

陈正乐, 韩凤彬, 杨农等. 江西相山铀矿田地貌剥蚀特征及其控矿意义——磷灰石裂变径迹证据. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2371-2384, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.022.

Chen Z L, Han F S, Yang N, et al. Topographic erosive diversities of the Xiangshan uranium ore-field, Jiangxi province and its implications for ore-preservation: evidences from fission track dating of apatite. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(7): 2371-2384, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.022.

## 江西相山铀矿田地貌剥蚀特征及其控矿意义 ——磷灰石裂变径迹证据

陈正乐<sup>1</sup>, 韩凤彬<sup>1</sup>, 杨农<sup>1</sup>, 王平安<sup>2</sup>, 宫红良<sup>1</sup>, 邵飞<sup>3</sup>,  
唐湘生<sup>3</sup>, 徐金山<sup>3</sup>, 周永贵<sup>1</sup>, 王永<sup>1</sup>

1 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

2 北京建龙国基投资有限公司, 北京 100060

3 核工业 270 研究所, 江西南昌县 330200

**摘 要** 本文以数字高程(DEM)地貌特征分析为基础, 采用磷灰石裂变径迹测试和温度-时间反演模拟研究, 分析江西相山铀矿田铀成矿后剥蚀程度的差异性, 结合已知矿床的成矿特征, 探讨地貌剥蚀程度与矿体保存之间的关系, 为区域找矿提供指导. 通过 DEM 合成图像和水系分布特征, 表明相山铀矿田是一个遭受中等侵蚀的地貌区, 相山主峰南北和东西侧地貌侵蚀差异特征明显. 统计分析表明, 已经发现的铀矿床、点的分布与次级火山机构关系密切, 相山南部的次火山机构剥蚀较深, 西部次火山机构剥蚀相对弱, 而北部和西北部则处于中等剥蚀程度. 磷灰石裂变径迹测试结果表明, 相山铀矿田的南部和东部开始剥蚀的时间早于西部, 但晚于相山主峰的剥蚀. 利用磷灰石的裂变径迹长度和温度参数, 进一步开展了温度-时间的反演模拟研究, 结果显示相山西部快速隆升发生于 40~60 Ma 之间, 相山南部和东部的快速隆升发生于 60~75 Ma 之间, 相山主峰的快速隆升发生于 75~100 Ma 之间, 表明相山主峰、相山东部及南部较西部经历了较长时间的剥蚀. 结合现今区域地质体出露特征及铀矿化蚀变类型的空间展布规律、成矿深度的估算等, 推测相山铀矿田东部和南部剥蚀程度较深, 早期可能形成的中低温铀矿体被剥蚀殆尽; 北部剥蚀程度中等, 地表出露了形成深度稍深的碱交代蚀变矿床; 而西部剥蚀程度较低, 地表发育浅部低温成矿的酸交代蚀变铀矿床. 据此推断, 相山铀矿田的西部深部具有很好的找矿潜力.

**关键词** 相山铀矿, 地貌剥蚀, 矿产保存, 磷灰石裂变径迹

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.07.022

中图分类号 P631

收稿日期 2011-03-18, 2012-03-08 收修定稿

### Topographic erosive diversities of the Xiangshan uranium ore-field, Jiangxi province and its implications for ore-preservation: evidences from fission track dating of apatite

CHEN Zheng-Le<sup>1</sup>, HAN Feng-Bin<sup>1</sup>, YANG Nong<sup>1</sup>, WANG Ping-An<sup>2</sup>, GONG Hong-Liang<sup>1</sup>,  
SHAO Fei<sup>3</sup>, TANG Xiang-Sheng<sup>3</sup>, XU Jin-Shan<sup>3</sup>, ZHOU Yong-Gui<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>

1 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 100081 Beijing, China

2 Beijing Jianlong Investment Company, Beijing 100060, China

3 Research Institute No. 270, CNNC, Nanchang, Jiangxi 330200, China

**Abstract** This paper mainly presents analyses results of fission track dating of apatite and Digital

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划(2007CB411305)、全国危机矿山接替资源找矿项目(200436009 和 20089950)和国家自然科学基金项目(41072071)联合资助.

**作者简介** 陈正乐, 男, 1967 年出生, 研究员, 从事于构造地质与矿田构造研究, E-mail: chenzhengle@263.net

Elevation Modeling (DEM) of the Xiangshan landscape, to discuss the relationship of the topographic erosion after uranium mineralization with the ore-preservation. DEM synthetic image and runoff system distribution suggested that the Xiangshan ore-field was a kind of medium erosive landform, with apparently erosive diversities in south-north and east-west side of the Xiangshan main peak. The distribution of uranium deposits was highly related to sub-volcanic apparatus, with most sub-volcanic apparatus heavy eroded in southern ore-field, weakly eroded in western, and medium eroded in northern and northwestern. Apatite in volcanic rocks both from the peak of Xiangshan mountain and around the Xiangshan ore-field was chosen out and applied to fission track dating. It was yielded that rocks from southern and northern ore-field were earlier exposed at the surface than those from western areas, but later than those from the peak of Xiangshan mountain. Temperature-time modeling by the length and age of the fission track of apatite showed that the rapid exhumation of western Xiangshan areas took place during 60~40Ma, in southern and eastern parts during 75~60 Ma, and in the peak of Xiangshan Mountain during 100~75 Ma, indicating that the peak and southern and eastern Xiangshan ore-fields had experienced much longer time erosion than western ore-fields. Our results are fairly consistent with the nowadays regional exposed characteristics of volcanic rocks, with distribution patterns of mineralization-related alternation, and with the temperature and depth of uranium mineralization, suggesting that southern and eastern parts of the Xiangshan ore-field should be relatively heavy eroded, leading to the depletion of those medium-epithermal ore-bodies probably earlier formed. Northern and northwestern parts be moderately eroded, leading alkaline-altered-related uranium ore-bodies relatively deeply formed under relative high temperature exposed at the surface. While with weak erosion in western, most uranium ore-bodies probably still preserved and acid-alteration-related uranium ore-bodies under lower temperature exposed at the surface. As a result, it was proposed that western deep areas were of favorable for further ore-prospecting.

**Keywords** Xiangshan uranium ore-field, Topographic erosive diversities, Ore-preservation, Fission track dating of apatite

## 1 引言

矿床是特定地质作用的产物,都有一定的原始形成深度(图1),并往往都经历了多期次的改造叠加.一些矿体,由于其形成之后经历强烈的构造隆升而被剥蚀殆尽(图1中的矿体3),或者由于其形成深度太深、后期剥露程度不够而暂时不易为人类所探知(图1中的矿体1,  $|H_1 - H|$  往往大于 2000 m)、或不能为人类所利用( $|H_1 - H|$  往往大于 1000 m),而另一些含矿地质体则处于合适的剥蚀程度而出露于地表或保存于地表以下一定的深度( $|H_2 - H|$  一般小于 1000 m),能为人类所探知、利用而成为矿床(图1中的矿体2)<sup>[1]</sup>.因此,矿床学研究应兼顾矿床的形成过程和矿床的改造-保存过程两个方面.然而,由于各种条件的限制,前人多只关注矿床的形成过程,而少有研究涉及成矿后变化与保存<sup>[1-2]</sup>.

江西相山铀矿田是我国最大的火山岩型铀矿床,属于中、低温热液型矿床<sup>[3-5]</sup>.对于该矿床的岩石学、矿化蚀变特征及其成矿模式、控矿条件及其成矿机理等方面,前人已有大量深入的分析和研究<sup>[5-15]</sup>,也已有不少的研究涉及了相山矿田不同矿区的成矿深度<sup>[2,16-17]</sup>,但关于相山火山盆地的构造剥蚀程度研究相对较低,仅张万良等<sup>[2,16-17]</sup>利用 ETM 数据及其盆地和周缘地貌特征,分析了相山火山盆地的剥蚀程度差异性特征<sup>[2,16]</sup>,并结合邹家山矿区的流体包裹体测试结果,估算了相山邹家山矿区的侵蚀深度<sup>[2,17]</sup>.

磷灰石的裂变径迹测试及其温度-时间反演模拟技术已广泛地被用于限定山脉隆升-剥露过程、断层的活动历史及其盆地的构造热模拟反演等<sup>[18-34]</sup>,但较少用于矿床学研究.由于磷灰石记录的热演化历史,可以定性-半定量推测山体的隆升-剥露程度,因而结合成矿温度分析,也可以定性地限定矿床的

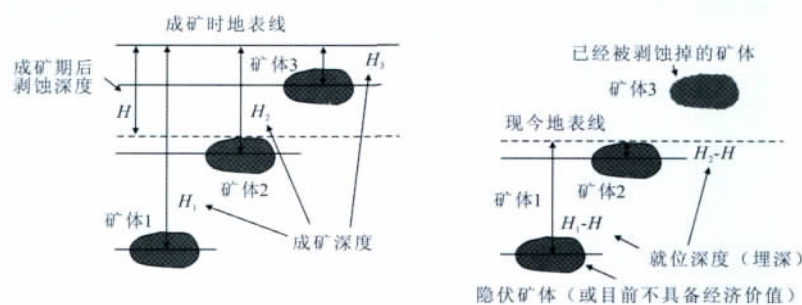


图1 矿体形成后地质体剥蚀程度与矿体保存之间关系示意图

图中:  $H$  为成矿期后区域地质体剥蚀深度,  $H_1$ ,  $H_2$  和  $H_3$  分别代表矿体 1、矿体 2 和矿体 3 的形成深度,  $|H_1 - H|$  和  $|H_2 - H|$  代表现今矿体的就位深度(埋深), 矿体 1 为潜伏的矿体, 或由于埋藏太深 ( $|H_1 - H|$  往往大于 1000 m) 而目前无法为人类所利用; 矿体 3 代表剥蚀掉的矿体; 只有矿体 2, 其埋深  $|H_2 - H|$  目前一般小于 1000 m, 而能为人类所探知、利用。

Fig. 1 Relationship of erosive degree of ore-bodies after its formation with ore-preservation

In this figure,  $H$  represents the erosive depth after the ore-formation.  $H_1$ ,  $H_2$  and  $H_3$  represent the ore-formation depth of ore-body 1, 2 and 3 respectively.  $|H_1 - H|$  and  $|H_2 - H|$  represent the depth of ore-bodies at present time. Ore-body 1 is deeply buried, generally deeper than 1000m, which probably can not be used or explored at present time. Ore-body 3 has been already eroded. Only ore-body 2 is buried at right place and can be explored, whose depth usually is less than 1000 m.

现今就位深度(图 1)。本文就是利用 DEM 数据合成图像, 分析了相山矿田地貌特征, 采用了磷灰石裂变径迹测试分析及其温度-时间模拟反演, 分析相山矿田不同区域构造隆升-剥蚀的差异性, 结合现今区域地质和矿床空间展布特征, 探讨构造隆升-剥蚀程度与矿体保存之间的关系, 进而指出区域找矿方向。

## 2 相山铀矿田区域地质背景与地貌特征

### 2.1 区域地质背景

相山铀矿田位于扬子准地台与华南褶皱系过渡部位, 处在 NE 向赣杭火山岩成矿带与 NNE 向大王山-于山花岗岩成矿带交汇部位的相山大型塌陷式火山盆地内(图 1)<sup>[11,35-37]</sup>。该盆地两层结构<sup>[7,9,14]</sup>(图 1), 基底为震旦系浅变质岩, 其内有加里东期花岗岩侵入, 下石炭统、上三叠统碎屑岩系, 仅在火山盆地的东侧出露, 盖层为一套上侏罗统火山岩系及出露于火山盆地西侧的白垩纪红层。上侏罗统火山岩系由酸性、中酸性火山熔岩、火山碎屑岩及少量正常沉积夹层构成。大规模火山活动期后次火山岩侵入, 以不规则的弧形和半环形围绕盆缘的北、东、南部出露, 岩性主要为花岗斑岩和似斑状花岗岩。

区域地质研究表明<sup>[5,8,11,35-37]</sup>, 相山地区前寒武纪为强烈的凹陷沉降区, 自扬子运动之后, 进入板内构造发展阶段。加里东运动期间, 发生区域性变质作用。在中生代末期东亚大陆的岩石圈由大增厚转为大减薄, 导致了区域剧烈的构造岩浆喷发和侵入

活动, 同时伴随有大规模成矿作用<sup>[35-37]</sup>。在晚侏罗世, 相山地区在浅变质岩基底基础上发生沉降, 形成断陷盆地, 并伴随有小规模的火山喷发活动。侏罗纪晚期-早白垩世, 火山喷发活动加强。在火山喷发晚期, 发生持续性的火山塌陷作用, 形成相山破火山口, 伴随了次火山岩的侵入。燕山晚期, 相山地区西部沉积了一套红色的陆源碎屑沉积, 不整合覆盖于相山火山盆地之上<sup>[11,35-37]</sup>。喜山期, 相山地区为持续性的区域性隆升-剥蚀阶段, 相山破火山口经长时间的剥蚀而出露于地表, 但仍保留了一个完整的破火山口的形态<sup>[2,5,35-37]</sup>。

燕山晚期, 多期次活动的南北向断裂与基底 EW 向的褶皱-断裂、NE 向断裂构造及其火山构造的复合、叠加改造, 形成了相山地区各种断裂控矿构造和储矿裂隙构造体系, 并伴随有多期次、大规模的热液活动。热液与围岩发生物质和能量的交换, 产生蚀变作用, 导致了热液所携带的大量成矿物质在合适的构造部位卸载而富集成矿<sup>[5,8-15,35-37]</sup>。相山铀矿田已经发现有 20 多个铀矿床和矿化点, 规模较大的矿床主要分布于盆地的西部和北部<sup>[5,8-15]</sup>(图 2), 如西部的邹家山、居隆庵, 西北部的横涧、岗上英和北部的沙洲、巴泉、红卫和东北部的云际矿床等, 东部和南部仅在上谿、浯潭等有限的几个点发现矿化迹象。

### 2.2 相山矿田火山-矿床地貌特征

DEM 合成图像显示出, 相山破火山是分别以相山(1290 m)和芙蓉山(1060 m)两个中心构成的典型火山盆地地貌(图 3), 具有明显的双环状地貌特

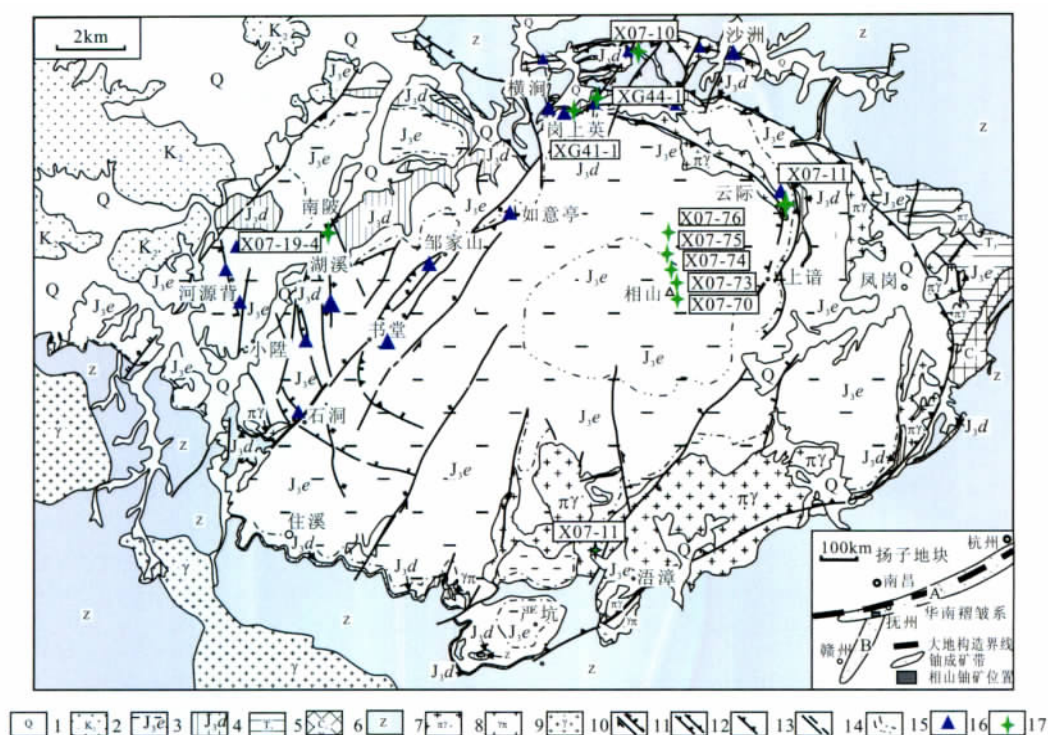


图2 相山铀矿田地地质构造简图及其大地构造位置图(据文献[15]修改)

1—第四系;2—上白垩统;3—上侏罗统鹅湖岭组;4—上侏罗统打鼓顶组;5—三叠系;6—石炭系;7—震旦系;8—似斑状花岗岩;9—花岗斑岩;10—加里东期花岗岩;11—正断层和走滑断层;12—火山塌陷构造;13—逆断层;14—火山岩性界线;15—推测性质未明断层;16—铀矿床;17—磷灰石测试样品采样位置。

Fig. 2 Simplified geological map of the Xiangshan uranium ore-field and its tectonic location

1—Quaternary; 2—Upper Cretaceous; 3—Ehuling formation, Upper Jurassic; 4—Daguding formation, Upper Jurassic; 5—Triassic; 6—Carboniferous; 7—Sinian; 8—Porphyritic-like granite; 9—granite-porphry; 10—Caledonian granite; 11—normal and strike-slip fault; 12—volcano-collapse-related extensional structure; 13—thrust fault; 14—boundary line of volcanic rocks; 15—inferred fault; 16—uranium deposits, 17—location of samples for fission track dating of apatite.

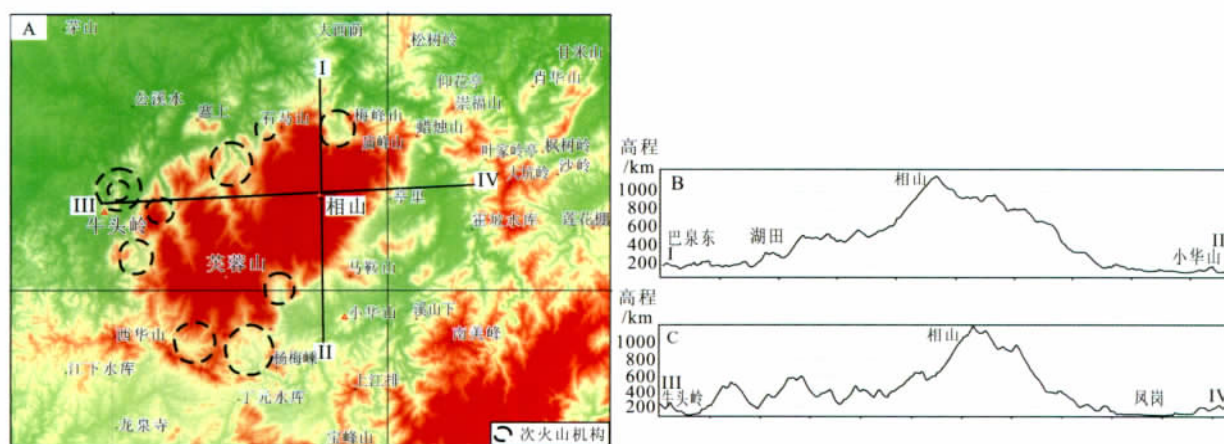


图3 相山铀矿田及周缘地区 DEM 图像

图中的次火山机构来自于 ETM 遥感图像的解译。

Fig. 3 DEM image of the Xiangshan ore-field and its adjacent areas

In this figure, sub-volcanic apparatus are cited from interpretation of ETM images.

征,放射状、树枝状水系发育(图4),相山主峰的四周地貌差异明显(图3(B,C)),东侧和南侧坡度大,残余侵蚀面虽然存在但不甚清晰,高度较北侧和西

侧相对较低;北侧和西侧则明显的存在500~600 m的残余侵蚀面,残余侵蚀面以上沟谷稀疏。上述特征表明相山地区属于低山、中等侵蚀的地貌区,仍处于地



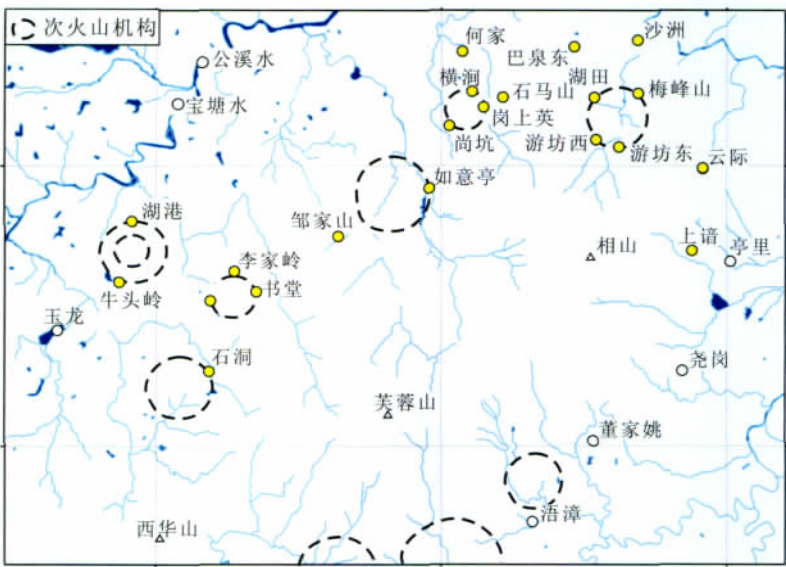


图 4 相山地区水系与主要矿点分布简图

图中的次火山机构来自于 ETM 遥感图像的解译.

Fig. 4 Surface runoff system and distribution of uranium deposits in the Xiangshan area  
In this figure, sub-volcanic apparatus are cited from interpretation of ETM images.

表侵蚀阶段.

结合遥感图像解译分析,发现已有的相山铀矿床、点的分布与火山盆地的次级火山机构关系密切(图 3、4),如湖港、河元背、牛头岭和牛头山等矿点受控于河元背次火山口(破火山),湖港、河元背处于次火山口内环侵蚀区,牛头岭和牛头山处于外环侵蚀区,牛头山还处于放射状断裂之上;梅峰山南、湖田、梅峰山、游坊东和游坊西矿点受控于湖田—梅峰山次火山口;居隆庵、书塘和李家岭矿点则受控于居隆庵次火山口;横涧、岗上英和石马山矿床受控于横涧次火山口. 根据各矿床、矿化点的地表高程及区域地貌剥蚀特征,可以将各次级火山机构剥蚀程度划

分为强、较强、中等和较弱等 4 个等级. 在此基础上,对各次火山口的火山机构类型、出露高程及其剥蚀程度作进一步的统计分析(表 1、2). 结果表明,总体上火山盆地的西侧和北侧的次级火山机构均处于残余侵蚀面以下的侵蚀地貌区,侵蚀强度相对较弱或中等,而南部的一些次火山机构则处于强剥蚀状态;已发现的矿床、点主要分布的高程范围在 100~500 m 之间,均处于残余侵蚀面以下的侵蚀区范围内,规模相对较大的铀矿床,如西部的邹家山、居隆庵,西北部的横涧、岗上英等位于侵蚀程度相对较低或中等的次火山机构内,仅北部的沙洲和云际铀矿床处于相对较强剥蚀的次火山机构内.

表 1 相山铀矿田中次火山机构地貌特征表

Table 1 Topographic characteristics of sub-volcanic apparatus in Xiangshan uranium ore-field

| 名称     | 次火山机构类型  | 地貌类型 | 出露高程/m | 现存的火山机构部位 | 所处地貌区  |
|--------|----------|------|--------|-----------|--------|
| 相山     | 锥状       | 隆起   | 1209   | 顶部        | 中高山侵蚀区 |
| 芙蓉山    | 锥状       | 隆起   | 1060   | 顶部        | 中高山侵蚀区 |
| 横涧-岗上英 | 火山通道     | 环状   | 175    | 根部        | 低山侵蚀区  |
| 石马山    | 次火山      | 半环状  | 180    | 上部        | 低山侵蚀区  |
| 石洞     | 火山通道(锥状) | 环状   | 185    | 上部        | 低山侵蚀区  |
| 巴泉     | 火山通道     | 环状   | 120    | 根部        | 低山侵蚀区  |
| 梅峰山-湖田 | 次火山口     | 环状   | 290    | 上部        | 低山侵蚀区  |
| 河元背    | 次火山口     | 环状   | 110    | 中部        | 低山侵蚀区  |
| 居龙庵    | 次火山口     | 环状   | 360    | 上部        | 低山侵蚀区  |

表 2 相山铀矿田部分铀矿床(点)、火山机构地貌特征表  
Table 2 Topographic characteristics of some uranium deposits in Xiangshan ore-field

| 位置  | 矿床(点) | 次火山地貌      | 高程(m) | 剥蚀程度   |
|-----|-------|------------|-------|--------|
| 西部  | 湖港    | 河元背次火山口    | 96    | 中等剥蚀   |
|     | 牛头岭   |            | 108   |        |
|     | 河元背   |            | 110   |        |
|     | 牛头山   |            | 126   |        |
|     | 源头    |            | 117   | 中等剥蚀   |
|     | 何家    |            | 119   |        |
|     | 石马山   | 石马山次火山口    | 159   | 较弱剥蚀   |
|     | 横排山   |            | 418   |        |
|     | 李家岭   | 居隆庵次火山口    | 357   | 中等偏低剥蚀 |
|     | 书塘    |            | 480   |        |
|     | 居隆庵   |            | 270   |        |
|     | 邹家山   |            | 262   | 中等剥蚀   |
|     | 乐家    |            | 380   |        |
|     | 船坑    |            | 411   |        |
|     | 如意亭   |            | 179   | 中等剥蚀   |
|     | 六公区   |            | 306   |        |
|     | 平顶山   |            | 370   |        |
| 西北部 | 石洞    | 石洞火山通道     | 174   |        |
|     | 横涧    | 横涧—岗上英火山通道 | 143   | 中等剥蚀   |
|     | 岗上英   |            | 159   |        |
|     | 倘坑    |            | 133   |        |
|     | 罕坑    |            | 295   |        |
| 北部  | 沙洲    | 晚期次火山通道    | 87    | 较强剥蚀   |
|     | 沙洲西南  |            | 224   |        |
|     | 梅峰山南  | 湖田—梅峰山次火山口 | 195   | 中等剥蚀   |
|     | 湖田    |            | 234   |        |
|     | 梅峰山   |            | 291   |        |
|     | 游坊东   |            | 318   |        |
|     | 游坊西   |            | 335   |        |
|     | 巴泉    | 巴泉火山通道     | 168   | 较强剥蚀   |
|     | 巴泉东   |            | 240   |        |
| 东北部 | 云际    |            | 436   |        |
| 东部  | 上诸    |            | 379   | 强剥蚀    |
|     | 尧岗    |            | 186   |        |
| 东南部 | 董家珖   |            | 201   |        |
|     | 浯漳    |            | 146   |        |

### 3 裂变径迹测试分析

#### 3.1 样品的采集

本次所测样品采样平面位置见图 2 和表 3, 分别采集了围绕相山火山盆地周缘的次火山岩(似斑状花岗岩和花岗斑岩)和相山主峰剖面的碎斑熔岩等样品. 样品的高程是根据轻便型 GPS 结合 1:5 万地形图确定的. 根据笔者前期相山火山杂岩体的 SHRIMP 锆石测年结果, 相山火山-侵入杂岩体的侵位时代为 142~133 Ma 之间, 鹅湖岭组碎斑熔岩、似斑状花岗岩和花岗斑岩的侵位时代都在 135~133 Ma 之间(未发表的数据, 陈正乐).

#### 3.2 磷灰石裂变径迹测试分析

我们挑选了碎斑熔岩、似斑状花岗岩和花岗斑岩中的磷灰石, 开展了裂变径迹测年分析. 所有磷灰石的裂变径迹测试分析是在中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室完成, 流程采用外探测器法, 年龄计算经 Zeta 校正, 标准样为 Durango 磷灰石, 铀标准玻璃为美国国家标准局 SRM612, 年龄计算公式见公式(1)<sup>[39-41]</sup>. 测试结果见表 3, 图 5、6、7.

$$T_{\text{UNK}} = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left[ 1 + \lambda_D \zeta \frac{\rho_s}{\rho_i} \rho_d \right], \quad (1)$$

式中的  $\zeta$  由下式求得:

$$\zeta = \frac{[e^{\lambda_D t_{\text{STD}}} - 1]}{\lambda_D [\rho_s / \rho_i]_{\text{STD}} \rho_d},$$

其中:  $t_{\text{UNK}}$  未知矿物年龄,  $t_{\text{STD}}$  标准矿物裂变径迹年龄,  $\rho_s / \rho_i$  标准矿物裂变径迹自发与诱发径迹密度比,  $\rho_d$  铀标准玻璃的诱发径迹密度,  $\lambda_D$  为  $^{238}\text{U}$  的衰变常数,  $\lambda_D = 1.55125 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ .

测试结果显示:

(1)从总体上分析, 所有样品的磷灰石裂变径迹表观年龄远远小于其原岩碎斑熔岩、花岗斑岩和似斑状花岗岩的形成时代, 表明其年龄值代表了样品后期的构造隆升—剥蚀的热冷却年龄, 而非岩浆冷却年龄;

(2)相山主峰至山脚的样品(X07-70、73~76), 裂变径迹表观年龄集中在 67~91 Ma 之间, 总体上显示出与高程的负相关关系, 但有波动, 进一步指示了磷灰石的裂变径迹记录了山体隆升—剥露的热演化历史, 但其过程可能较为复杂. 样品一般具有较多的长径迹, 一般位于 14 至 16  $\mu\text{m}$  之间, 平均径迹长度较长, 普遍大于 12.5  $\mu\text{m}$ , 表明样品后期仅经历了一期次的部分退火作用, 其长度配分曲线都为单峰

表 3 江西相山铀矿田火山岩中磷灰石裂变径迹测试结果表

Table 3 Analyses results of fission track dating of apatite in volcanic rocks from the Xiangshan uranium ore-field

| 样品号      | 采样位置   | 岩性     | 样高(m) | Ne | $\rho_d(N_d)$<br>( $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ) | $\rho_n(N_n)$<br>( $\times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ ) | $\rho_n(N_n)$<br>( $\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ) | U<br>Concentration<br>(ppm) | $P(X^2)$<br>% | r     | Fission track<br>Age(Ma $\pm 1\sigma$ ) | Mean track<br>Length( $\mu\text{m}\pm 1\sigma$ )<br>(N) | Standard<br>Deviation<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|----------|--------|--------|-------|----|--|--|--|-----------------------------|---------------|-------|---|---|--|
| XG44-1   | 石马山    | 碎斑熔岩   | 386   | 22 | 1.190(2978)  | 1.489(195)   | 0.700(917)   | 7.4                         | 60.6          | 0.913 | 44.4 $\pm$ 5.1                          | 11.50 $\pm$ 0.15(70)                                    | 1.28                                       |
| XG41-1   | ZK19-2 | 花岗斑岩   | —200  | 25 | 1.180(2950)  | 1.340(256)   | 0.719(1373)  | 7.6                         | 87.6          | 0.835 | 38.6 $\pm$ 4.2                          | 12.48 $\pm$ 0.14(75)                                    | 1.28                                       |
| X07-19-4 | 南陂     | 碎斑熔岩   | 121   | 25 | 1.130(2835)  | 1.481(197)   | 0.743(988)   | 8.2                         | 6.7           | 0.526 | 39.6 $\pm$ 4.5                          | 11.94 $\pm$ 0.18(70)                                    | 1.54                                       |
| X07-05   | 巴泉     | 似斑状花岗岩 | 750   | 22 | 1.170(2921)  | 1.760(301)   | 0.647(1107)  | 6.9                         | 44.3          | 0.647 | 55.8 $\pm$ 5.9                          | 12.23 $\pm$ 0.15(72)                                    | 1.27                                       |
| X07-10   | 云际     | 似斑状花岗岩 | 180   | 23 | 1.160(2892)  | 1.724(262)   | 0.632(960)   | 6.8                         | 82.7          | 0.763 | 55.5 $\pm$ 6.1                          | 11.76 $\pm$ 0.15(70)                                    | 1.29                                       |
| X07-11   | 梧樟     | 似斑状花岗岩 | 205   | 25 | 1.150(2864)  | 1.249(216)   | 0.536(927)   | 5.8                         | 83.2          | 0.617 | 47.0 $\pm$ 5.3                          | 11.50 $\pm$ 0.18(77)                                    | 1.62                                       |
| X07-70   | 相山     | 碎斑熔岩   | 1219  | 26 | 0.926(2315)  | 3.165(538)   | 0.669(1138)  | 9.0                         | 17.8          | 0.762 | 76.7 $\pm$ 7.6                          | 13.00 $\pm$ 0.14(82)                                    | 1.31                                       |
| X07-73   | 相山     | 碎斑熔岩   | 1159  | 28 | 0.915(2287)  | 0.203(444)   | 0.479(1048)  | 6.5                         | 33.4          | 0.599 | 67.9 $\pm$ 6.9                          | 12.72 $\pm$ 0.13(70)                                    | 1.15                                       |
| X07-74   | 相山     | 碎斑熔岩   | 1080  | 27 | 0.904(2259)  | 2.440(532)   | 0.474(1227)  | 6.6                         | 27.2          | 0.779 | 81.5 $\pm$ 8.0                          | 12.47 $\pm$ 0.14(90)                                    | 1.40                                       |
| X07-75   | 相山     | 碎斑熔岩   | 973   | 27 | 0.893(2231)  | 2.405(558)   | 0.464(1076)  | 6.5                         | 90.6          | 0.813 | 81.1 $\pm$ 8.1                          | 12.40 $\pm$ 0.16(85)                                    | 1.53                                       |
| X07-76   | 相山     | 碎斑熔岩   | 633   | 29 | 0.882(2204)  | 2.950(593)   | 0.501(1006)  | 7.1                         | 95.9          | 0.829 | 91.0 $\pm$ 9.1                          | 12.54 $\pm$ 0.16(81)                                    | 1.49                                       |

表中  $P(X^2)$  为自由度  $(n-1)$   $\chi^2$  值的几率;  $r$  为单个颗粒径迹之间的相关系数; 实验条件为: 磷灰石蚀刻条件为 7%  $\text{HNO}_3$ , 室温, 35 s; 外探测器采用低铀含量白云母, 蚀刻条件为 40%  $\text{HF}$ , 室温, 20 min; Zeta 标定选用国际标准样 Durango 磷灰石; 标准玻璃为美国国家标准局 SRM612 铀标准玻璃,  $Z_{\text{stdSRM612}} = 352.4 \pm 29$ ; 样品送中国原子能科学研究院 492 反应堆进行辐照; 径迹统计用 OLYMPUS 偏光显微镜, 在放大 1000 倍浸油条件下完成; 当  $P(X^2) > 5\%$  时, 裂变径迹年龄选用“池年龄”(Pooled Age); 当  $P(X^2) \leq 5\%$  时, 裂变径迹年龄选用中心径迹年龄 (Central Age)

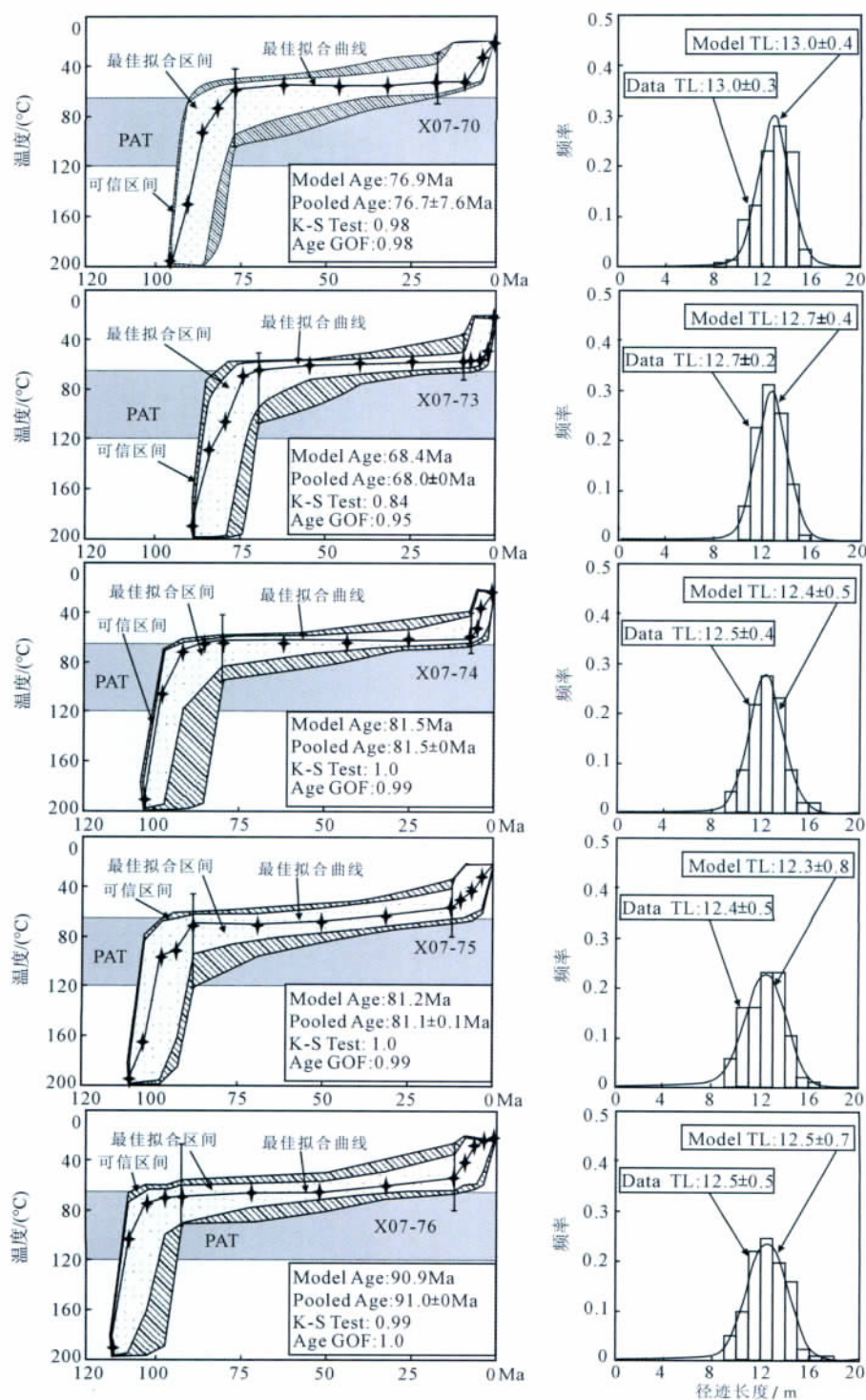


图5 相山主峰样品磷灰石裂变径迹温度-时间反演模拟结果图

Fig. 5 Temperature-Time modeling results of the fission track of apatite in volcanic rocks from the peak of Xiangshan mountain

式,基本上不受后期的热扰动影响;

(3) 采自相山东部云际的 X07-10, 南部语漳的 X07-11 及其北部巴泉的 X07-05 三个样品, 原岩为似斑状花岗岩和花岗斑岩, 裂变径迹表观年龄值介

于 47~55 Ma 之间, 其平均径迹长度介于 11.5~12.3 之间, 表明样品中磷灰石的裂变径迹经历了后期较强的部分愈合, 长度配分曲线普遍呈现双峰式, 推测样品可能经受了多期次复杂的热作用;



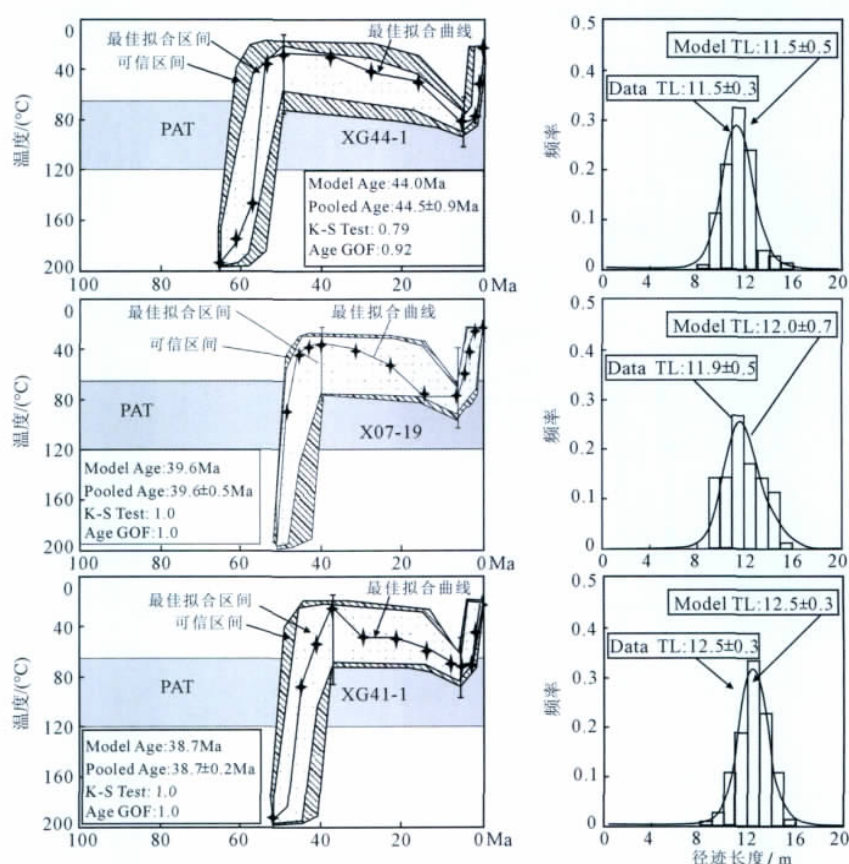


图6 相山西部碎斑熔岩中磷灰石裂变径迹温度-时间反演模拟结果图

Fig. 6 Temperature-Time modeling results of the fission track of apatite in volcanic rocks from western parts of Xiangshan ore-field

(4)采自于相山西部(X07-19-4)和西北部的三个样品(石马山的XG44-1、横涧ZK19-4钻孔—200 m深处的XG41-1)皆为碎斑熔岩,磷灰石裂变径迹表观年龄介于38~44 Ma之间,平均径迹长度介于11.5~12.4之间,表明样品中磷灰石的裂变径迹经历了后期较强的部分愈合,长度配分曲线普遍呈现双峰式,也表明了受到了后期的热干扰;

(5)表观年龄分布特征显示,相山西部和西北部样品的径迹年龄小于南部、东部和北部的年龄,也远小于相山主峰的年龄,推测西部和西北部晚于南部和东部抬升剥露,更晚于相山主峰的隆升—剥露。

### 3.3 磷灰石的温度—时间反演模拟

近年来研究表明<sup>[18-20]</sup>,依据磷灰石裂变径迹单颗粒年龄、封闭径迹长度及配分,综合考虑磷灰石Cl、F的含量对抗退火能力的影响,选择一定的退火模式,进行热历史的反演模拟,可以揭露出样品表观年龄下定量的、更详尽的热演化信息,为区域构造热演化历史分析提供更多的依据<sup>[18-20]</sup>。根据实测的裂变径迹数据和径迹长度的参数,笔者利用

AFTSolve软件,开展了磷灰石的温度—时间反演模拟研究。磷灰石径迹愈合模式采用Ketcham等Multi-Kinetic模式,根据磷灰石的池年龄(Pooled age),选用Monte Carlo模拟方法进行模拟。在模拟过程中,根据区域地质资料分析,结合磷灰石裂变径迹封闭温度(大约120℃)和磷灰石裂变径迹愈合区间(120~60℃),笔者设定了一些约束条件,样品的模拟结果如图5、6、7所示。每个样品模拟时,模拟结果的长度拟合度(K-F Test)和年龄配分拟合度(Age GOF)一般都远大于0.5,模拟的径迹长度(Model TL)与实测的径迹长度(Data TL)配分曲线基本吻合,表明模拟结果是可靠和可信的。所有样品的最佳拟合曲线如图9所示。显然,与单纯的裂变径迹表观年龄相比,模拟结果更好地地方映出了样品的退火历程。

模拟结果显示,相山主峰样品在白垩纪中晚期(75~100 Ma期间),都经历了一期快速的抬升—冷却过程(图5);相山西部的样品,快速冷却通过裂变径迹愈合区间的时间集中在40~60 Ma之间(图6),

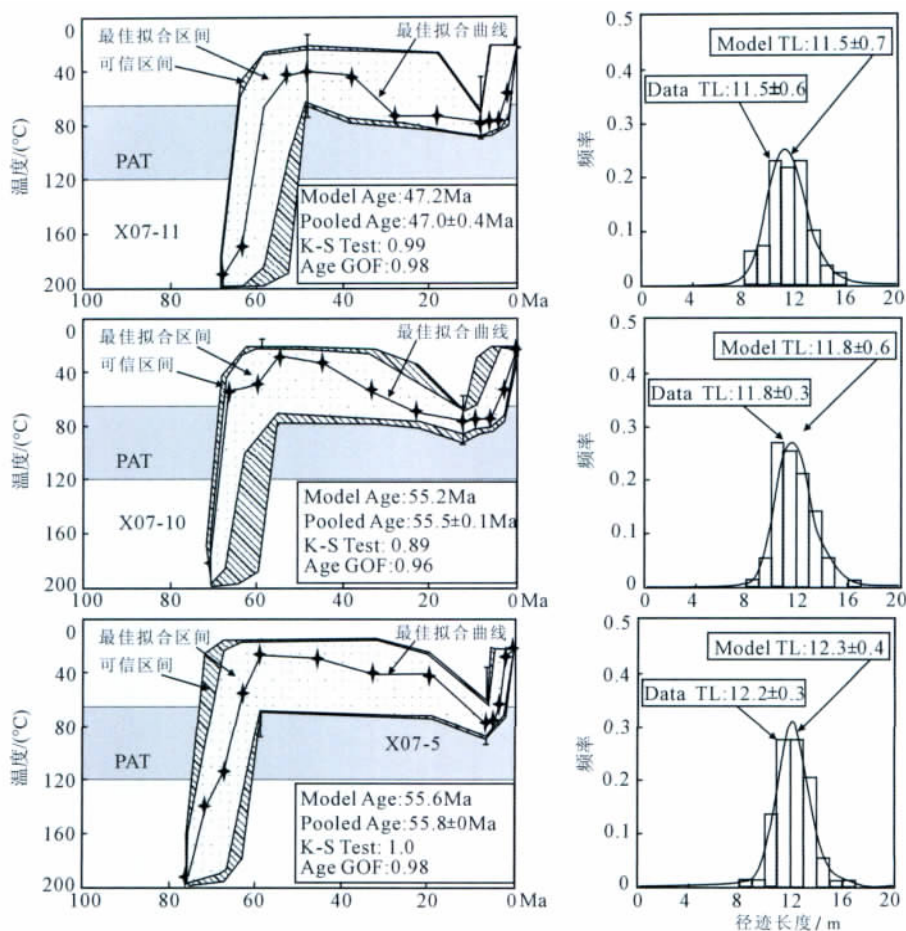


图7 相山东部、南部和北部似斑状花岗岩中磷灰石裂变径迹温度-时间反演模拟结果图  
Fig. 7 Temperature-Time modeling results of the fission track of apatite in volcanic rocks from southern, eastern and northern parts of Xiangshan ore-field

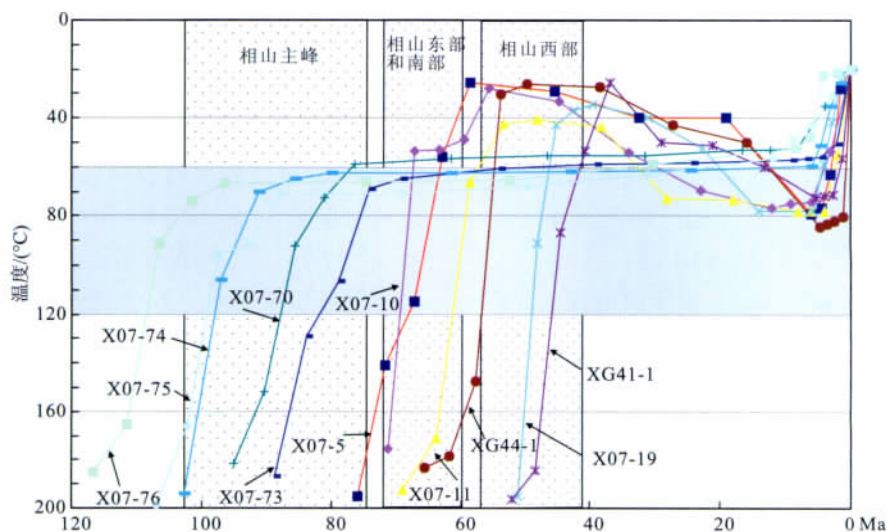


图8 相山铀矿田磷灰石裂变径迹温度-时间反演模拟最佳拟合曲线图  
Fig. 8 Best-fit lines of Temperature-Time modeling of apatite in volcanic rocks from Xiangshan ore-field

而相山东部、南部和东北部的样品,快速通过冷却带的时间集中在 60~75 Ma 之间(图 7)。

此外,除相山主峰样品外,相山周缘的样品都经受了后期的热改造(图 6、7、8),其时代集中在 5~

10 Ma之间,推测应为新生代相山地区断裂活动的热干扰;但是长度配分曲线和模拟结果都显示,后期的热干扰对总体的径迹长度影响不大,仅导致少部分裂变径迹发生愈合。

## 4 讨 论

区域地质历史分析表明<sup>[3,11,35]</sup>,相山早白垩世结束火山活动之后,火山地貌大致应该定型。因此,推断区域地貌轮廓形成于早白垩世以来,定型于新近纪,各个地质体之中赋存的矿床应经历类似的剥蚀过程。

邵飞等(2008)统计了相山铀矿田不同矿床的铀矿石的 U-Pb 同位素测年资料<sup>[42]</sup>,发现铀—赤铁矿型矿石同位素年龄主要介于 120~140 Ma 之间,铀—绿泥石型矿石同位素年龄集中于 105~125 Ma,铀—萤石型矿石的成矿年龄为 90~110 Ma。因此,相山铀矿床的成矿年龄普遍大于本文所测的磷灰石裂变径迹年龄,因此磷灰石裂变径迹年龄反映的是成矿期后的区域构造—热演化历史。

磷灰石裂变径迹测试结果显示相山铀矿田的南部和东部开始剥蚀的时间早于西部,但晚于相山主峰的剥蚀,温度时间模拟结果显示相山西部快速隆升发生于 40~60 Ma 之间,相山南部和东部的快速隆升发生于 60~75 Ma 之间,相山主峰的快速隆升发生于 75~100 Ma 之间。测试和模拟结果表明,相山主峰和相山东部及南部较西部经历了较长时间的剥蚀。这与张万良等(2009)根据区域构造演化推测的结果一致,认为相山铀矿田地表总体侵蚀严重,相山峰顶侵蚀深度最大,邹家山一带侵蚀深度较浅,从矿田西北部到东南部,地表侵蚀深度逐渐加大<sup>[2]</sup>。

如前所述,相山火山盆地主要由表壳的沉积岩、流纹岩、流纹英安岩等浅成喷出的火山岩和更晚期侵位的似斑状花岗岩和花岗斑岩等次火山岩组成<sup>[3,7]</sup>。相对而言,次火山岩的形成深度应大于火山岩,为火山口根部相的产物。根据现今的相山区域地质图展布可见(图 2),次火山岩在相山盆地的南部的浯漳、东部凤岗镇一带大面积出露;在盆地的北部湖田—沙洲—云际一带,也随处可见到似斑状花岗岩和花岗斑岩侵位于中元古界和侏罗纪的火山岩之中;然而在相山的西部,地表很少可见花岗斑岩或似斑状花岗岩出露,仅在北端的横涧矿区,可见小面积的花岗斑岩出露于横涧—岗上英次火山口之中,在

西部的中段邹家山往南西延伸,地表仅零星少量出露,大面积出露的是火山岩。如果相山火山盆地的原始火山喷发具有对称性特征,这一事实表明相山南部和东部较相山西部剥蚀程度较深,大面积的根部相花岗斑岩、次火山岩出露地表,上部的次火山被剥蚀殆尽。根据张万良等(2007)的研究,出露于相山东部河口排一带的花岗斑岩中的斑晶比相山西部的花岗斑岩中的斑晶要大,斑状结构更为明显,暗色矿物增多;其次,东南部碎斑熔岩的密度小于西北部,认为东南部岩石风化较强烈,进而推测了相山东南部比西北部经历了较长时间的抬升剥蚀<sup>[17]</sup>,与本次研究结果完全吻合。

目前,勘探工作已经在相山找到了 20 多个矿床或矿化点。已有的研究表明,相山铀矿田的北部铀矿主要为发育于次火山岩中,以碱性矿化蚀变为主,以云际和沙洲矿床为代表<sup>[3]</sup>;西部矿床主要发育于火山岩中,以酸性矿化蚀变为主,代表性的矿床有邹家山铀矿<sup>[10]</sup>;横涧—岗上英铀矿区则正好位于西部和北部铀矿带的交接部位,碱性矿化蚀变和酸性矿化蚀变都有发育<sup>[13]</sup>;其次,在时间上,矿化蚀变研究表明<sup>[6,15]</sup>,碱性蚀变早于酸性蚀变的发生,区域上分布上具有“东碱西酸”“下碱上酸”的特征。流体包裹测温表明<sup>[15,43]</sup>,相山铀矿床的成矿温度较低(表 4),大都位于 150 ℃~250 ℃之间,为中低温矿床。但是相山西部、西北部和北部矿床的成矿温度有差别,北部的沙洲矿区成矿深度大于横涧矿区,横涧矿区则大于邹家山矿区(表 4)。此外岩石薄片镜下鉴定统计表明,在沙洲矿区,含矿岩石中普遍可以见到磁铁矿等高温的副矿物;而在邹家山矿区,含矿岩石的副矿物中从很少见到磁铁矿,仅见到黄铁矿等,推测沙洲矿区的成矿深度大于邹家山矿区。因此,已有矿床展布特征和样品中副矿物观测分析结果都表明,目前地表已知的铀矿床,北部的成矿深度大于西部(表 4),

表 4 相山铀矿田包裹体测试<sup>[15,34]</sup>、成矿深度计算结果表  
Table 4 Temperature and depth of uranium mineralization in Xiangshan ore-field

|     | 均一温度<br>(℃) | 盐度<br>(%)   | 平均密度<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 平均成<br>矿压力<br>(×10 <sup>5</sup> Pa) | 平均成<br>矿深度<br>(km) |
|-----|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------|
| 沙洲  | 200~210     | 11.00~12.00 | 0.94                         | 283.8×10                            | 0.946              |
|     | 230~260     | 18.00~20.00 |                              |                                     |                    |
| 横涧  | 181~267     | 3.30~10.49  | 5.16                         | 217.5                               | 0.87               |
| 邹家山 | 145~165     | 8.4~9.5     | 0.98                         | 121.1                               | 0.73               |
|     | 210~240     | 12.9~18.8   |                              |                                     |                    |

反映出相山北部比西部侵蚀深度更深.

综上所述,相山铀矿田东部和南部剥蚀程度较深,大面积的火山口根部相似斑状花岗岩、次火山岩出露地表,浅部可能形成的低温铀矿体有可能被剥蚀殆尽;北部剥蚀程度中等,地表出露形成温度较高的次火山岩型以碱蚀变交代矿化为主的铀矿体,而浅部温度较低的火山岩型铀酸性蚀变为主的铀矿体保留不多;而西部则剥蚀程度较低,次火山岩可能仍在深部,在地表出露很少,火山岩型酸性蚀变为主的低温铀矿体保留完好.如果该结论成立,则意味着在相山西部具有较大的找矿空间,其深部应具有稍高温的、碱性蚀变矿化的矿体;相反,相山南部,由于较强的剥蚀,在中低温成矿区间成矿的铀矿体,可能已经被剥蚀殆尽,找矿前景不容乐观.

## 5 结 论

(1)DEM合成图像分析,结合次级火山机构出露高程及其剥蚀程度的统计表明,相山地区总体上属于低山、中等侵蚀的地貌区,发现已知的铀矿床、点与次火山机构关系密切,并均处于残余侵蚀面以下的侵蚀区范围内;进一步统计分析表明,西部的次火山机构剥蚀程度相对弱或中等,北部和西北部剥蚀程度中等或较强,而南部的次火山机构则剥蚀强.

(2)磷灰石裂变径迹测试结果显示相山铀矿田的南部和东部开始剥蚀的时间早于西部,但晚于相山主峰的剥蚀;温度时间模拟结果显示相山西部快速隆升开发发生于40~60 Ma之间,相山南部和东部的快速隆升发生于60~75 Ma之间,相山主峰的快速隆升发生于75~100 Ma之间.

(3)磷灰石裂变径迹反演模拟分析结果与现今的地质体出露特征、已知铀矿床的成矿温度具有一致性,都表明相山铀矿田东部和南部剥蚀程度较深,早期可能形成的中低温铀矿体被剥蚀殆尽;北部剥蚀程度中等,地表出露温度稍高的、碱蚀变为主的次火山岩铀矿体;西部则剥蚀程度较低,以酸性蚀变为主的低温铀矿体保留完好.

(4)相山西部的深部具有较大的找矿空间,而相山南部找矿前景不容乐观.

致 谢 十分感谢两名匿名审稿人对本文初稿提出的审稿意见,使本文作者受益颇多.

## 参考文献(References)

[1] 翟裕生,邓军,彭润民.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,2000,25(4):340-345.

Zhai Y S, Deng J, Peng Y M. Research contents and methods for post ore-changes, modifications and preservation. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2000, 25(4): 340-345.

[2] 张万良,刘德长,李子颖等.相山铀矿田侵蚀程度研究.铀矿地质,2009,25(4):210-213.

Zhang W L, Liu D C, Li Z Y, et al. Study on erosion depth in Xiangshan uranium ore field. *Uranium Geology* (in Chinese), 2009, 25(4): 210-213.

[3] 余达淦,吴仁贵,陈培荣.铀资源地质学.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2005:117-189.

Yu D G, Wu R G, Chen P R. Geology of uranium resource. Harbin: Publishing House of Harbin Engineering Institute, (in Chinese), 2005: 117-189.

[4] 陈肇博,谢佑新,万国良等.华东南中生代火山岩中的铀矿床.地质学报,1982,(3):235-243.

Chen Z B, Xie Y X, Wang G L, et al. Uranium Deposits in Mesozoic volcanics in south-east China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 1982, (3): 235-243.

[5] 陈肇博,谢佑新,王灿林等.1220破火山口铀矿田的构造特征及其成矿构造条件分析.放射性地质,1982,(1):1-10.

Chen Z B, Xie Y X, Wang C L, et al. Structural features and ore-forming conditions of the uranium ore-field in 1220 volcanic caldera. *Radioactive Geology* (in Chinese), 1982, (1): 1-10.

[6] 杜乐天.碱交代作用地球化学原理.中国科学B,1986,(1):81-90.

Du L T. Geochemical principle of alkaline metasomatism. *Sciences in China* (B), 1986, (7): 1-8.

[7] 夏林忻,夏祖春,张诚等.相山中生代含铀火山杂岩岩石地球化学.北京:地质出版社,1992:1-56.

Xia L X, Xia Z C, Zhang C, et al. Petrogeochemistry of Mesozoic Uraniferous Volcanic Complex from Xiangshan, China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992: 1-56.

[8] 沈锋,陈然志.华南相山铀矿田成矿条件及发展前景.铀矿地质,1995,11(5):257-265.

Shen F, Chen R Z. Metallogenetic conditions and prospects of the Xiangshan uranium orefield in south China. *Uranium Geology* (in Chinese), 1995, 11(5): 257-265.

[9] 陈贵华,陈名佐.相山铀矿田成矿条件分析.铀矿地质,1999,15(6):329-338.

Chen G H, Chen M Z. Analysis on metallogenic conditions of the Xiangshan uranium ore-field. *Uranium Geology* (in Chinese), 1999, 15(6): 329-338.

[10] 温志坚,杜乐天,刘正义.相山铀矿田热液水云母化及其与铀矿化关系研究.矿床地质,2000,19(3):257-273.

Wen Z J, Du L T, Liu Z Y. Relationship between hydromicatization and uranium mineralization in the Xiangshan orefield. *Mineral Deposit* (in Chinese), 2000, 19 (3): 257-263.



- [11] 邱爱金,郭令智,郑大瑜等.大陆构造作用对相山富大铀矿形成的制约.北京:地质出版社,2002:58-95.  
Qiu A J, Guo L Z, Zheng D Y, et al. Continental Tectonic Constraint on Formation of Xiangshan Large Scale Uranium Deposits with High Grade (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2002: 58-95.
- [12] 范洪海,凌洪飞,王德滋等.相山铀矿田成矿机理研究.铀矿地质, 2003, 19(4): 208-213.  
Fan H H, Ling H F, Wang D Z, et al. Study on metallogenetic mechanism of Xiangshan uranium ore-field. *Uranium Geology* (in Chinese), 2003, 19(4): 208-213.
- [13] 张鸿.横涧-岗上英矿床多期次热液活动与铀成矿关系的探讨.世界核地质科学, 2008, 25(2): 68-72.  
Zhang H. Discussion on relationship between uranium metallogenesis and multiperiodic hydrothermal activities in Hengjian-Gangshangying Deposit. *World Nuclear Geoscience* (in Chinese), 2008, 25(2): 68-72.
- [14] 邵飞,陈晓明,徐恒力等.江西省相山铀矿田成矿模式探讨.地质力学学报, 2008, 14(1): 65-73.  
Shao F, Chen X M, Xu H L, et al. Metallogenic model of the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2008, 14(1): 65-73.
- [15] 黄锡强,陈正乐,王平安等.江西相山铀矿田沙洲矿床流体包裹体研究.地质力学学报, 2008, 14(4): 176-185.  
Huang X Q, Chen Z L, Wang P A, et al. Fluid inclusion study of the Shazhou uranium ore-field in the Xiangshan deposit, Jiangxi. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2008, 14(4): 176-185.
- [16] 张万良,张杰林,刘德长等.相山铀矿田地貌形体 DEM 模型应用分析.地球信息科学, 2007, 9(4): 34-39.  
Zhang W L, Zhang J L, Liu D C, et al. Topographic analysis of Xiangshan uranium field on DEM. *Geo-Information Science* (in Chinese), 2007, 9(4): 34-39.
- [17] 张万良,刘德长,李子颖等.江西相山矿田西北部与东南部矿床侵蚀程度的对比分析.大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 348-352.  
Zhang W L, Liu D C, Li Z Y, et al. Comparative analysis of the erosion degree of deposits in the northwest and southeast parts of Xiangshan uranium orefield in Jiangxi. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 2007, 31(3): 348-352.
- [18] 陈文寄,计凤桔,王非.年轻地质体系的年代测定(续)——新方法、新进展.北京:地震出版社,1999:77-100.  
Chen W J, Ji F J, Wang F. Dating of Young Geological Bodies (continued)-New Methods and Progresses (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1999: 77-100.
- [19] 付明希.磷灰石裂变径迹退火动力学模型研究进展综述.地球物理学进展, 2003, 18(4): 650-655.  
Fu M X. Review on the model of the apatite fission track annealing kinetics. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2003, 18(4): 650-655.
- [20] 张志诚,王雪松.裂变径迹定年资料应用中的问题及其地质意义.北京大学学报(自然科学版), 2004, 40(6): 898-905.  
Zhang Z C, Wang X S. Fission track analysis and its application to geological problems. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2004, 40(6): 898-905.
- [21] 田云涛,袁玉松,胡圣标.磷灰石裂变径迹分析新进展.地球物理学进展, 2009, 24(3): 909-920.  
Tian Y T, Yuan Y S, Hu S B. New progresses in apatite fission track analysis. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2009, 24(3): 909-920.
- [22] 王先美,钟大赉,王毅.利用磷灰石裂变径迹约束脆性断裂活动的时限.地球物理学进展, 2008, 23(5): 1444-1455.  
Wang X M, Zhong D L, Wang Y. A case of application using apatite fission track to restrict the time of brittle fault movement. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(5): 1444-1455.
- [23] 蒋荣宝,陈宣华,党玉琪等.柴达木盆地东部中生代两期逆冲断层作用的 FT 定年.地球物理学报, 2008, 51(1): 116-124.  
Jiang R B, Chen X H, Dang Y Q, et al. Apatite fission track evidence for two phases Mesozoic-Cenozoic thrust faulting in eastern Qaidam basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(1): 116-124.
- [24] 钟大赉,丁林.青藏高原隆起过程及其机制探讨.中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 289-295.  
Zhong D L, Ding L. The process and mechanism of the rise of the Qinghai Tibet Plateau. *Sciences in China (Earth Sciences)* (in Chinese), 1996, 26(4): 289-295.
- [25] 雷永良,龚道好,王先美等.应用裂变径迹不同模式约束岩体冷却史的初步探讨——以滇西独龙江岩体为例.地球物理学进展, 2008, 23(2): 422-432.  
Lei Y L, Gong D H, Wang X M, et al. Discussion about using different modes of apatite fission track thermochronology to constrain cooling histories of rocks: an example from the batholith in Dulong River region, west Yunnan. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, 23(2): 422-432.
- [26] 王丽宁,季建清,孙东霞等.西南天山隆起时代的河床砂岩屑磷灰石裂变径迹证据.地球物理学报, 2010, 53(4): 931-945.  
Wang L N, Ji J Q, Sun D X, et al. The uplift history of south-western Tianshan-Implications from APT analysis of detrital samples. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(4): 931-945.
- [27] 陈正乐,李丽,刘健等.2008.西天山隆升—剥露过程研究.岩石学报, 2008, 24(4): 625-636.  
Chen Z L, Li L, Liu J, et al. Uplifting-exhumation process of the western Tianshan range, Northwestern China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2008, 24(4): 625-636.
- [28] 田云涛,朱传庆,徐明等.白垩纪以来米仓山—汉南穹窿剥蚀过程及其构造意义:磷灰石裂变径迹的证据.地球物理学报, 2010, 53(4): 920-930.  
Tian Y T, Zhu C Q, Xu M, et al. Exhumation history of the Micangshan-Hannan Dome since Cretaceous and its tectonic significance: evidences from Apatite fission track analysis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(4): 920-930.

- [29] 谭锡斌,徐锡伟,李元希等. 贡嘎山快速隆升的磷灰石裂变径迹证据及其隆升机制讨论. 地球物理学报, 2010, 53(8): 1859-1867.  
Tan X B, Xu X W, Lee Y H, et al. Apatite fission track evidences for rapid uplift of the Gongga Mountain and discussion on its mechanics. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1859-1867.
- [30] 郑德文,张培震,万景林等. 六盘山盆地热历史的裂变径迹证据. 地球物理学报, 2005, 48(1): 157-164.  
Zheng D W, Zhang P Z, Wan J L, et al. Apatite fission track evidence for the thermal history of the Liupanshan basin. *J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 48(1): 157-164.
- [31] 刘建辉,张培震,郑德文等. 秦岭太白山新生代隆升冷却历史的磷灰石裂变径迹分析. 地球物理学报, 2010, 35(10): 2405-2414.  
Liu J H, Zhang P Z, Zheng D W, et al. The cooling history of Cenozoic exhumation and uplift of the Taibai Mountain. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 35(10): 2405-2414.
- [32] 庆建春,季建清,王金铎等. 五台山新生代隆升剥露的磷灰石裂变径迹研究. 地球物理学报, 2008, 51(2): 384-392.  
Qing J C, Ji J Q, Wang J D, et al. Apatite fission track study of Cenozoic exhumation and uplift of Wutai Mountain, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 384-392.
- [33] Spotila J A. Applications of low-temperature thermochronometry to quantification of recent exhumation in mountain belts. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2005, 58: 449-466.
- [34] Reiners P W, Brandon M T. Using thermochronology to understand orogenic erosion. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2006, 34: 419-466.
- [35] 邱爱金,郭令智,郑大瑜等. 江西相山地区中、新生代构造演化对富大铀矿形成的制约. 高校地质学报, 1999, 5(4): 418-425.  
Qiu A J, Guo L Z, Zheng D Y, et al. Constraints of Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution on formation of rich and large uranium deposits in Xiangshan, Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 1999, 5(4): 418-425.
- [36] 胡瑞忠,毕献武,苏文超等. 华南白垩-第三纪地壳拉张与铀成矿的关系. 地学前缘, 2004, 11(1): 153-161.  
Hu R Z, Bi X W, Su W C, et al. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in south China. *Earth Sciences Frontiers* (in Chinese), 2004, 11(1): 153-161.
- [37] 毛景文,谢桂青,李晓峰等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 2004, 11(1): 45-55.  
Mao J W, Xie G Q, Li X F, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in south China. *Earth Sciences Frontiers* (in Chinese), 2004, 11(1): 45-55.
- [38] 史维浚,周文斌,袁晓庆. 铀中和还原成矿作用的基本原理和找矿标志. 华东地质学院学报, 1992, 16(3): 257-263.  
Shi W J, Zhou W B, Yuan X Q. The basic principle and criteria for ore-prospecting of uranium neutralizing-reduction mineralization. *Journal of East China Geological Institute* (in Chinese), 1992, 16(3): 257-263.
- [39] Hurford A J, Green P F. The zeta age calibration of fission-track dating. *Isot. Geosci.* 1983, (1): 285-317.
- [40] Gleadow A J, Duddy I R. A natural long-term annealing experiment for apatite. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 1981, (5): 169-174.
- [41] Galbraith R F. On statistical models for fission track counts. *Mathematical Geology*, 1982, 13: 471-478.
- [42] 林祥铨. 赣杭构造带若个铀矿床同位素年龄研究及铀源初探. 铀矿地质, 1990, 6(5): 257-274.  
Liang X K. The study of U-Pb isotopic system and approach to the uranium source for several uranium deposits from Gan-Hang tectonic belt. *Uranium Geology* (in Chinese), 1990, 6(5): 257-274.
- [43] 王蕾,张树明,蒋振频等. 相山铀矿田沙洲矿床流体包裹体研究. 大地构造与成矿学, 2008, 32(4): 500-508.  
Wang L, Zhang S M, Jiang Z P, et al. The study of fluid inclusion of Shazhou deposit in Xiangshan uranium ore-field. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 2008, 32(4): 500-508.

(本文编辑 刘少华)