

# 宁芜、庐枞盆地玢岩铁矿成矿深度及成矿后抬升、剥蚀情况：来自磷灰石裂变径迹的证据

刘文浩, 张均\*, 李婉婷, 孙腾, 江满容, 王健, 吴建阳, 陈曹军

中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 矿床形成深度及成矿后的变化与保存是目前深部找矿亟待解决的关键问题。选取4个成矿年龄均为130 Ma左右的典型玢岩铁矿, 分别为宁芜盆地中矿体已经出露地表并经过剥蚀的东山铁矿和矿体埋藏距地表40 m以下的梅山铁矿, 庐枞盆地中矿体埋藏距地表400 m以下的罗河铁矿和矿体埋藏距地表600 m以下的泥河铁矿, 采用双重定年技术对这4个矿床主成矿阶段矿石矿物组合中的磷灰石进行了裂变径迹研究。结果显示:(1)东山铁矿 AFT 合并年龄为  $106.3 \pm 5.4$  Ma, 梅山铁矿为  $94.2 \pm 4.0$  Ma, 罗河铁矿为  $81.3 \pm 4.0$  Ma, 泥河铁矿为  $79.1 \pm 3.3$  Ma, 且 AFT 年龄和围限径迹长度随样品埋藏深度减小而增大, 分别更接近成矿年龄和原始径迹长度, 显示4个矿床成矿后差异抬升剥蚀作用导致磷灰石样品通过部分退火带时的冷却速率存在差别;(2)热史模拟反映这4个矿床成矿后均经历了早期短暂快速冷却和后期长期缓慢冷却2个阶段, 两阶段之间的拐点温度接近, 对应深度为1.7~1.8 km, 结合其他证据证明宁芜、庐枞盆地玢岩铁矿成矿深度均为2 km左右。说明这4个矿床现今埋藏深度的差异主要是由于成矿后的抬升、剥蚀作用导致。(3)自110 Ma以来宁芜盆地的整体抬升剥蚀幅度大于庐枞盆地, 导致宁芜盆地大部分玢岩铁矿矿体接近或暴露地表, 2个盆地早期抬升剥蚀作用与区域性黄桥事件同步。

**关键词:** 成矿深度; 成矿后抬升、剥蚀; 磷灰石裂变径迹; 玢岩铁矿。

中图分类号: P612

文章编号: 1000-2383(2012)05-0966-15

收稿日期: 2011-12-22

## Metallogenic Depth, Post-Mineralization Uplift and Denudation of Porphyry-Like Type Iron Deposits in Ningwu, Luzong Basins: Evidences from Apatite Fission Track

LIU Wen-hao, ZHANG Jun\*, LI Wan-ting, SUN Teng, JIANG Man-rong, WANG Jian, WU Jian-yang, CHEN Cao-jun

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The metallogenic depth and post-mineralization uplift and denudation are the key issues in deep prospecting, which have been weak in the study of mineral deposits due to the absence of effective technology. The authors select Dongshan, Meishan porphyry-like iron deposits in Ningwu basin and Nihe, Luohe porphyry-like iron deposits in Luzong basin formed about ~130 Ma as the study subjects for the metallogenic depth and post-mineralization uplift and denudation of porphyry-like iron deposits, with the help of AFT analysis of apatites in ore mineral assemblages. The results suggest: (1) the pooled AFT ages ( $1\sigma$ ) of the four deposits are  $106.3 \pm 5.4$  Ma,  $94.2 \pm 4.0$  Ma,  $81.3 \pm 4.0$  Ma and  $79.1 \pm 3.3$  Ma, respectively, showing the ore bodies of four deposits passed the PAZ successively. The AFT ages and confined track lengths decrease with the increase of buried depth of samples and become close to the mineralization ages and the initial confined track length, which are possibly controlled by diverse uplift and denudation after mineralization leading to the different cooling rates while the samples passed the PAZ. (2) The thermal histories of AFT modeling reflect that there are two different cooling stages, namely the rapid cooling progress caused by losing of heat source and the slow cooling progress caused by uplift. The temperature inflection points between the two stages of the four deposits are probably identical, corresponding to a depth of 1.7 to 1.8 km. (3) Since

基金项目: 全国危机矿山找矿典型矿床研究专项(No. 20109904).

作者简介: 刘文浩(1988—), 男, 硕士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: cugliu@126.com

\* 通讯作者: 张均, E-mail: zhangjun@cug.edu.cn

110 Ma, the uplift and denudation rate of the Ningwu basin have been greater than those of Luzong basin, so that most ore deposits in Ningwu basin buried shallowly or even exposed to the surface. The early uplift and denudation were controlled by the regional Yellow Bridge tectonic event.

**Key words:** metallogenic depth; uplift; denudation; AFT; porphyry-like type iron deposit.

## 0 引言

在近年国家危机矿山接替资源找矿项目实施过程中,面对巨额勘探资金投入所需要承担的巨大风险,加强对矿体保存潜力评价方面的研究显得尤为重要.这必须解决2个关键问题,即翟裕生院士(2000,2004)提出的成矿深度和成矿后的抬升、剥蚀等变化与保存状况.其中,成矿深度研究是矿床学发展之初就存在,至今仍尚未得到有效解决的问题之一(Skinner *et al.*, 1997).对成矿深度的准确判别,对于指导深部找矿具有重要的理论和实践意义(曹新志等,2008).目前针对成矿深度的研究方法主要有地质推断法、压力计法和针对压力推算深度而提出的多种校正方法(吕古贤等,2000;孙丰月等,2000;陈柏林,2001;张德会等,2007,2011).地质推断法是利用成矿时上覆地层厚度恢复或与成矿相关岩石的物理性质如岩石结构、构造、变质程度等定性推断成矿深度,压力计法是利用矿物压力计、流体包裹体压力计等方法获得成矿压力,进而换算深度,但由于矿物压力计对低压的不敏感性(Skinner, 1997)和压力与深度之间关系的复杂性(卢焕章等,2004),所获得的成矿深度的可靠性仍然有待提高.矿床成矿后变化与保存的研究,在矿床学的长期发展中并未受到相应重视,同时由于缺乏有效的技术手段支撑,因而相对于成矿过程的研究,长期处于滞后状态(翟裕生等,2000).

当前热年代学的迅速发展为成矿深度和成矿后变化与保存的研究开辟了新的道路.利用对温度敏感的矿物进行年代学测试可以反演矿床的热演化史,以此来揭示成矿的开始时间、持续时间以及成矿后的抬升、剥蚀时间和速率,最终可用来进行找矿潜力评价(McInnes, *et al.*, 2005).目前国外学者已经在这方面开展了较多研究,主要集中于斑岩型铜矿、卡林型金矿、低温热液型金矿等类型矿床的成矿时间、成岩成矿深度和成矿后的冷却、剥露过程等方面(McInnes *et al.*, 1999, 2005; Chakurian *et al.*, 2003; Makshev *et al.*, 2009; Marton *et al.*, 2010).作为热年代学方法之一的磷灰石裂变径迹(AFT),在获得径迹年龄的同时,还可以利用所获得的径迹

长度数据进行热史反演,有着其他定年方法难以替代的优越性.目前该方法在国内主要应用于区域构造演化和造山带隆升剥蚀等方面的研究(刘德民等, 2005;施小斌等,2006;沈传波等,2007;Shen *et al.*, 2009;张沛等,2009;梅廉夫等,2010,徐长海等,2010);在矿床学中主要用于年代学与成矿期次等方面的研究(袁万明等,2000,2001;李小明等,2001;汤云晖等,2003;徐晓彤等,2010).沈传波等(2005)指出磷灰石裂变径迹可用于矿床的抬升与剥蚀、成矿热液演化等方面研究,但具体采集什么样品具有代表性还需要进一步研究.王建平等(2008)指出区域隆升与剥蚀是影响矿床变化与保存的关键因素,而裂变径迹法能够提供剥蚀速率与剥蚀量的定量数据.柳振江等(2010)利用胶东西北部金矿容矿花岗岩中的磷灰石裂变径迹年龄数据研究了该区金矿成矿后的剥蚀程度,指出该区成矿后整体剥蚀程度较弱,有利于矿床的保存.由于此研究并未运用热史模拟结果,因此未能给出详细的剥蚀过程.

上述裂变径迹在矿床中的研究成果主要由与成矿有关的地质体间接推测,由于受样品条件所限,尚未开展过针对矿石矿物组合中磷灰石的裂变径迹研究.我国长江中下游宁芜和庐枞盆地中的玢岩铁矿石中含有大量的磷灰石,为利用磷灰石裂变径迹开展玢岩铁矿成矿深度和成矿后变化与保存的研究提供了有利条件,且相对于斑岩铜矿和石英脉型金矿等矿床,样品更具代表性.此外,2个盆地中的玢岩铁矿具有相似的产出地质背景和矿床地质特征,但埋藏深度具有明显差异:宁芜盆地中玢岩铁矿矿体基本上都已出露地表,主要进行露天开采;而庐枞盆地中的玢岩铁矿主要埋藏于距地表300 m以下,主要为井下开采.造成这种差异埋深的原因既可能是原始成矿深度的差异,也可能是成矿后不同的抬升、剥蚀作用.解决此问题,能够有效指导2个盆地中玢岩型铁矿的深部找矿勘查.

在此背景下,本文选择了2个盆地中矿体埋藏由浅变深的4个典型玢岩铁矿,分别为宁芜盆地中矿体已经出露地表并且经受过剥蚀的东山铁矿和矿体仍然埋藏于地表40 m以下的梅山铁矿,庐枞盆地中矿体埋藏于地表400 m以下的罗河铁矿和矿体埋

藏于地表 600 m 以下的泥河铁矿. 利用这 4 个玢岩铁矿主成矿阶段矿物组合中的磷灰石进行裂变径迹定年及热史模拟, 获得矿床的 AFT 年龄及热史演化过程, 以此探讨玢岩铁矿成矿冷却过程、矿床形成深度及成矿后的抬升剥蚀过程, 进而揭示 2 个盆地玢岩铁矿埋藏深度差异的原因, 以期对 2 个盆地中寻找深部玢岩铁矿的战略部署提供一定参考依据, 同时对成矿深度及成矿后变化与保存研究起到一定推进作用.

### 1 区域地质背景

庐枞盆地和宁芜盆地是长江中下游地区在早中生代拗陷基础上发育起来的一系列陆相火山岩断陷盆地中最具代表性的 2 个(图 1a, 1b), 盆地内以产出众多的“玢岩铁矿”而闻名于世. 2 个盆地的周边均为深大断裂所围限, 盆地出露地层均以一套中生代橄榄安粗岩系火山岩为主(唐永成等, 1998), 盆地长轴延伸方向均为 NE 向. 其中宁芜盆地位于庐枞盆地 NE 方向约 100 km 处, NE 向长江断裂穿过 2 个盆地之间, 与 2 个盆地长轴延伸方向一致, 且长江断裂分别是庐枞盆地的东边界断裂和宁芜盆地的西边界断裂. 盆地中广泛发育与火山岩成因关系密切的次火山岩——(辉石)闪长玢岩, 是盆地内大量产出的玢岩铁矿的成矿母岩. 所有的玢岩铁矿在空间、时间、成因上均与(辉石)闪长玢岩关系密切(宁芜研究项目编写小组, 1978).

### 2 矿床地质特征

本次研究涉及 4 个典型玢岩铁矿, 分别为宁芜盆地的东山铁矿、梅山铁矿, 庐枞盆地的罗河铁矿、泥河铁矿. 它们的共同特征为成矿均与闪长玢岩关系密切, 成岩成矿年龄均为 130 Ma 左右(余金杰等, 2002; 马芳等, 2010; 覃永军等, 2010; 范裕等, 2010, 2011; 周涛发等, 2011), 矿体均产于闪长玢岩体内或其与上覆火山岩地层的接触带中. 矿床围岩蚀变发育, 蚀变岩厚度可超过 900 m, 可划分为 3 个蚀变带, 从深至浅依次为下部浅色蚀变带、中部深色蚀变带和上部浅色蚀变带. 磁铁矿体主要赋存于中部深色蚀变带中, 但这几个矿床现今埋藏深度存在明显差异. 各矿床的简要地质特征分述如下.

**东山铁矿:** 位于宁芜盆地中段, 属于凹山—东山矿田. 矿田内所有矿体已出露地表(图 2a, 2b). 凹山和东山铁矿产于凹山岩体凸起部位的顶部及边部. 主成矿阶段典型矿物组合为透辉石(阳起石)—磷灰石—磁铁矿组合, 常呈粗晶或伟晶产出. 磷灰石是矿床内最常见的矿物之一, 粒径可至数厘米至几十厘米, 为浅绿色或红色, 化学成分分析为氟磷灰石.

**梅山铁矿:** 位于宁芜盆地北段, 为一大型浅埋藏矿床, 矿体埋深为地表下 40~530 m(图 2c), 地表可见其顶部的浅色蚀变带出露. 矿体产于辉石闪长玢岩与辉石安山岩的接触带中, 以致密块状磁铁矿及假象赤铁矿为主. 主成矿阶段矿物组合为石榴石—透辉石—磷灰石—磁铁矿. 磷灰石在手标本上粒度

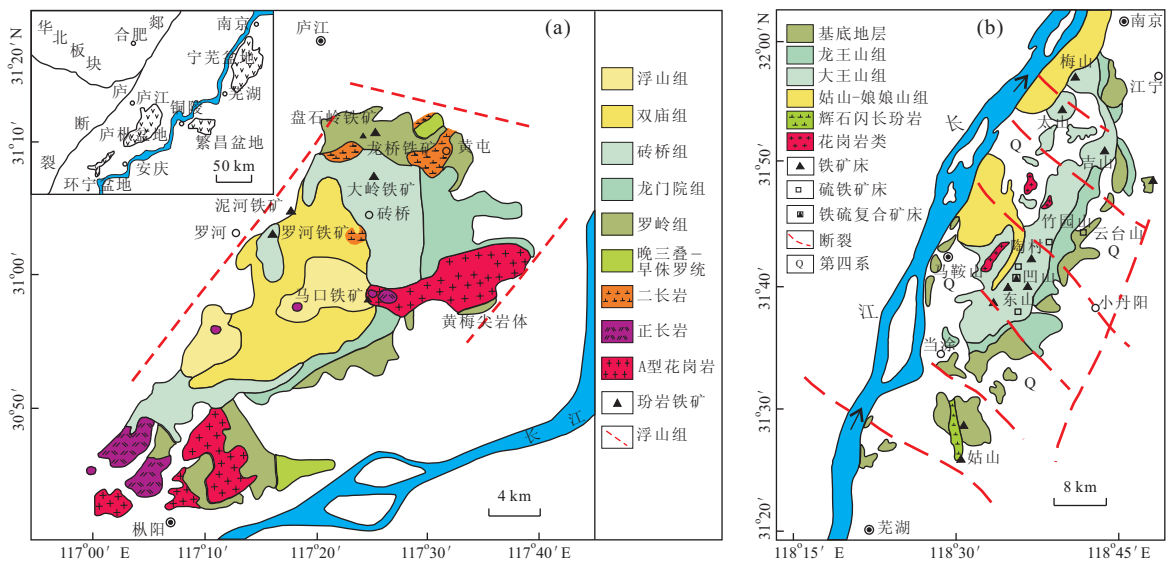


图 1 庐枞盆地(a)和宁芜盆地(b)地质简图及矿床分布  
 Fig. 1 Geological maps of Luzong (a) and Ningwu (b) volcanic basins

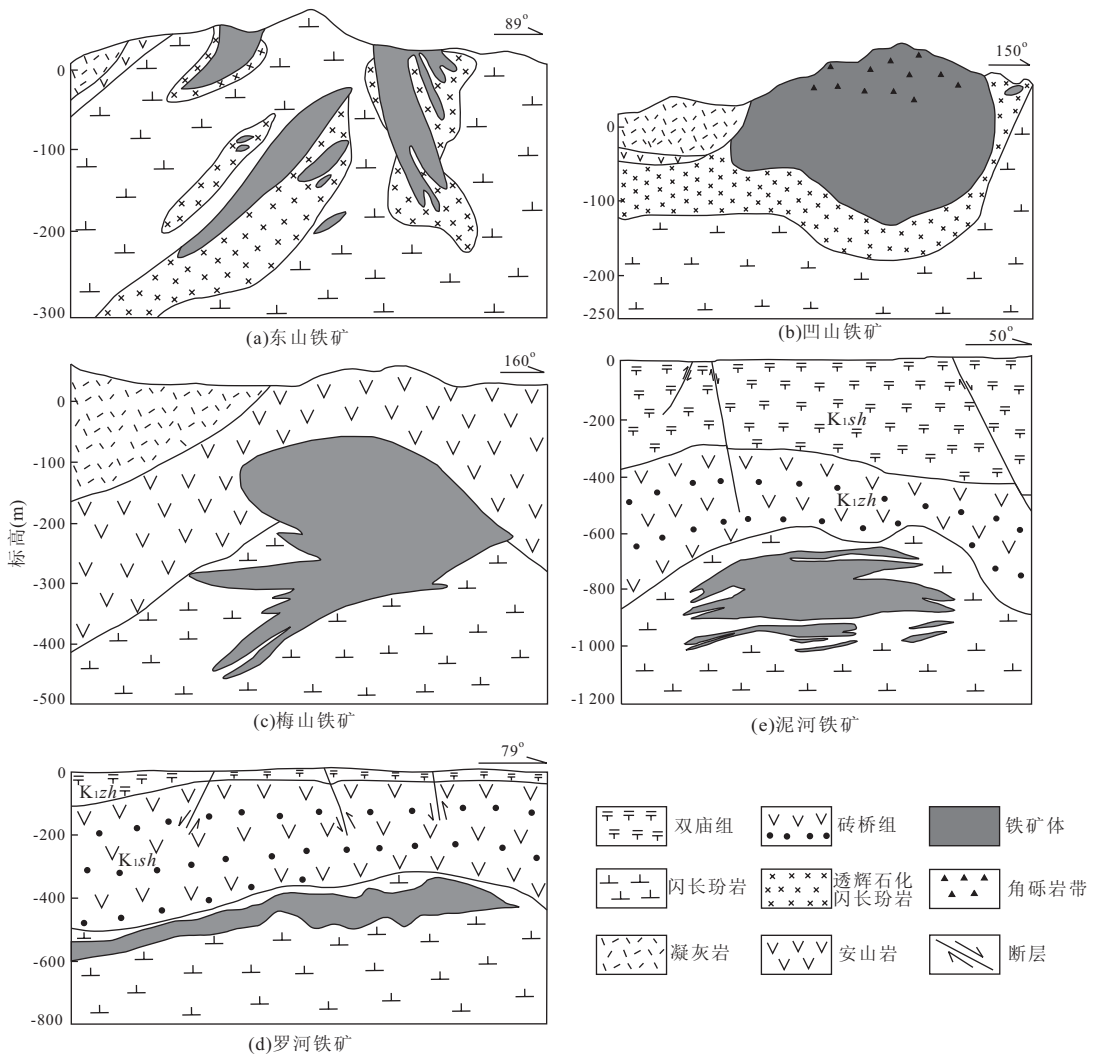


图 2 泥河、罗河、梅山、东山、凹山铁矿剖面

Fig. 2 The main sections of Nihe, Luohe, Meishan, Washan porphyry iron deposits

较小, 主要呈无色、淡红色、浅绿色, 镜下和挑纯的单矿物为无色, 化学成分分析为氟磷灰石。

罗河铁矿: 为庐枞盆地大型磁铁矿、硫铁矿和石膏矿组成的多矿种隐伏矿床, 矿体埋深为地下 425~856 m(图 2d), 赋存于闪长玢岩顶部和闪长玢岩与粗安岩层接触带中。铁矿体总体呈似层状、平缓透镜状, 其平面投影呈椭圆形, 空间上表现为穹窿状。磁铁矿矿石典型的矿物组合为透辉石—硬石膏—磁铁矿。在膏辉岩和磁铁矿矿石中普遍分布有磷灰石, 多为棕—浅绿色, 晶体粒径 0.1~10 mm, 常被包裹在磁铁矿矿石中, 化学成分分析为氟磷灰石。

泥河铁矿: 庐枞盆地 2007 年新发现的一处大型、深埋藏隐伏铁、硫矿床, 位于罗河铁矿 NE 约 2 km 处。磁铁矿体矿总体呈厚层状、透镜状产出, 赋存于闪长玢岩穹窿内部, 由多层矿体上下叠置而成

(杜建国等, 2011; 赵文广等, 2011)。矿体埋藏深度为地下 665~1 065 m 之间(图 2e)。磁铁矿矿石典型的矿物组合为透辉石—硬石膏—磁铁矿, 在膏辉岩和磁铁矿矿石中广泛分布有磷灰石, 多为棕—浅绿色, 粒径 0.1~0.5 mm。

### 3 AFT 样品及实验方法

本次研究的 5 件样品分别产自泥河铁矿 (AP-1)、罗河铁矿 (AP-4)、梅山铁矿 (MS303) 和东山铁矿 (DAP-1、DAP-2), 均为含磷灰石的磁铁矿石。具体采样位置及样品描述见表 1。矿石中的矿物组合都是相应矿床主成矿阶段形成的典型矿物组合, 磷灰石的形成时间与磁铁矿同时或稍有先后, 但均属于主成矿阶段产物。除梅山铁矿的样品 MS303

表 1 泥河、罗河、梅山、东山铁矿磷灰石裂变径迹分析数据  
Table 1 AFT data of Nihe, Luohe, Meishan, Dongshan iron deposits

样品号	样品性质	所属矿床	采样埋深(m)	FT 年龄(Ma, 1 $\sigma$ ) (25 个颗粒合并)	围限径迹长度( $\mu\text{m}$ )	<i>Dpar</i> 均值( $\mu\text{m}$ )
AP-1	磁铁矿矿石	泥河铁矿	720	79.1 $\pm$ 3.3	13.44 $\pm$ 1.11(132 条径迹平均)	2.10
AP-4	磁铁矿矿石	罗河铁矿	670	81.3 $\pm$ 4.0	13.56 $\pm$ 1.25(140 条径迹平均)	2.18
MS303	磁铁矿矿石	梅山铁矿	320	94.2 $\pm$ 4.0	14.14 $\pm$ 1.17(150 条径迹平均)	2.69
DAP-1	磁铁矿矿石	东山铁矿	120	106.3 $\pm$ 5.4	14.78 $\pm$ 1.04(195 条径迹平均)	2.48
DAP-2	磁铁矿矿石	东山铁矿	100	106.9 $\pm$ 5.7	14.80 $\pm$ 1.03(201 条径迹平均)	2.54

中的磷灰石手标本上不可见之外,其余都能在手标本上可见完整的晶形.泥河铁矿、罗河铁矿的磷灰石粒径基本都在 0.2~0.5 mm 左右,东山铁矿的磷灰石颗粒粗大,可至 20 mm.

在野外采取适量可足够挑选磷灰石颗粒的样品并包装好后,置于相对低温环境,严格避免经受高温烘烤,以免使磷灰石裂变径迹发生退火.在保留副样并制作光薄片进行观察之后,将块状样品送往廊坊区域地质矿产调查研究所实验室利用标准技术进行分选.然后以每个样品 500 颗粒送往美国 Apatite to Zircon, Inc. 进行磷灰石裂变径迹测试.测试技术为 2011 年更新的磷灰石单颗粒 U-Pb 年龄和 FT 年龄双重定年技术(double dating),即运用 LA-ICP-MS 技术同时获得磷灰石的 U-Pb 年龄和 FT 年龄.如果再获得磷灰石的(U-Th)/He 年龄,即为三重定年技术(triple dating)(Berent *et al.*, 2005). 所获得数据如表 1.

所选用的低温热历史模拟技术是建立在实验退火模型基础之上,根据磷灰石 FT 颗粒年龄、围限径迹长度和 *Dpar* 等实测参数,综合 AFT 开始冷却年龄、成岩 U/Pb 年龄、成矿<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄和采样位置实测温度等约束条件进行的.热史反演模拟在地质应用中广泛,模拟质量根据径迹年龄与径迹长度 2 个 GOF 检验值来判断,若 GOF 检验值大于 5% 时,表明模拟热史“可以接受”,当检验值超过 50% 时,表明模拟结果是“高质量的”.本文选用的模拟软件为 Richard A. Ketcham 和 Apatite to Zircon, Inc. 开发,于 2011 年 10 月发布的 HeFTy1. 7. 3 (<ftp://ctlab.geo.utexas.edu/Ketcham/ft/HeFT-y/>). 磷灰石开始冷却年龄计算软件为 David X. Belton 开发的 TASC (Belton *et al.*, 2004; Ehlers *et al.*, 2005),该软件可根据实测磷灰石径迹长度数据和 FT 年龄计算磷灰石颗粒的开始冷却年龄(Cooling Onset Age). 本文选用的不同定年方法的封闭温度依次为:锆石 U-Pb 法为 >900 °C,阳起

石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法为 400~600 °C,金云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法为 300~350 °C,钠长石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 法为 150~350 °C,磷灰石 FT 法为 90~120 °C (Reiners *et al.*, 2005). 由于玢岩铁矿矿石中的磷灰石为主成矿阶段的产物,且磷灰石与磁铁矿共生,因此其形成年龄即为成矿年龄,所有的退火、冷却等行为均为成矿之后发生,可以成矿年龄为热历史的最早的开始年龄.包裹体测温等结果显示,玢岩铁矿成矿温度可致 400 °C 以上,为中高温热液矿床,因此磷灰石的形成温度也远大于退火温度(90~120 °C). 为了便于软件模拟,本文利用磷灰石流体包裹体测温结果,对 4 个矿床磷灰石的最低形成温度统一取为 180~240 °C,作为 5 件样品热史模拟的开始温度.其他成岩年龄和成矿年龄,均为热史模拟提供最早的约束年龄,两者结合构成本文热史模拟中第 1 个限制条件;第 2 个限制条件由磷灰石开始冷却年龄和退火温度构成.

## 4 4 个矿床的 AFT 定年与热历史分析结果

### 4.1 泥河铁矿

泥河铁矿样品 AP-1 采自钻孔岩心中,样品距地表距离为 720 m. 样品岩性为含浸染状磷灰石颗粒的磁铁矿矿石,位于主矿体内部,样品矿物组合为磷灰石—硬石膏—透辉石—黄铁矿—磁铁矿. 根据钻孔测温结果,样品所处位置的地温为 35~40 °C,泥河铁矿—1 100 m 以上的平均地温梯度为 26.9 °C/km(泥河铁矿勘探报告,2010).

AP-1 样品 25 个颗粒的 AFT 合并年龄为 79.1 $\pm$ 3.3 Ma,这一年龄小于成矿年龄 131.2 $\pm$ 0.6 Ma(金云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar,周涛发等,2011). 利用 TASC 可获得 AP-1 的开始冷却年龄为 111 $\pm$ 5 Ma. 由于成矿结束后矿体即进入迅速降温阶段,因此这 2 个年龄均反映了磷灰石形成后的热演化信息. 132 条围限径迹的长度—频率分布直方图为单峰型式,



平均长度为  $13.44 \pm 1.11 \mu\text{m}$ 。应用 HeFTy1.7.3 软件, 根据成矿年龄及其相应的封闭温度、AP-1 开始冷却年龄、围限径迹长度和  $D_{\text{par}}$  等参数对 AP-1 进行热史模拟, 退火模型选用 Ketcham *et al.* (2007a, 2007b), 模拟选同一  $D_{\text{par}}$  动力学组分 ( $D_{\text{par}} = 1.70 \sim 2.67 \mu\text{m}$ ), 曲线拟合采用 Monte Carlo 算法, 模拟结束条件选为 Good Paths = 200, 样品现今温度取为  $37.5 \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。模拟获得了高质量的热史曲线, 其模拟年龄为 79.0 Ma, 径迹年龄 GOF 检验值为 0.98, 模拟径迹长度为  $13.46 \pm 1.21 \mu\text{m}$ , 径迹长度 GOF 检验值为 1.00。AP-1 的 AFT 热历史曲线由两段组成(图 3), 表明泥河铁矿成矿后的降温冷却经历了 2 个阶段, 相应的冷却速率变化依次为 ①阶段  $7.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  ( $128\text{Ma} \rightarrow 110 \text{ Ma}$ ,  $240 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 105 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ②阶段  $0.64 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  ( $110 \text{ Ma} \rightarrow 0 \text{ Ma}$ ,  $105 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 分别对应成矿结束后矿体冷却直至与围岩温度达到平衡状态的快速冷却阶段、快速冷却结束后矿体长期的缓慢抬升冷却阶段。快速冷却阶段是由于成矿结束后失去热源供应而导致, 自 110 Ma 以后的缓慢冷却阶段则反映泥河铁矿成矿后的抬升是一个缓慢而平静的过程, 至今也未抬升出地表, 主矿体仍埋深于地下 600 m 之下, 是一个矿体和各蚀变带范围完整保存的全隐伏矿床。快速冷却阶段和

缓慢冷却阶段的的拐点温度为  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , 代表成矿过程结束时矿体所处深度的正常地温温度。

### 4.2 罗河铁矿

罗河铁矿的样品 AP-4 采自罗河铁矿—650 m 措施井, 位于主矿体内部, 距地表深度 670 m。样品矿物组合为磷灰石—硬石膏—透辉石—黄铁矿—磁铁矿。钻孔测温结果显示样品所处位置的地温为  $35 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ , 矿区平均地温梯度为  $27.6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$  (罗河铁矿详细地质勘探报告, 1980)。

AP-4 样品 25 个颗粒的 AFT 合并年龄为  $81.3 \pm 4.0 \text{ Ma}$ , 这一年龄也小于罗河铁矿成矿年龄  $132 \sim 131 \text{ Ma}$  (利用成矿岩体 U-Pb 年龄推测, 覃永军等, 2010)。利用 TASC 可求得 AP-4 的开始冷却年龄为  $118 \pm 7 \text{ Ma}$ , 2 个年龄均反映磷灰石自形成后的热演化信息。140 条围限径迹的长度—频率分布直方图为单峰型式, 平均长度为  $13.56 \pm 1.25 \mu\text{m}$ 。根据成矿年龄及其相应的封闭温度、AP-1 开始冷却年龄、围限径迹长度和  $D_{\text{par}}$  等参数对 AP-4 进行热史模拟, 模拟选同一  $D_{\text{par}}$  动力学组分 ( $D_{\text{par}} = 1.69 \sim 2.80 \mu\text{m}$ ), 模拟结束条件选为 Good Paths = 200, 样品现今温度取为  $37.5 \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ , 其余条件与 AP-1 相同。模拟获得了高质量的热史曲线, 其模拟年龄为 81.2 Ma, 径迹年龄 GOF 检验值为

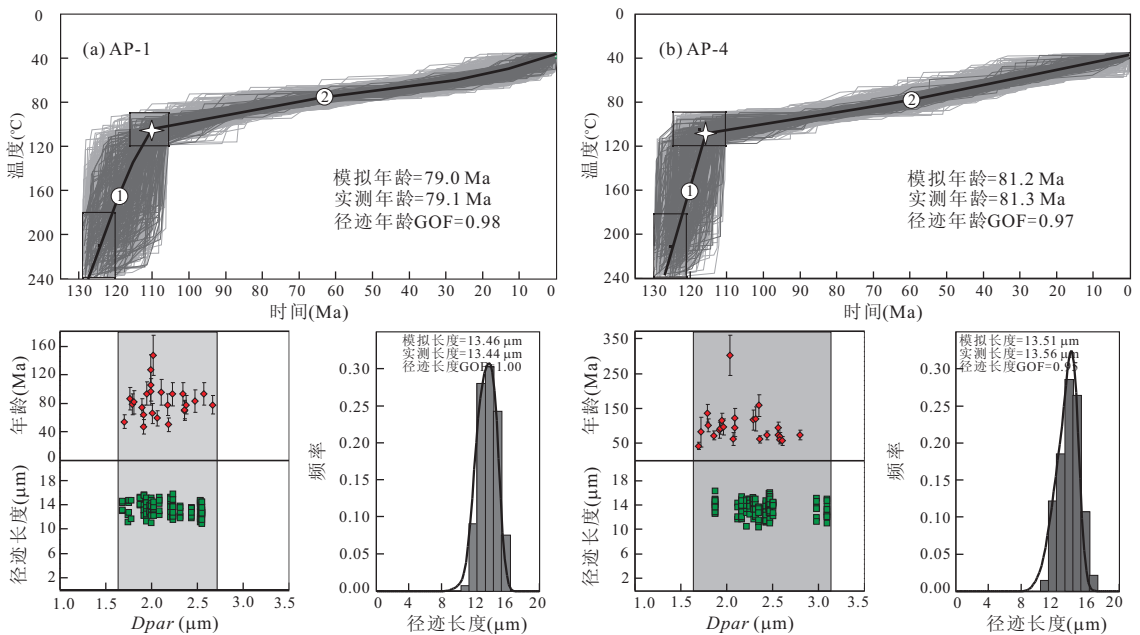


图 3 泥河铁矿 AP-1 和罗河铁矿 AP-4 的 AFT 热历史模拟曲线

Fig. 3 Thermal histories of AFT modeling of sample AP-1 from Nihe and sample AP-4 from Luohe iron deposit  
热历史图中, 浅灰色围限区代表“可以接受的”热史拟合曲线集(GOF 检验值 > 5%); 深灰色围限区代表“高质量的”热史模拟曲线集(GOF 检验值 > 50%)。代表热史曲线中分段间拐点, 热史模拟各赋予 2 个限制条件, 底部限制条件由磷灰石最低形成温度、U-Pb 年龄、 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年龄限定, 第二个限制条件由磷灰石退火温度和开始冷却年龄限定

0.97, 模拟径迹长度为  $13.51 \pm 1.34 \mu\text{m}$ , 径迹长度 GOF 检验值为 0.95.

热历史曲线形态与 AP-1 类似, 同样由两段组成(图 3), 表明罗河铁矿成矿后的降温冷却也经历了 2 个阶段, 相应的冷却速率依次为①阶段  $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  (128 Ma  $\rightarrow$  115 Ma,  $240 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 110 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ②阶段  $0.65 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  (115 Ma  $\rightarrow$  0 Ma,  $110 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 分别对应成矿结束后矿体冷却直至与围岩温度达到平衡状态的快速冷却阶段、快速冷却结束后长期的缓慢抬升冷却阶段. 整体热冷却过程与泥河铁矿完全相似, 这与罗河铁矿与泥河铁矿无论在成矿深度、矿床空间距离上均非常接近的地质事实是相符合的. ①、②阶段拐点温度为  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 4.3 梅山铁矿

梅山铁矿样品 MS303 采自梅山铁矿 - 303 m 中段主矿体内部, 距地表距离 320 m 左右. 所采样品为含磷灰石的磁铁矿矿石. 样品所处位置温度为  $25 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

MS303 样品 25 个磷灰石颗粒的 AFT 合并年龄为  $94.2 \pm 4.0 \text{ Ma}$ , 这一年龄小于成矿年龄  $122 \sim 125 \text{ Ma}$  (钠长石<sup>40</sup> Ar-<sup>39</sup> Ar, 余金杰等, 2002). 利用 TASC 可求得 MS303 的开始冷却年龄为  $134 \pm 6 \text{ Ma}$ , 这一年龄已经大于成岩、成矿年龄, 不具有参考意义, 但可以说明梅山铁矿磷灰石的开始冷却年龄较大, 与成矿年龄间隔极小. 150 条围限径迹的长

度-频率分布直方图为单峰型式, 平均长度为  $14.14 \pm 1.17 \mu\text{m}$ . 根据成矿年龄及其相应的封闭温度, 并取略早于罗河铁矿的开始冷却年龄, 利用围限径迹长度  $D_{par}$  等参数对 MS303 进行热史模拟, 模拟选同一  $D_{par}$  动力学组分 ( $D_{par} = 2.05 \sim 3.03 \mu\text{m}$ ), 模拟结束条件选为 Good Paths = 200, 样品现今温度取为  $27.5 \pm 2.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . 模拟获得了高质量的热史曲线, 其模拟年龄为  $94.2 \text{ Ma}$ , 径迹年龄 GOF 检验值为 1.00, 模拟径迹长度为  $14.08 \pm 1.28 \mu\text{m}$ , 径迹长度 GOF 检验值为 0.94. MS303 的 AFT 热历史曲线由四分段组成(图 4), 表明梅山铁矿成矿后的降温冷却经历了 4 个不同阶段, 相应的冷却速率变化依次为①阶段  $13.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  (123 Ma  $\rightarrow$  113 Ma,  $240 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 105 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ②阶段  $0.69 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  (113 Ma  $\rightarrow$  55 Ma,  $105 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ③阶段  $1.0 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  (55 Ma  $\rightarrow$  30 Ma,  $65 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ), ④阶段  $0.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{Ma}$  (30 Ma  $\rightarrow$  0 Ma,  $40 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 分别对应成矿结束后矿体冷却直至与围岩温度达到平衡的快速冷却阶段、快速冷却结束后早期较缓慢抬升冷却阶段、中期较快速抬升冷却阶段、后期缓慢抬升冷却阶段. 最早快速冷却阶段对应于成矿结束后失去热源供应而快速降温, 与泥河、罗河铁矿类似, 但自 115 Ma 以后的抬升冷却过程则可划分为 3 个阶段, 不同阶段持续时间、冷却速率存在较小差别, 但整体上仍然是一个较缓慢的抬升冷却过程. 这 3 个阶段整体的

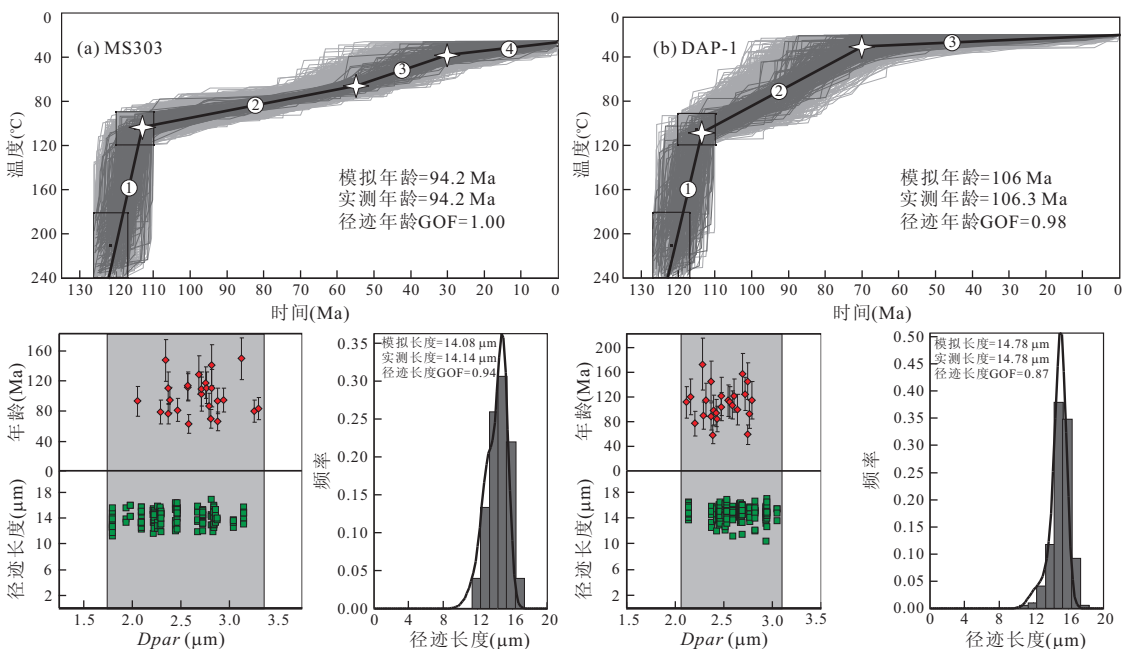


图 4 梅山铁矿 MS303 和东山铁矿 DAP-1 的 AFT 热历史模拟曲线

Fig. 4 Thermal histories of AFT modeling of sample MS303 from Meishan and sample DAP-1 from Dognshan iron deposit

平均冷却速率为 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 。相对于泥河、罗河铁矿较快抬升,导致主矿体最浅埋深距地表仅 $40\text{ m}$ 但仍未出露地表,也未遭受过剥蚀。①、②阶段拐点温度为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4.4 东山铁矿

东山铁矿采取了两件样品:DAP-1 和 DAP-2,分别采自东山铁矿露天采坑内距地表 $120\text{ m}$ 处和 $100\text{ m}$ 处,样品矿物组合为典型的透辉石(阳起石)一磷灰石一磁铁矿组合。DAP-1 样品 25 个颗粒的 AFT 合并年龄为 $106.3\pm 5.0\text{ Ma}$ ,DAP-2 的 25 颗粒合并年龄为 $106.9\pm 5.7\text{ Ma}$ ,均小于成矿年龄 $126\sim 129\text{ Ma}$ (阳起石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ ,马芳等,2010)。利用 TASC 可求得 DAP-1 的开始冷却年龄为 $136\pm 6\text{ Ma}$ ,DAP-2 开始冷却年龄为 $136\pm 8\text{ Ma}$ ,均已经大于成岩、成矿年龄,不具有实际参考意义,但同样可以说明东山铁矿磷灰石的开始冷却年龄较大,与成矿年龄间隔极小。DAP-1 的 195 条围限径迹长度的平均值为 $14.78\pm 1.04\text{ }\mu\text{m}$ ,DAP-2 的 201 条围限径迹平均长度为 $14.80\pm 1.03\text{ }\mu\text{m}$ ,长度一频率分布直方图均为单峰型式。

根据成矿年龄及其相应的封闭温度、取与梅山铁矿相同的开始冷却年龄、围限径迹长度  $Dpar$  等参数对 DAP-1 进行热史模拟,模拟选同一  $Dpar$  动力学组分( $Dpar=2.12\sim 2.79\text{ }\mu\text{m}$ ),模拟结束条件选为 Good Paths=200,样品现今温度取为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模拟获得了高质量的热史曲线,其模拟年龄为 $106\text{ Ma}$ ,径迹年龄 GOF 检验值为 $0.98$ ,模拟径迹长度为 $14.78\pm 1.07\text{ }\mu\text{m}$ ,径迹长度 GOF 检验值为 $0.87$ 。DAP-1 的 AFT 热历史曲线由三分段组成(图 4),表明东山铁矿成矿后的降温冷却经历了 3 个不同阶段,相应的冷却速率依次为①阶段 $16.25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ ( $123\text{ Ma}\rightarrow 115\text{ Ma}$ , $240\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),②阶段

$1.78\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ ( $115\text{ Ma}\rightarrow 70\text{ Ma}$ , $110\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),③阶段 $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ ( $70\text{ Ma}\rightarrow 0\text{ Ma}$ , $30\text{ }^{\circ}\text{C}\rightarrow 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),分别对应成矿结束后矿体冷却直至与围岩温度平衡的快速冷却阶段、快速冷却结束后的快速抬升冷却阶段、后期缓慢抬升剥蚀冷却阶段。最早快速冷却阶段是成矿结束后失去热源供应而快速降温造成,但自 $115\text{ Ma}$ 到 $70\text{ Ma}$ 的②阶段快速抬升冷却造成在 $70\text{ Ma}$ 左右磷灰石的温度即已经降至 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,表明此时矿体基本已经接近地表,后期则是在近地表环境下长期缓慢冷却的③阶段,造成矿体顶部浅色蚀变带和浅部矿体的剥蚀。这与凹山一东山矿田矿体出露地表的地质事实是完全对应的。①、②阶段拐点温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

DAP-2 样品的模拟与 DAP-1 类似,模拟选同一  $Dpar$  动力学组分( $Dpar=2.21\sim 2.92\text{ }\mu\text{m}$ ),模拟结束条件选为 Good Paths=100。样品现今温度取为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。模拟同样获得了高质量的热史曲线(图 5),其模拟年龄为 $106\text{ Ma}$ ,径迹年龄 GOF 检验值为 $0.94$ ,模拟径迹长度为 $14.73\pm 1.18\text{ }\mu\text{m}$ ,径迹长度 GOF 检验值为 $0.69$ 。其曲线的整体形态与 DAP-1 完全类似,在此不再做详细分析。

## 5 讨论

### 5.1 玢岩铁矿成矿深度

针对玢岩铁矿的成矿深度,前人研究普遍认为其小于 $2\text{ km}$ 或者 $2\text{ km}$ 左右(宁芜研究项目编写小组,1978)。成矿地质体闪长玢岩具有浅成、超浅成特征,可见矿物斑晶的中空骸晶结构、暗化边结构(图 6a)及基质斜长石的流动构造(图 6b)等反映近地表或浅成条件下就位的特征。矿体一般产于闪长玢岩体穹窿内部或其与地层的接触带中,因此成矿深度

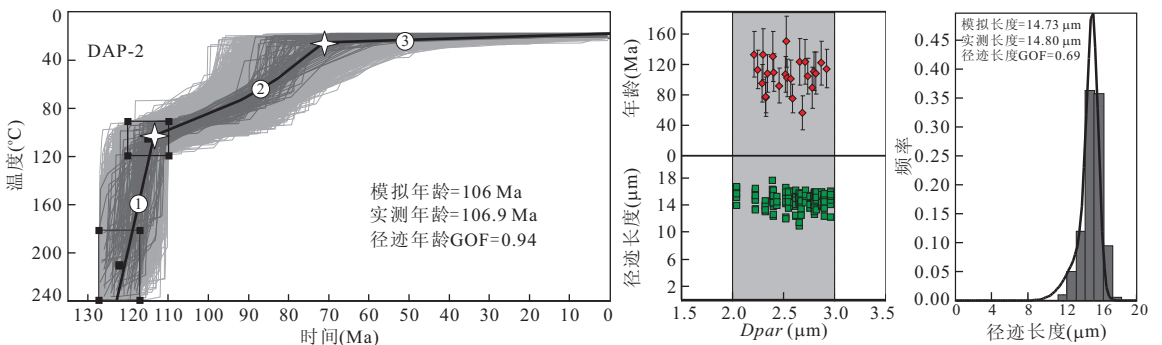


图5 东山铁矿 DAP-2 的 AFT 热历史模拟曲线

Fig.5 Thermal history of AFT modeling of sample DAP-2 from Dongshan iron deposit



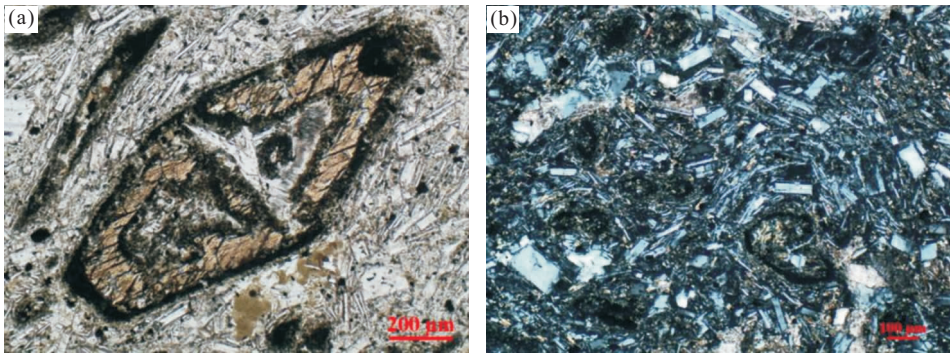


图 6 (a)闪长玢岩角闪石斑晶的形成的骸晶结构、暗化边结构单偏光以及(b)斜长石基质的流动构造正交光

Fig. 6 The skeletal and dark side texture of hornblende phenocryst in diorite porphyrite single polarizing (a) and the flow structure of plagioclase in groundmass orthogonal light (b)

表 2 4 个玢岩铁矿矿石 AFT 热史模拟分段特征

Table 2 Subsection characteristic of thermal histories of four porphyry iron deposits

样号	矿床	①、②阶段间拐点温度/深度	冷却速率			
AP-1	泥河铁矿	105 °C/1.7 km	①7.5 °C/Ma	②0.64 °C/Ma		
			128 Ma→110 Ma	110 Ma→0 Ma		
			240 °C→105 °C	105 °C→35 °C		
AP-4	罗河铁矿	105 °C/1.7 km	①8.44 °C/Ma	②0.63 °C/Ma		
			128 Ma→112 Ma	112 Ma→0 Ma		
			240 °C→105 °C	105 °C→35 °C		
MS303	梅山铁矿	110 °C/1.8 km	①13.5 °C/Ma	②0.69 °C/Ma	③1.0 °C/Ma	④0.5 °C/Ma
			123 Ma→113 Ma	113 Ma→55 Ma	55 Ma→30 Ma	30 Ma→0 Ma
			240 °C→105 °C	105 °C→65 °C	65 °C→40 °C	40 °C→25 °C
			①16.25 °C/Ma	②1.78 °C/Ma	③0.14 °C/Ma	
DAP-1	东山铁矿	105 °C/1.7 km	123 Ma→115 Ma	115 Ma→70 Ma		70 Ma→0 Ma
			240 °C→110 °C	110 °C→30 °C		30 °C→20 °C

与闪长玢岩成岩深度相近. 魏家秀(1984)利用等值线法、气液包体均一时刻压力测定法、地质剖面法 3 种方法测定了罗河铁矿成矿时的静岩压力为 45.596~61.95 MPa, 换算成矿深度为 1.72~2.34 km, 与地质推断基本一致.

本次研究所获得的 4 个矿床的热历史曲线集同样反映出成矿深度的信息. 由于热液矿床成矿作用结束后, 矿体会因为失去热源供应而冷却降温, 当温度降至矿体所处深度正常地温时则和地温保持一致. 若获得此时矿体的温度, 就可以利用当时的地温梯度推算出矿体的就位深度. 这种方法与马昌前等(1994)提出的利用岩浆侵位之前围岩的原始温度和地温梯度推算岩体侵位深度的原理完全一致. 尤其在浅成环境下, 温度对深度的指示作用要比压力更为灵敏.

4 个玢岩铁矿的热历史模拟分段特性(表 2)表现出泥河铁矿、罗河铁矿、东山铁矿成矿结束后快速冷却①阶段与缓慢抬升冷却②阶段的拐点温度均为

105 °C, 梅山铁矿为 110 °C. 其拐点温度即可代表成矿冷却结束后矿体所处深度的正常地温. 鉴于庐枞、宁芜盆地均为火山岩盆地, 属于热异常区, 取成矿作用结束时的地温梯度为 50 °C/km (傅清平等, 2004), 由此可推算出泥河铁矿、罗河铁矿、东山铁矿的矿体就位深度均为 1.7 km 左右, 梅山铁矿为 1.8 km 左右. 考虑到每个矿床本身矿体垂向距离可至 500 m 左右, 并结合前述的地质推断法和压力计法, 最终可认为这 4 个矿床的成矿深度均为 2.0 km 左右.

## 5.2 玢岩铁矿成矿后抬升、剥蚀情况

目前这 4 个矿床的埋藏深度均远小于 2 km: 泥河铁矿为地表下 665~1 065 m; 罗河铁矿为地表下 425~856 m; 梅山铁矿为地表下 40~530 m; 凹山—东山矿田的铁矿体均已出露地表, 经历过剥蚀作用. 在成矿深度接近的情况下, 导致这种差异埋深的原因只可能是成矿后的差异抬升、剥蚀作用, 即翟裕生院士(2000)提出的矿床变化与保存作用的狭义

内容。

磷灰石裂变径迹数据所蕴含的信息始终只是与温度相关的冷却信息,而不是直接的抬升、剥蚀信息,因为(净)抬升速率是冷却速率与地温梯度的比值,在地温梯度已知的情况下,可利用磷灰石裂变径迹数据所反映的冷却信息通过换算而获得定量的抬升、剥蚀信息。然而令人遗憾的是,到目前为止,准确的恢复一个区域不同地质时期的地温梯度尚存在一定的技术难度,本次研究也同样无法解决。但本次研究针对的庐枞盆地和宁芜盆地具有相似的地质背景,空间距离也较近,因此在不同地质时期应该具有相同的或极为接近的地温梯度,这样就可以利用冷却速率的相对高低代表(净)抬升速率的相对大小,在一定程度上达到以磷灰石裂变径迹数据所反映的冷却信息来分析玢岩铁矿成矿后的抬升、剥蚀情况的目的。

4个矿床成矿后的差异抬升、剥蚀作用,首先表现在磷灰石样品 FT 年龄和样品埋藏深度的相关性、围限径迹长度与样品埋藏深度的相关性和围限径迹长度分布特征中。4个矿床成矿年龄接近,均为 130 Ma 左右,但 AFT 年龄均小于其成矿年龄,并且与样品埋藏高度存在良好的正相关性。表现为埋藏位置越高(埋藏深度越浅),AFT 年龄越大(图 7a)。4个矿床磷灰石样品的围限径迹长度均较大(平均 13.44~14.80 μm),与原始长度较为接近(Carlson *et al.*, 1999),表明样品形成后经历的退火作用整体较弱,这也在一定程度上反映了玢岩铁矿成矿深度浅的特征。同时各个矿床样品的径迹长度之间又有较明确的差异,表现为随样品埋藏深度变浅而平均围限径迹长度增大(图 7b),与 AFT 年龄与深度的相关性完全相同。围限径迹长度分布型式均为窄而高的单峰式分布,反映样品没有经历复杂的热历史,均为单调冷却过程(Gleadow *et al.*, 1986; Wagner

and Haute, 1992)。且径迹长度分布集中程度也与样品埋藏深度存在相关性,表现为埋藏深度越浅、AFT 年龄越大者长度分布越集中(分布图越窄),长度分布最大频率值越大(分布图越高)(图 3-5)。

在成矿年龄、成矿深度和地温环境相近的情况下,AFT 年龄、围限径迹长度与样品埋藏深度之间的一致相关性反映 4 个矿床成矿后在单调冷却过程中冷却速率存在明显差别。因为在 50 °C/km 的地温梯度下,2 km 左右的成矿深度处的正常地温为 120 °C 左右,为磷灰石部分退火带(PAZ)的底部温度,因此成矿结束后样品即可进入部分退火带。在通过部分退火带时,样品的冷却速率决定样品在部分退火带中的停留时间,进而决定其退火程度,最终表现为样品 FT 年龄和样品形成年龄(成矿年龄)接近程度及围限径迹长度分布特征。东山铁矿的样品(DAP-1、DAP-2)目前的埋藏深度最浅,AFT 年龄(106 Ma)与成矿年龄最为接近,围限径迹长度(平均 14.79 μm)也最大,径迹长度分布最为集中,因此它经历过的退火作用最弱,通过部分退火带时的冷却速率最大,即由抬升、剥蚀作用导致的矿体净抬升速率最大。同理,可由上述的 AFT 年龄、围限径迹长度与样品埋藏深度之间的一致相关性定性判断出 4 个矿床的磷灰石样品通过部分退火带时的冷却速率从大到小的顺序为东山铁矿>梅山铁矿>罗河铁矿>泥河铁矿,这也就是 4 个矿床成矿后矿体通过部分退火带时的净抬升速率的大小顺序。

必须指出的是,造成 AFT 年龄与样品埋藏深度相关性的因素不能排除成矿深度的细微差别所带来的影响。若原始成矿深度相对较深,则矿体所处位置的地温会较高,那么在相同的抬升冷却速率下,较深的矿体必然会较晚通过部分退火带,因而造成 AFT 年龄的差异。这可能是导致泥河铁矿和罗河铁矿的 AFT 年龄差别的主要原因。由于泥河铁矿和

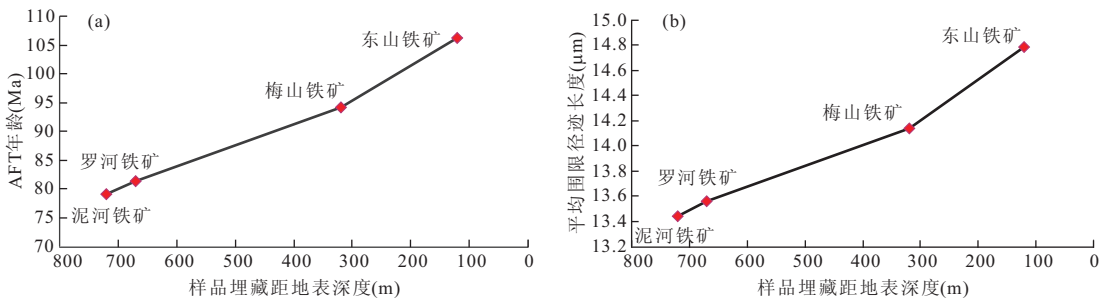


图 7 4 个玢岩铁矿 AFT 年龄和样品深度相关关系(a)以及平均围限径迹长度和样品深度相关关系(b)

Fig. 7 Correlation relations of AFT age vs. sample depth (a) and mean confined track length vs. sample depth (b) from four porphyry iron deposits

罗河铁矿平面距离仅为 2 km 左右,因此两者在成矿后的抬升速率必然不会出现明显差异。但泥河铁矿目前的埋藏深度整体要比罗河铁矿深 200 m 左右,且泥河铁矿产于闪长玢岩穹窿内部,罗河铁矿产于闪长玢岩体顶部和火山岩地层内(图 2),所以可推断泥河铁矿原始就位深度就比罗河铁矿深 200 m 左右。正是这种原始成矿深度的细微差异造成了泥河铁矿 AFT 年龄比罗河铁矿年龄小 2 Ma 左右。但这种细微差别在现有的成矿深度研究尚不能有效“识别”。

其次,4 个矿床成矿后的差异抬升、剥蚀作用在样品的热史模拟曲线集可更为明显地得到反映。根据热史模拟曲线可以获得每个矿床成矿后冷却速率的分段特征(表 2)。可以看出,庐枞盆地的泥河铁矿和罗河铁矿在完成快速冷却后的缓慢抬升冷却速率分别为  $0.64\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$  和  $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ , 相对较小,反映出这 2 个矿床成矿结束后长期处于一个缓慢、稳定的冷却(抬升)过程,至今均是矿体埋藏于地下 400 m 以下的全隐伏矿床,所有的矿体和蚀变范围均保存完整。AP-1、AP-4 样品的采样深度分别为距地表 720 m 和 670 m,而在 110 Ma 左右时的深度为 1.7 km,由此可推算在 110 Ma 以来,泥河、罗河铁矿上覆地层厚度减薄了 1 km 左右,这就是成矿后的剥蚀程度。

宁芜盆地的梅山铁矿在快速冷却完成后也处于一个整体较为平稳的抬升过程,但抬升速率相对泥河铁矿和罗河铁矿则稍快,自 113 Ma 至今冷却过程中冷却速率发生过小幅度变化,平均冷却速率为  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 。这种抬升造成目前主矿体距地表最浅仅 40 m 距离。由于玢岩铁矿具有典型的围岩蚀变三分带,铁矿体上部发育厚度可致 400 m 左右浅色蚀变带,因此梅山铁矿尽管矿体尚未遭受剥蚀,但矿体上部的浅色蚀变带已经遭受了大规模剥蚀。由 MS303 样品在 113 Ma 时的深度为 1.8 km,而现今采样深度为距地表 320 m,可推算出 113 Ma 以来,梅山铁矿上覆地层剥蚀掉的厚度为 1.5 km 左右。东山铁矿在快速冷却完成后,迅速进入快速抬升冷却阶段,自 115 Ma 至 70 Ma 的冷却速率达到了  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ ,是梅山铁矿的两倍左右,导致东山铁矿在 70 Ma 左右就已经接近地表(温度降至  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右),此后则进入长期的缓慢抬升和剥蚀过程,造成矿体上部浅色蚀变带基本被剥蚀掉并且部分矿体也遭受了剥蚀作用破坏。DAP-1、DAP-2 的采样深度分别为 120 m 和 100 m,而 115 Ma 时的埋藏深度为 1.7

km,表明 115 Ma 以来东山铁矿的净抬升剥蚀厚度为 1.6 km 左右。

综合前面两方面的论述可以看出,东山铁矿成矿后冷却(净抬升)速率最大,剥蚀程度最大,导致矿体已暴露地表并经受过剥蚀;泥河、罗河铁矿成矿后冷却(净抬升)最慢,剥蚀程度最小,是矿体和蚀变范围完整保存的深埋藏、全隐伏矿床;梅山铁矿的冷却(净抬升)速率、剥蚀程度介于东山铁矿和泥河、罗河铁矿之间,矿体顶部浅色蚀变带遭受了剥蚀,但矿体恰好完整保存,处于一种最有利于勘探和开发的“临界保存状态”。

### 5.3 宁芜、庐枞盆地自 110 Ma 以来的差异隆升剥蚀

由于梅山铁矿和凹山—东山矿田为宁芜盆地的玢岩铁矿典型代表,泥河铁矿和罗河铁矿为庐枞盆地玢岩铁矿的典型代表,因此这 4 个矿床自 110 Ma 后的抬升剥蚀过程也反映了宁芜、庐枞 2 个火山岩盆地自 110 Ma 左右以后的隆升剥蚀过程。总体来说,宁芜盆地与庐枞盆地在 110 Ma 以后均为隆升剥蚀状态,但宁芜盆地的隆升剥蚀程度大于庐枞盆地。东山铁矿和梅山铁矿所代表宁芜盆地比罗河铁矿和泥河铁矿所代表的庐枞盆地多剥蚀去了约 550 m 厚度的地层。

110 Ma 左右所对应的时代为早、晚白垩世之交,在此刻发生的区域性构造运动可以从区域地球物理资料和地层分布中找到记录信息。根据下扬子地区地震剖面揭示并结合钻井资料,证实该区在早、晚白垩世之交经历了压扭性构造体制向伸张构造体制的转换,对应的地质事件为黄桥事件(张永鸿,1991,张沛等,2009),主要表现为浦口组( $K_2p$ )底部发育一套砾岩层。该事件导致浦口组地层沉积前的大面积剥蚀、夷平作用,形成了浦口组与下部地层的区域性角度不整合,而浦口组砂砾岩正好是宁芜盆地内四大火山岩旋回结束以后以角度不整合方式覆盖于火山岩层之上的地层,在庐枞盆地中为杨湾组( $K_{1y}$ )砾岩、砂岩,也为角度不整合方式覆盖于火山岩地层之上。两者均含石膏层,都属于区域性隆升、剥蚀作用产物。因此宁芜、庐枞盆地玢岩铁矿成矿后的早期抬升、剥蚀作用可以和黄桥事件相对应,与区域构造演化同步。

黄桥事件之后到现在,庐枞盆地沉积的总地层厚度(包括杨湾组)最大为 1 853 m,宁芜盆地(包括浦口组)的总地层最大厚度为 1 190 m,两者相差约 660 m,与裂变径迹热史模拟获得的约 550 m 的隆升

剥蚀差异幅度极为接近,表明基础地质证据和裂变径迹热史模拟结果吻合,均证明宁芜、庐枞盆地自110 Ma左右的早、晚白垩世之交之后的抬升剥蚀幅度存在差异。

## 6 结论

(1)东山、梅山、罗河、泥河4个玢岩铁矿的成矿深度均为2 km左右,成矿后主体经历了因失去热源而导致的快速冷却降温 and 后期抬升剥蚀造成的缓慢冷却降温2个过程。(2)4个玢岩铁矿AFT合并年龄依次为(106.3±5.4 Ma, 1 $\sigma$ )、(94.2±4.0 Ma, 1 $\sigma$ )、(81.3±4.0 Ma, 1 $\sigma$ )、(79.1±3.3 Ma, 1 $\sigma$ ),且AFT年龄和围限径迹长度随样品埋藏深度变浅而增大,分别更接近成矿年龄(130 Ma左右)和原始径迹长度。导致这种差异的原因主要是4个矿床成矿后的差异抬升剥蚀作用导致磷灰石样品通过部分退火带时的冷却速率存在大小差别,但泥河铁矿与罗河铁矿的AFT年龄和围限径迹长度差别可能是成矿深度细微差异所致。(3)结合定量热史模拟,证明导致宁芜、庐枞盆地玢岩铁矿埋藏深度不同的主要原因为成矿后的差异抬升、剥蚀作用。4个矿床成矿结束后均处于抬升、剥蚀状态,抬升剥蚀速率和程度从大到小依次为东山铁矿→梅山铁矿→罗河、泥河铁矿。在长期的抬升剥蚀作用下,东山铁矿矿体已经被抬升出地表并被剥蚀掉浅色蚀变带和矿体顶部,梅山铁矿浅色蚀变带部分遭受剥蚀,但主矿体依然完整保存,处于一种最有利于勘探和开发的“临界保存状态”。泥河、罗河铁矿则完全未遭受剥蚀作用,仍为深埋藏的全隐伏矿床。(4)自110 Ma以来宁芜盆地中部的抬升剥蚀幅度大于其北部,而宁芜盆地整体的抬升剥蚀幅度大于庐枞盆地,导致宁芜盆地的玢岩铁矿大部分矿体接近地表或出露地表。2个盆地最早的抬升剥蚀作用与早晚白垩世之交的区域性黄桥事件同步。

致谢:野外工作得到安徽省地质调查院、安徽五鑫矿业开发有限公司的大力支持和马钢罗河矿业公司孙仕平工程师、宝钢梅山矿业有限公司赵海工程师的热情帮助;在写作过程中笔者多次和资源学院沈传波副教授商讨,审稿专家对论文提出了宝贵的修改意见,在此一并致以衷心感谢!

## References

Belton, D. X., Brown, R. W., Kohn, B. P., et al., 2004.

Quantitative resolution of the debate over antiquity of the central Australian landscape: implications for the tectonic and geomorphic stability of cratonic interiors. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(1–2): 21–34. doi:10.1016/S0012-821X(03)00705-2

Bernet, M., Garver, J. I., 2005. Fission-track analysis of detrital zircon. In: Reiners, P. W., Ehlers, T. A., eds., *Low-temperature thermochronology: techniques, interpretations, and applications*. *RIMG*, 58: 205–238. doi:10.2138/rmg.2005.58.8

Cao, X. Z., Sun, H. S., Xu, B. J., et al., 2008. Research on effective methods and approaches of rapid evaluation of potential concealed deposit(ore body) prospecting. China University of Geosciences Press, Wuhan, 26–30(in Chinese).

Carlson, W. D., Donelick, R. A., Ketchum, R. A., 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: I. Experimental results. *American Mineralogist*, 84(9): 1235–1255.

Chakurian, A. M., Arehart, G. B., Donelick, R. A., et al., 2003. Timing constraints of gold mineralization along the Carlin trend utilizing apatite fission-track,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , and apatite (U-Th)/He methods. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 98(6): 1159–1171. doi:10.2113/gsecongeo.98.6.1159

Chen, B. L., 2001. Calculation of metallogenic depth of lode gold deposits from mineralization structure-dynamics. *Chinese Journal of Geology*, 36(3): 380–384(in Chinese with English abstract).

Du, J. G., Chang, D. Y., 2011. Consideration on the deep-iron ore deposits prospecting in the middle-lower Yangtze metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 687–698(in Chinese with English abstract).

Ehlers, T. A., Chaudhri, T., Kumar, S., et al., 2005. Computational tools for low-temperature thermochronometer interpretation. In: Reiners, P. W., Ehlers, T. A., eds., *Low-temperature thermochronology: techniques, interpretations, and applications*. *RIMG*, 58: 589–622. doi:10.2138/rmg.2005.58.22

Fan, Y., Zhou, T. F., Yuan, F., et al., 2010. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning-Wu basin and their metallogenic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2715–2728(in Chinese with English abstract).

Fan, Y., Zhou, T. F., Yuan, F., et al., 2011. Geochronology of the porphyry-like type iron deposits in Ning-Wu basin: evidence from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  phlogopite dating. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 810–820(in Chinese with English abstract).

Fu, Q. P., McInnes, B. I. A., Davies, P. J., 2004. Numerical

- modelling of thermal and exhumation histories of magmatic ore deposits. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 555—562 (in Chinese with English abstract).
- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., Green, P. F., 1986. Confined fission-track lengths in apatite: a diagnostic-tool for thermal history analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94(4): 405—415. doi: 10.1007/BF00376334
- Ketcham, R. A., Carter, A., Donelick, R. A., et al., 2007a. Improved measurement of fission-track annealing in apatite using *c*-axis projection. *American Mineralogist*, 92(5—6): 789—798. doi:10.2138/am.2007.2280
- Ketcham, R. A., Carter, A., Donelick, R. A., et al., 2007b. Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *American Mineralogist*, 92(5—6): 799—810. doi:10.2138/am.2007.2281
- Li, X. M., Gong, W. J., Tan, K. X., et al., 2001. Preliminary discussion on the geological characteristics and mineralogenic epoch of Xiaogela copper deposit in Lanping basin. *Journal of East China Geological Institute*, 24(1): 17—18 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. M., Li, D. W., Yang, W. R., et al., 2005. Evidence from fission track ages for the tectonic uplift of the Himalayan orogen during Late Cenozoic. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(2): 147—152 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. J., Wang, J. P., Zheng, D. W., et al., 2010. Exploration prospect and post-ore denudation in the northwestern Jiaodong gold province, China: evidence from apatite fission track thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3597—3611 (in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., Fan, H. R., Ni, P., et al., 2004. Fluid inclusion. Science Press, Beijing, 230—240 (in Chinese).
- Lv, G. X., Liu, R. X., Wang, F. Z., et al., 2000. A method for estimating the depth of petrogenesis and metallogenesis. *Journal of Geomechanics*, 6(3): 50—62 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. Q., Yang, K. G., Tang, Z. H., et al., 1994. Magmatodynamics of granitoids—theory, method and a case study of the eastern Hubei granitoids. China University of Geosciences Press, Wuhan, 60—70 (in Chinese).
- Ma, F., Jiang, S. Y., Xue, H. M., 2010. Early Cretaceous mineralizations Ningwu basin: insight from actinolite  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  laser dating results. *Mineral Deposits*, 29(2): 283—289 (in Chinese with English abstract).
- Maksaev, V., Munizaga, F., Zentilli, M., et al., 2009. Fission track thermochronology of Neogene plutons in the principal Andean Cordillera of central Chile (33—35 degrees S): implications for tectonic evolution and porphyry Cu-Mo mineralization. *Andean Geology*, 36(2): 153—171. doi: 10.5027/andgeoV36n2—a01
- Marton, I., Moritz, R., Spikings, R., 2010. Application of low-temperature thermochronology to hydrothermal ore deposits: formation, preservation and exhumation of epithermal gold systems from the eastern Rhodopes, Bulgaria. *Tectonophysics*, 483(3—4): 240—254. doi:10.1016/j.tecto.2009.10.020
- McInnes, B. I. A., Evans, N. J., 2005. Application of thermochronology to hydrothermal ore deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 467—498. doi: 10.2138/rmg.2005.58.18
- McInnes, B. I. A., Farley, K. A., Sillitoe, R. H., et al., 1999. Application of apatite (U-Th)/He thermochronometry to the determination of the sense and amount of vertical fault displacement at the Chuquicamata porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology*, 94(6): 937—947. doi: 10.2113/gsecongeo.94.6.937
- Mei, L. F., Liu, Z. Q., Tang, J. G., et al., 2010. Mesozoic intracontinental progressive deformation in western Hunan-Hubei-eastern Sichuan provinces of China: evidence from apatite fission track and balanced cross-section. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 161—174 (in Chinese with English abstract).
- Ning-Wu Research Project Writing Team, 1978. Porphyry-like type iron deposits in Ning-Wu basin. Geological Publishing House, Beijing, 87—162 (in Chinese).
- Qin, Y. J., Zeng, J. N., Zeng, Y., et al., 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of ore-bearing pyroxene-trachyandesite porphyry and its geological significance in Luohu-Nihe iron ore field in Luzong basin, southern Anhui, China. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 851—862 (in Chinese with English abstract).
- Reiners, P. W., Ehlers, T. A., Zeitler, P. K., 2005. Past, present, and future of thermochronology. In: Reiners, P. W., Ehlers, T. A., eds., Low-temperature thermochronology: techniques, interpretations, and applications. *RIMG*, 58: 1—18. doi:10.2138/rmg.2005.58.1
- Shen, C. B., Mei, L. F., Fan, Y. F., et al., 2005. Advances and prospects of apatite fission track thermochronology. *Geological Science and Technology Information*, 24(2): 57—63 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. B., Mei, L. F., Xu, Z. P., et al., 2007. Fission track thermochronology evidence for Mesozoic-Cenozoic uplifting of Daba Mountain, central China. *Acta Petrologica Sinica*,



- 23(11): 2901—2910 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. B., Mei, L. F., Xu, S. H., 2009. Fission track dating of mesozoic sandstones and its tectonic significance in the eastern Sichuan basin, China. *Radiation Measurements*, 44(9—10): 945—949. doi:10.1016/j.radmeas.2009.10.001
- Shi, X. B., Qiu, X. L., Liu, H. L., et al., 2006. Cenozoic cooling history of Lingcang granitoid batholith, western Yunnan: evidence from fission track data. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(1): 135—142 (in Chinese with English abstract).
- Skinner, B. J., 1997. Hydrothermal mineral deposits: what we do and don't know. In: Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* (third edition). John Wiley & Sons, Inc., New York, 1—30.
- Sun, F. Y., Jin, W., Li, B. L., et al., 2000. Consideration about mineralization depth of lode gold deposits. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30: 27—30 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. C., Wu, Y. C., Chu, G. Z., et al., 1998. Geology of copper-gold polymetallic deposits in the along-Changjiang area of Anhui Province. Geological Publishing House, Beijing, 45—85 (in Chinese).
- Tang, Y. H., Yuan, W. M., Han, C. M., et al., 2003. Fission track age of the Yuerya gold deposit. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(6): 573—578 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. P., Zhai, Y. S., Liu, J. J., et al., 2008. A new approach to post-ore change and preservation of ore deposits: fission track analysis. *Advances in Earth Science*, 23(4): 421—427 (in Chinese with English abstract).
- Wanger, G. A., Haute, V. D. P., 1992. Fission-track dating. Kulwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Wei, J. X., 1984. Characters of fluid inclusions and mechanism of mineralization alterations for the volcanic deposits in the Lujiang-Zongyang basin. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*, 1: 40—56 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. H., Zhou, Z. Y., Chang, Y., et al., 2010. Genesis of Daba arcuate structural belt related to adjacent basement: constraints from fission-track and (U-Th)/He thermochronology. *Sci. China (Series D)*, 40(12): 1684—1696 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. T., Yuan, W. M., Gong, Q. J., et al., 2010. The analysis of zircon fission track's ore-forming epoch in Shaquanzi copper-iron deposits, Xinjiang. *China Mining Magazine*, 19(4): 105—108 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Wang, S. C., Wang, L. F., 2000. Metallogenic thermal history of the Wulonggou gold deposits in East Kunlun Mountains in the light of fission track thermochronology. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(4): 389—395 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Wang, S. C., Wang, L. F., 2001. Apatite and zircon fission track study on the mineralization age and its thermal history of Nanliang gold deposits, eastern Hebei, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 225—230 (in Chinese with English abstract).
- Yu, J. J., Mao, J. W., 2002.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Ar albite dating and significance of the Porphyry-like type iron deposits in Ning-Wu basin. *Progress in Natural Science*, 12(10): 1059—1063 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., Deng, J., Peng, R. M., 2000. Research contents and methods for post-ore changes, modifications and preservation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(4): 340—345 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y. S., Deng, J., Wang, J. P., et al., 2004. Researches on deep ore prospecting. *Mineral Deposits*, 23(2): 142—149 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. H., Zhou, S. H., Wan, T. F., et al., 2007. Depth of ore deposit formation and prognosis deep-seated ore deposits. *Geological Bulletin of China*, 26(12): 1509—1518 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. H., Xu, J. H., Yu, X. Q., et al., 2011. The diagenetic and metallogenic depth: main constraints and the estimation methods. *Geological Bulletin of China*, 30(1): 112—125 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P., Zhou, Z. Y., Xu, C. H., 2009. Thermo-tectonic history of the Lower Yangtze area since Late Cretaceous: evidence from apatite fission track analysis of sandstones from Pukou Formation. *Offshore Oil*, 29(4): 26—32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. H., 1991. Huangqiao transform event in tectonic evolution of Lower Yangtze region and the Meso-Paleozoic hydrocarbon exploration target. *Oil & Gas Geology*, 12(4): 439—448 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. G., Wu, M. A., Zhang, Y. Y., et al., 2011. Geological Characteristics and genesis of the Nihe Fe-S deposit, Lujiang Country, Anhui Province. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 789—801 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T. F., Fan, Y., Yuan, F., et al., 2011. Petrogenesis and metallogeny study of the volcanic basins in the middle and Lower Yangtze metallogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 712—730 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 曹新志,孙华山,徐伯俊,等,2008. 隐伏矿床(体)找矿前景快速评价的有效方法与途径研究. 武汉:中国地质大学出版社,26—30.
- 陈柏林,2001. 从成矿构造动力学探讨脉状金矿床成矿深度. 地质科学,36(3):380—384.
- 杜建国,常丹燕,2011. 长江中下游成矿带深部铁矿找矿的思考. 地质学报,85(5):687—698.
- 范裕,周涛发,袁峰,等,2010. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义. 岩石学报,26(9):2715—2728.
- 范裕,周涛发,袁峰,等,2011. 宁芜盆地玢岩型铁矿床的成矿时代:金云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 同位素年代学研究. 地质学报,85(5):810—820.
- 傅清平,McInnes, B. I. A., Davies, P. J., 2004. 岩浆成矿体系的热演化和剥露史的数字模拟. 地球科学——中国地质大学学报,29(5):555—562.
- 李小明,龚文君,谭凯旋,等,2001. 兰坪盆地小格拉铜矿床地质特征及成矿时代初探. 华东地质学院学报,24(1):17—18.
- 刘德明,李德威,杨巍然,等,2005. 喜马拉雅造山带晚新生代构造隆升的裂变径迹证据. 地球科学——中国地质大学学报,30(2):147—152.
- 柳振江,王建平,郑德文,等,2010. 胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据. 岩石学报,26(12):3597—3611.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,等,2004. 流体包裹体. 北京:科学出版社,230—240.
- 吕古贤,刘瑞珣,王方正,等,2000. 成岩成矿深度构造校正测算和实测. 地质力学学报,6(3):50—62.
- 马昌前,杨坤光,唐仲华,等,1994. 花岗岩类岩浆动力学:理论方法及鄂东南花岗岩类例析. 武汉:中国地质大学出版社,60—70.
- 马芳,蒋少湧,薛怀民,2010. 宁芜盆地凹山和东山铁矿床中阳起石的激光<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 年代学研究. 矿床地质,29(2):283—289.
- 梅廉夫,刘昭茜,汤济广,等,2010. 湘鄂西—川东中生代陆内递进扩展变形:来自裂变径迹和平衡剖面的证据. 地球科学——中国地质大学学报,35(2):161—174.
- 宁芜研究项目编写小组,1978. 宁芜玢岩铁矿. 北京:地质出版社,87—162.
- 覃永军,曾键年,曾勇,等,2010. 安徽南部庐枞盆地罗河—泥河铁矿田含矿辉石粗安玢岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. 地质通报,29(6):851—862.
- 沈传波,梅廉夫,凡元芳,等,2005. 磷灰石裂变径迹热年代学研究的进展与展望. 地质科技情报,24(2):57—63.
- 沈传波,梅廉夫,徐振平,等,2007. 大巴山中—新生代隆升的裂变径迹证据. 岩石学报,23(11):2901—2910.
- 施小斌,丘学林,刘海龄,等,2006. 滇西临沧花岗岩基新生代剥蚀冷却的裂变径迹证据. 地球物理学报,49(1):135—142.
- 孙丰月,金巍,李碧乐,等,2000. 关于脉状热液金矿床成矿深度的思考. 长春科技大学学报,30(增刊):27—30.
- 唐永成,吴言昌,储国证,等,1998. 安徽沿江地区铜多金属矿床地质. 北京:地质出版社,45—85.
- 汤云晖,袁万明,韩春明,等,2003. 峪耳崖金矿的成矿时代裂变径迹研究. 地球学报,24(6):573—578.
- 王建平,翟裕生,刘家军,等,2008. 矿床变化与保存研究的裂变径迹新途径. 地球科学进展,23(4):421—427.
- 魏佳秀,1984. 卢枞盆地火山岩矿床流体包裹体研究及矿化蚀变机理. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊,1:40—56.
- 徐长海,周祖翼,常远,等,2010. 大巴山弧形构造带形成与两侧隆起的关系:FT 和(U-Th)/He 低温热年代约束. 中国科学:地球科学,40(12):1684—1696.
- 徐晓彤,袁万明,龚庆杰,等,2010. 利用裂变径迹定年分析新疆沙泉子铜铁矿成矿时代. 中国矿业,19(4):105—108.
- 袁万明,王世成,王兰芬,2000. 东昆仑五龙沟金矿床成矿热历史的裂变径迹热年代学证据. 地球学报,21(4):389—395.
- 袁万明,王世成,王兰芬,2001. 裂变径迹分析法研究河北南梁金矿床成矿时代及其热历史. 矿物学报,21(2):225—230.
- 余金杰,毛景文,2002. 宁芜玢岩铁矿钠长石<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 定年及意义. 自然科学进展,2(10):1059—1063.
- 翟裕生,邓军,彭润民,2000. 矿床变化与保存的研究内容和研究方法. 地球科学——中国地质大学学报,25(4):340—345.
- 翟裕生,邓军,王建平,等,2004. 深部找矿研究问题. 矿床地质,23(2):142—149.
- 张德会,周圣华,万天丰,等,2007. 矿床形成深度与深部成矿预测. 地质通报,26(12):1509—1518.
- 张德会,徐九华,余心起,等,2011. 成岩成矿深度:主要影响因素与压力估算方法. 地质通报,(1):112—125.
- 张沛,周祖翼,许长海,2009. 苏皖下扬子区晚白垩世以来的构造—热历史:浦口组砂岩磷灰石裂变径迹证据. 海洋石油,29(4):26—32.
- 张永鸿,1991. 下扬子区构造演化中的黄桥转换事件与中、古生界油气勘探方向. 石油与天然气地质,12(4):439—448.
- 赵文广,吴明安,张宜勇,等,2011. 安徽省庐江县泥河铁硫矿床地质特征及成因初步分析. 地质学报,85(5):789—801.
- 周涛发,范裕,袁峰,等,2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用. 地质学报,85(5):712—730.