J]. *Journal of Qinghai University (Nature Science)*, 2013, **31**(3): 69–75. DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2013.03.012
- 4 宋忠宝, 张雨莲, 陈向阳, 等. 东昆仑哈日扎含矿花岗闪长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *矿床地质*, 2013, **32**(1): 157–168. DOI: 10.16111/j.0258-7106.2013.01.018
- SONG Zhongbao, ZHANG Yulian, CHEN Xiangyang, *et al.* Geochemical characteristics of Harizha granite diorite-porphyry in east Kunlun and their geological implications[J]. *Mineral Deposits*, 2013, **32**(1): 157–168. DOI: 10.16111/j.0258-7106.2013.01.018
- 5 袁万明, 张爱奎, 田承盛, 等. 青海省东昆仑哈日扎-哈陇休玛一带构造活动的锆石裂变径迹定年分析[C]. 2014 年中国地球科学联合学术年会—专题 34: 特提斯-青藏高原地质演化与成矿论文集, 北京, 2014: 1865–1866
- YUAN Wanming, ZHANG Aikui, TIAN Chengsheng, *et al.* Zircon fission track dating evidence for tectonic events in the Hariza-Halongxiuma area, Qinghai province[C]. 2014 Annual Conference of China Earth Sciences Association: Special Topics 34: Tethys-Tibet Plateau Geological Evolution and Mineralization Proceedings, Beijing, 2014: 1865–1866
- 6 田承盛, 张爱奎, 袁万明, 等. 青海东昆仑哈日扎多金属矿区构造活动的锆石裂变径迹定年分析[J]. *地质与勘探*, 2014, **50**(5): 833–839. DOI: 10.13712/j.cnki.dzykt.2014.05.003
- TIAN Chengsheng, ZHANG Aikui, YUAN Wanming, *et al.* Zircon fission track dating evidence for tectonic events in the Hariza polymetallic ore district, eastern Kunlun mountains, Qinghai-Tibet plateau[J]. *Geology and Prospecting*, 2014, **50**(5): 833–839. DOI: 10.13712/j.cnki.dzykt.2014.05.003
- 7 田承盛, 袁万明, 曾小平, 等. 东昆仑哈日扎多金属矿区 IV 矿带成矿时代的锆石裂变径迹定年分析[J]. *核技*术, 2015, **38**(1): 010502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010502
- TIAN Chengsheng, YUAN Wanming, ZENG Xiaoping, *et al.* Zircon fission track dating for mineralizing ages in IV ore-belt of Hariza polymetallic mining district, eastern Kunlun mountains, Qinghai-Tibet plateau[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, **38**(1): 010502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.010502
- 8 青海省地质矿产局. 青海省 1:100 万大地构造图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 23–47
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province. 1:100 million map specification of Qinghai province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 23–47
- 9 青海省第三轮成矿远景区划研究及找矿靶区预测报告[R]. 西宁: 青海省地质矿产勘查开发局, 2003
- Study on the third round of metallogenic prospect and prediction of target area in Qinghai province[R]. Xining: Bureau of Geological Exploration and Development of Qinghai Province, 2003
- 10 马忠元, 李建亮, 马成兴, 等. 青海省都兰县哈日扎地区多金属矿普查 2010–2013 年工作总结及 2014 年工作安排[R]. 西宁: 青海省第三地质矿产勘查院, 2013: 21–23
- MA Zhongyuan, LI Jianliang, MA Chengxing, *et al.* Harizha area polymetallic ore 2010–2013 annual summary of the work and working arrangements for 2014, Qinghai province[R]. Xining: Qinghai Third Institute of Geology and Mineral Resources Exploration, 2013: 21–23
- 11 Yuan W M, Dong J Q, 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**: 183–193. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.09.007
- 12 Green P F. On the thermo-tectonic evolution of northern England: evidence from fission track analysis[J]. *Geology*, 1986, **5**: 493–506
- 13 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: 地球科学*, 2011, **41**(10): 1435–1443
- YUAN Wanming, YANG Zhiqiang, ZHANG Zhaochong, *et al.* Uplift and stripping of mount Huangshan mountain in Anhui province[J]. *Science in China D series: Earth Sciences*, 2011, **41**(10): 1435–1443
- 14 Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, *et al.* Confined

- fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, **94**: 405–415. DOI: 10.1007/BF00376334
- 15 Hurford A J, Green P F. A users' guide to fission-track dating calibration[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, **59**: 343–354. DOI: 10.1016/0012-821X(82)90136-4
 - 16 Green P F. A new look at statistics in fission track dating[J]. *Nuclear Tracks*, 1981, **5**: 77–86. DOI: 10.1016/0191-278X(81)90029-9
 - 17 Galbraith R F. On statistical models for fission track counts[J]. *Methmetical Geology*, 1981, **13**: 471–488. DOI: 10.1007/BF01034498
 - 18 Mark T B. Probability density plot for fission-track grain-age samples[J]. *Radiation Measurement*, 1996, **26**(5): 663–676. DOI: 10.1016/S1350-4487(97)82880-6
 - 19 Liu Y J, Neubauer F, Genser J, *et al.* Geochronology of the initiation and displacement of the Altyn Strikr-Slip Fault, western China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, **29**(2–3): 243–252. DOI: 10.1016/j.jseae.2006.03.002
 - 20 Liu Y J, Genser J, Franz N, *et al.* Gechronology of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating in the basement rocks in eastern Kunlun mountains and its tectonic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, **7**(Suppl 1): 227
 - 21 莫宣学, 潘桂堂. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(6): 43–51. DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.2006.06.007
 - MO Xuanxue, PAN Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, **13**(6): 43–51. DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.2006.06.007
 - 22 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. DOI: 10.2138/am-1999-0903
 - 23 Arnaud N, Tapponnier P, Roger F, *et al.* Evidence for Mesozoic shear along the western Kunlun and Altyn-Tagh Fault, northern Tibet (China)[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(B1): 2053–2064. DOI: 10.1029/2001JB000904
 - 24 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2011, **26**(4): 289–295
 - ZHONG Dalai, DING Lin. The uplift process of the Qinghai Tibet plateau and its mechanism[J]. *Science in China D series: Earth Sciences*, 2011, **26**(4): 289–295
 - 25 张克信, 王国灿, 曹凯, 等. 青藏高原新生代主要隆升事件: 沉积响应与热年代学记录[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, **38**(12): 1575–1588
 - ZHANG Kexin, WANG Guocan, CAO Kai, *et al.* Cenozoic major uplift events in the Qinghai Tibet plateau: sedimentary response records and thermochronologic[J]. *Science in China D series: Earth Sciences*, 2008, **38**(12): 1575–1588
 - 26 Kohn B P, Gleadow A J W, Brown R W, *et al.* Shaping the Australian crust over the last 300 million years: insights from fission track thermotectonic and denudat ion studies of key terranes[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2002, **49**: 697–717. DOI: 10.1046/j.1440-0952.2002.00942.x
 - 27 Pichon X L, Henry P, Goffé B. Uplift of Tibet: form eclogites to granulites: implications for the Andean plateau and the Variscan belt[J]. *Tectonics*, 1997, **273**(1): 57–76. DOI: 10.1016/S0040-1951(96)00288-0
 - 28 高军平, 方小敏, 宋春晖, 等. 青藏高原北部中-新生代构造-热事件: 来自柴西碎屑磷灰石裂变径迹的制约[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, **41**(5): 1466–1475. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2011.05.030
 - GAO Junping, FANG Xiaomin, SONG Chunhui, *et al.* Tectonic-thermo events of northern Tibetan plateau: evidence from detrital apatite fission track data in western Qaidam basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, **41**(5): 1466–1475. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.2011.05.030