

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 长乐-南澳变形变质带地球化学特征

陶于祥

(南京农业大学资源环境系, 南京)

欧阳自远 谢鸿森

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳)

**内容提要** 同位素年代学研究表明, 长乐-南澳变形变质带存在元古宙的古陆块, 随后至少经历了加里东、印支、燕山、喜马拉雅等4期构造热事件。岩石化学特征显示: 加里东基底岩石为正变质岩; 印支、燕山期盖层岩石有正变质岩, 也有负变质岩。从加里东→印支、燕山期,  $\text{SiO}_2$  含量从低到高,  $\text{FeO} + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{TiO}_2$  含量由高到低呈现规律性变化。稀土地球化学研究表明: 加里东期基底岩石稀土总量较低, 轻重稀土轻度分异, Eu 正异常, 为轻稀土轻度富集, 重稀土平坦型; 印支、燕山期盖层岩石稀土元素总量较高, 轻重稀土强烈分异, Eu 负或无异常, 为轻稀土富集、重稀土强烈亏损型。从加里东→印支、燕山期, 稀土总量从低到高, 轻重稀土分异由弱到强, Eu 从正异常到负或无异常呈现规律性演化。

**关键词** 长乐-南澳变质岩 常量元素 稀土元素

长乐-南澳变形变质带纵贯闽、粤东南沿海滨岸地区。长500km, 宽40—60km。该带控制着福建、广东东南沿海火山岩浆活动、变质作用和地震活动, 蕴藏丰富的非金属矿产(如石英砂矿、叶蜡石矿等), 具重要的构造学及成矿学意义。由于本区变质岩时代问题一直悬而未决, 对其构造演化的认识一直混沌不清。本文着重探讨其地球化学特征及演化规律。

## 1 区域地质背景

长乐-南澳变形变质带分布于台湾海峡西岸的福建长乐、福清、莆田、惠安、晋江、金門、东海、东山和广东南澳等岛屿和滨海地区(图1), 有关本带的大地构造性质存在争论。郭令智等<sup>[1]</sup>认为该带为燕山期火山山弧带; 孙鼎等<sup>[2]</sup>认为本带为区域变质作用、混合岩化作用、深大断裂“三位一体”; 任纪舜等<sup>[3]</sup>指出: 该带为典型的地槽褶皱系, 属亚洲东部滨太平洋中生代褶皱系的一部分; 地洼学说认为该带为闽浙式地洼区(岩浆活动十分强烈, 形成很多花岗侵入体和大量火山喷发物)的典型例证, 现阶段的大地构造性质为地洼区<sup>[4-5]</sup>; 李根坤<sup>[6]</sup>认为长乐-南澳变形变质带实为一碰撞混杂岩带。

长乐-南澳变形变质带由一系列大致平行的断裂及三个变质相带组成。主要断裂有: 福清东张-诏安汀洋浦断裂、长乐-南澳断裂、平潭平原-东山澳角断裂、滨海断裂等<sup>[7]</sup>。变质相带从东到西分为: 高角闪岩相带(C带)、低角闪岩相带(M带)、绿片岩相带(I带)<sup>[8]</sup>。区域变质岩的主要类型有: 变质砂岩、千枚岩、片理化火山岩、片岩、变粒岩、浅粒岩、片麻岩、混合岩、混合花岗岩、石英岩等。沿长乐-南澳主断裂带还分布一套从碎裂岩-糜棱岩-超糜棱岩的动力变质岩系列。沿主干断裂存在着明显的韧性剪切作用标志: (1) 断裂带内存在规模巨大的糜棱岩带;

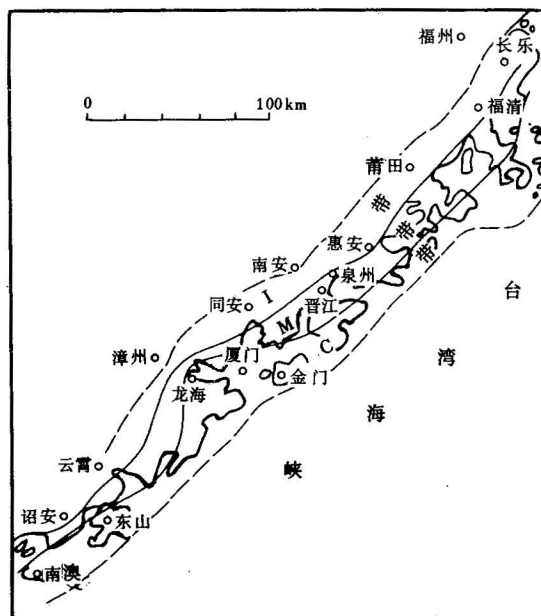


图 1 长乐-南澳变形变质带变质相分布图

(据谢舜克, 1989<sup>[8]</sup>)

Fig. 1 The metamorphic facies distribution map of Changle-Nanao deformation metamorphic belt

(from Xie Douke, 1989<sup>[8]</sup>)

C 高角闪岩相带; M 低角闪岩相带; I 绿片岩相带

C Upper hornblende facies belt; M low hornblende facies belt; I green schist facies belt

(2)断层岩中石英、长石、云母等矿物具明显的流动状构造和微褶皱,顺着糜棱页理发育着石香肠;(3)从深部到地表(从东到西)断裂作用性状和断裂岩石发生明显的递进变化。西部(浅部)以脆性剪切滑动为主;中部以脆-韧性剪切为主,断层岩为断层泥-碎裂岩-超碎裂岩;东部(深部)以韧性剪切为主,其断层岩为糜棱岩-花岗糜棱岩-眼球状糜棱岩系列<sup>[7]</sup>。

## 2 变质岩时代

60年代初及其以前,普遍认为这些变质岩是华夏古陆的一部分,变质岩的原岩时代属前震旦纪。刘征瑞<sup>①</sup>认为这些变质岩既有燕山期,也有更老时期的产物。任纪舜<sup>[3]</sup>认为是中生代产物。近年来,杨泰铭<sup>[9]</sup>、谢舜克<sup>[10]</sup>、俞文明等<sup>[11]</sup>,许景伟等<sup>[12]</sup>、黄辉等<sup>[13,14]</sup>从古生物、年代学多方面证实本区存在古生代变形变质岩。本区已取得近70个同位素年龄数据(择其要列表1)。将所测得的年龄作频率统计,以92.6—231Ma区间为最高,说明其主要为中生代变形变质带,但又经历了复杂的地质历史。部分岩石同位素年龄在1000Ma左右,说明本带存在元古宙的古陆块。随

后,它至少经历了4次构造热事件。第一次为加里东构造热事件。东山苏峰山石榴二云钾长片麻岩 Sm-Nd 等时线年龄为  $535.3 \pm 170.3\text{Ma}$ <sup>[10]</sup>;福清沙浦黑云角闪斜长变粒岩包体 Rb-Sr 等时线年龄为  $483 \pm 21\text{Ma}$ <sup>[14]</sup>;莆田忠门及晋江正变质岩 Sm-Nd 等时线年龄分别为  $463 \pm 15\text{Ma}$ ,  $509 \pm 20\text{Ma}$ <sup>[14]</sup>;莆田忠门片麻状混合岩 U-Pb 法测定年龄为  $593.3\text{Ma}$ <sup>[12]</sup>。此外,早古生代早期藻类化石,晚寒武世至早奥陶世维管束植物碎片的发现<sup>[11,13]</sup>,进一步说明本带具加里东构造热事件的发生。第二次为印支期构造热事件。东山冬古片岩全岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $202 \pm 12\text{Ma}$ <sup>[8]</sup>,福清沙浦黑云角闪斜长变粒岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $202 \pm 21\text{Ma}$ <sup>②</sup>;平潭北厝 Rb-Sr 全岩(磷灰石)等时线年龄为  $231 \pm 35\text{Ma}$ <sup>[9]</sup>。第三次为燕山期构造热事件。燕山早期:东山苏峰山 Rb-Sr 法年龄为  $186.7\text{Ma}$ <sup>[16]</sup>;晋江金井变质岩 Rb-Sr 法年龄为  $177.7\text{Ma}$ <sup>③</sup>;长乐花岗岩成岩年龄  $165 \pm 13\text{Ma}$ <sup>[8]</sup>。燕山晚期:金门-马祖-澎湖一带花岗片麻岩、花岗质岩石 Rb-Sr 等时线年龄

① 刘征瑞. 对福建沿海地区变质岩的一些看法. 福建地质科技情报. 1962(1).

② 杨泰铭. 地质报. 1985, 11. 29.

③ 福建区测队. 长乐-东山构造带地质特征及演化历史的研究. 1986.

大多为 90—120Ma<sup>[15]</sup>，该期为本带最主要的构造热事件。第四期为喜马拉雅期构造热事件，年龄为 36—85Ma<sup>[8]</sup>，形成 NE—NNE 向的强烈形变，导致沿海火山岩及其以前的地层遭受变质，海西期运动在本带没有反映<sup>[16]</sup>。

表 1 长乐-南澳变形变质带同位素年龄统计表

Table 1 Statistical table of isotopic ages from Changle-Nanao deformation metamorphic belt

| 方法    | 测定年龄个数 | 等时线年龄 (Ma)                                                                                                                                                                                                | 资料来源                         |
|-------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Sm-Nd | 5      | 463±15, 509±20, 535.3±170.3, 1186±160, 1361                                                                                                                                                               | [6][8][14]                   |
| Rb-Sr | 25     | 36, 62, 92.6±2.0, 94.2±3.0, 95.0±2.0, 95.5±4.0, 96.7, 97±2.0, 98.1±12.4, 99±8.0, 99.4, 105±9.0, 109.2±7.0, 110.6, 135.3±19.4, 141.9, 164.1, 165±13, 177.7±7.3, 186.7, 199, 202±12, 202±21, 231±35, 483±21 | ①② [2] [6] [8] [9] [15] [17] |
| K-Ar  | 5      | 56, 62.4, 66.6, 123.1, 161                                                                                                                                                                                | [6] [8] [16]                 |
| U-Pb  | 3      | 113.5, 142, 593.3                                                                                                                                                                                         | [12] [16]                    |

①福建省区测队. 1:20 万漳州幅区域地质调查报告(地质部分). 1979.

②福建省区测队. 长乐-东山构造带地质特征及演化历史的研究. 1986.

3 变形变质带地球化学特征及其反映的构造信息

3.1 早古生代岩石地球化学特征

**常量元素地球化学特征** 长乐-南澳变形变质带是否存在加里东基底?这是一个地学界长期争论的重大疑难问题。近年来,大量的同位素年龄(表 2)确认了加里东基底的存在。表 2 说明:本带北段(福清、莆田)-中段(晋江)-南段(东山)均有加里东期基底变质岩出露<sup>[17]</sup>。

表 2 长乐-南澳变形变质带加里东期岩石等时线年龄及 Nd, Sr 初始值

Table 2 Isochron age and Nd, Sr primitive value of Caledonian rock from Changle-Nanao deformation metamorphic belt

| 采样地点  | 岩石名称          | 方法    | ( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub> | ( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>i</sub> | 年龄 (Ma)   | 资料来源 |
|-------|---------------|-------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------|------|
| 福清沙浦  | 斜长角闪岩         | Sm-Nd |                                                    | 0.512484±0.00002                                     | 509±20.0  | [14] |
| 莆田东庄  | 斜长角闪岩         | Sm-Nd |                                                    | 0.512474±0.00007                                     | 463±15.0  |      |
| 晋江围头  | 斜长角闪岩         | Sm-Nd |                                                    | 0.51247±0.00007                                      | 463±15.0  |      |
| 东山苏峰山 | 石榴二云钾长片麻岩、变粒岩 | Sm-Nd |                                                    | 0.511883±0.000115                                    | 535±170.3 | [10] |
| 福清沙浦  | 黑云角闪斜长变粒岩包体   | Rb-Sr | 0.7003±0.0003                                      |                                                      | 483±21.0  | [9]  |
| 莆田忠门  | 片麻状混合岩        | U-Pb  |                                                    |                                                      | 593.3     | [12] |

从表 3 可以看出:加里东期变形变质岩 SiO<sub>2</sub> 含量跨度大(50.46%—75.74%)。主要岩性

有:斜长角闪岩、变粒岩、石榴二云钾长片麻岩。

表 3 长乐-南澳变形变质带加里东期岩石化学成分(%)

Table 3 Chemical compositions (%) of Caledonian rocks from Changle-Nanao deformation metamorphic belt

| 采样地点                 | 岩石名称          | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | MnO  | MgO  | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | H <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | DF    |
|----------------------|---------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------|
| 福清沙浦 <sup>[14]</sup> | 斜长角闪岩         | 50.46            | 1.06             | 18.12                          | 2.64                           | 7.00 | 0.17 | 3.90 | 9.37 | 3.00              | 1.44             | 1.16             | 0.21                          | 3.34  |
| 莆田东庄 <sup>[14]</sup> | 斜长角闪岩         | 54.19            | 1.03             | 16.93                          | 3.54                           | 5.78 | 0.13 | 4.44 | 6.97 | 3.18              | 1.94             | 0.75             | 0.28                          | 1.38  |
| 晋江围头 <sup>[14]</sup> | 斜长角闪岩         | 50.94            | 0.92             | 18.10                          | 2.97                           | 6.40 | 0.18 | 4.60 | 7.76 | 2.82              | 2.20             | 2.14             | 0.18                          | 1.92  |
| 东山冬古 <sup>[8]</sup>  | 石榴二云钾<br>长片麻岩 | 70.24            | 0.59             | 15.46                          | 1.14                           | 3.13 | 0.10 | 1.24 | 1.71 | 2.34              | 1.94             | 1.68             | 0.13                          | -1.30 |
| 东山冬古 <sup>[8]</sup>  | 变粒岩           | 75.74            | 0.11             | 13.27                          | 0.35                           | 1.23 | 0.09 | 1.21 | 0.16 | 3.02              | 2.87             | 0.82             | 0.02                          | 1.10  |

DF=10.44-0.2 SiO<sub>2</sub>-0.32 FeO\*-0.98 MgO+0.55 CaO+1.46 Na<sub>2</sub>O+0.54K<sub>2</sub>O,DF 值为正,是正变质岩;DF 值为负,是负变质岩

斜长角闪岩:花岗变晶、筛状变晶结构。片状、块状构造。主要矿物成分为角闪石(50%—75%)、斜长石(25%—40%)和黑云母(5%);副矿物有:锆石、榍石、磷灰石、磁铁矿、钛铁矿等,晶形较好。SiO<sub>2</sub> 含量 50%左右,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 平均 17.74%,TiO<sub>2</sub> 约 1.00%,FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 值为 1.63—2.65,K<sub>2</sub>O<Na<sub>2</sub>O,CaO>MgO,DF 值大于 0,为典型的正变质岩。

表 4 加里东期斜长角闪岩稀土元素丰度(×10<sup>-6</sup>)

Table 4 REE abundances(×10<sup>-6</sup>) of Caledonia plagioclase hornblendites

| 采样地点      | La    | Ce    | Pr   | Nd    | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu   | Y     | ΣREE   |
|-----------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
| 莆田莆<br>头山 | 17.40 | 44.29 | 5.96 | 26.41 | 5.35 | 1.76 | 5.29 | 0.88 | 4.79 | 1.00 | 2.66 | 0.42 | 2.46 | 0.43 | 24.88 | 119.09 |
| 莆田双<br>告山 | 13.98 | 34.19 | 4.80 | 19.55 | 4.14 | 1.49 | 3.82 | 0.65 | 4.18 | 0.82 | 2.31 | 0.35 | 2.11 | 0.34 | 20.79 | 92.73  |
| 福清沙浦      | 13.64 | 18.72 |      | 14.58 | 2.33 | 0.95 | 2.34 |      | 1.92 |      | 1.31 |      | 2.11 | 0.22 |       | 58.12  |
| 福清沙浦      | 14.50 | 19.54 |      | 14.58 | 2.33 | 0.95 | 2.17 |      | 3.35 |      | 1.31 |      | 1.76 | 0.20 |       | 59.68  |
| 福清沙浦      | 10.23 | 15.47 |      | 11.15 | 1.81 | 0.81 | 2.08 |      | 2.00 |      | 1.31 |      | 2.11 | 0.20 |       | 47.18  |
| 莆田东庄      | 17.91 | 19.54 |      | 12.86 | 2.07 | 1.04 | 2.00 |      | 1.92 |      | 1.05 |      | 1.84 | 0.20 |       | 60.42  |
| 莆田东庄      | 13.64 | 21.98 |      | 14.58 | 2.16 | 0.78 | 2.08 |      | 1.83 |      | 0.96 |      | 1.58 | 1.13 |       | 59.72  |
| 晋江围头      | 11.09 | 18.72 |      | 12.00 | 2.24 | 0.73 | 2.26 |      | 2.18 |      | 1.49 |      | 1.93 | 0.20 |       | 52.84  |

据黄 辉(1989)资料计算<sup>[14]</sup>。

石榴二云钾长片麻岩:片麻状构造,花岗变晶结构。主要矿物:斜长石、钾长石、二云母、石榴石、石英。黑云母为镁黑云母,石榴石为铁铝榴石,石榴石具环带结构,MgO 向外环增加,MnO 向外环降低<sup>[8]</sup>。全岩中 FeO>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Na<sub>2</sub>O>K<sub>2</sub>O,CaO>MgO,DF 值虽小于 0,但偏离 0

值不远,综合考虑,其应为正变质岩。

**变粒岩:** 碎斑状,斑状变晶结构,片状构造。主要矿物组合有:石榴石、白云母、黑云母、斜长石、钾长石、石英。钾长石呈斑晶,其边缘有蠕状石英。石英呈碎斑状,港湾构造,波状、条带状消光,构造重结晶,亚颗粒发育,流动状构造,微褶皱等塑性变形特征明显。石榴石为铁铝榴石,黑云母 FeO 为 24.46, K<sub>2</sub>O 为 8.18,具退变特征<sup>[8]</sup>。岩石中 FeO > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O > K<sub>2</sub>O, CaO < MgO, DF > 0, 故应为正变质岩。

**稀土元素地球化学特征** 加里东期斜长角闪岩稀土元素含量及部分参数见表 4。可以看出:  $\Sigma$ REE 含量较低  $47.18 \times 10^{-6}$ — $119.09 \times 10^{-6}$ , 平均  $66.22 \times 10^{-6}$ ; LREE/HREE (以下简称 L/H) 为 5.36—8.07, 平均 6.30, 轻重稀土轻度分异,  $\delta$ Eu 为 1.00—1.56, 平均 1.21, Eu 正异常; 轻斜率 (La/Sm)<sub>N</sub> 为 2.05—5.44, 重斜率 (Gd/Yb)<sub>N</sub> 为 0.80—1.75, 为轻稀土轻度富集, 重稀土平坦型。

**构造环境判别** 加里东期斜长角闪岩在 La/Yb- $\Sigma$ REE 双对数构造判别图(图 2)中落入大陆玄武岩或大陆拉斑玄武岩区。说明其可能为大陆拉斑玄武岩经后期变形变质而成,其构造环境为板内稳定区。

### 3.2 中生代岩石地球化学特征

**常量元素地球化学特征** 本区缺乏晚古生代(海西期)变形变质岩。三叠纪末,地壳下降,接受沉积(文宾山组:细砂岩、粉砂岩、泥岩夹安山岩和凝灰岩)。晚侏罗世、早白垩世区内大规模岩浆和火山活动,伴随区域变质作用,地壳活动加剧。本区岩石绝大部分同位素年龄值介于 90—200Ma 之间,说明印支—燕山期为本带最主要的变形变质期。部分同位素年龄数据见表 5。

长乐-南澳变形变质带印支—燕山期部分岩石化学成分及 DF 值见表 6。该期形成的岩石有:片岩、片麻岩、混合花岗岩、熔岩、次火山岩等。

**片岩:** 主要为夕线石(红柱石)云母片岩、白云母片岩、云母石英片岩等。片状构造、鳞片变晶结构。主要矿物:白云母(少量黑云母)、石英及长石。特征矿物:夕线石、石榴石、红柱石、叶蜡石、高岭石等,局部片岩含炭质。石英、长石、云母塑性变形特征明显。石英波状消光、变形纹(变形条带)、亚颗粒发育。长石、云母具流动状构造;长石微褶、石香肠、云母膝折发育;长石环带消光,花岗岩捕虏片岩中还发育长石双晶。在 (al-alk)/c 图解中它们落在粘土岩区;在 (al+fm)-(c+alk)/Si 图解里它们落在泥岩和砂岩区;在 K-A 图解中它们比较集中,落在泥质粉砂质岩区;在利克和威尔逊的 (al-alk)/c 图解中多数落在泥质沉积岩区;利用硅质模数 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 判定其为砂岩、粉砂岩和粘土岩变质而成<sup>[8]</sup>。结合其 DF 为负值,判断其可能为上三叠统文宾山组细砂岩、粉砂岩、泥岩经印支—燕山运动变质变形而成。

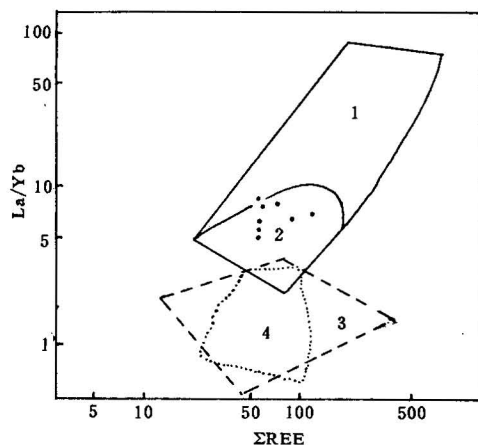


图 2 La/Yb- $\Sigma$ REE 构造判别图解

Fig. 2 La/Yb- $\Sigma$ REE double logistic diagram

1. 大陆玄武岩区; 2. 大陆拉斑玄武岩区; 3. 洋底和裂谷拉斑玄武岩区; 4. 岛弧和大陆造山带拉斑玄武岩区
1. Continent basalt; 2. continent tholeiite; 3. ocean bottom and rift valley tholeiite area; 4. Island arc and continent orogene tholeiite area

表 5 中生代部分岩石等时线年龄及<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 初始值Table 5 Isochron age and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr primitive value of Mesozoic partial rocks

| 采样地点  | 岩性          | 方法          | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr | 年龄(Ma)     | 资料来源 |
|-------|-------------|-------------|------------------------------------|------------|------|
| 东山冬古  | 片岩          | Rb-Sr 全岩    |                                    | 202±12.0   | [8]  |
| 晋江唐公山 | 混合片麻岩       | Rb-Sr 全岩    | 0.7038±0.0040                      | 97±2.0     | [8]  |
| 福清沙浦  | 黑云角闪斜长变粒岩包体 | Rb-Sr 全岩    | 0.7060±0.0010                      | 202±12.0   | [9]  |
| 平潭北厝  | 混合岩化变粒岩     | Rb-Sr 全岩    | 0.7065±0.0009                      | 202±12.0   | [9]  |
| 晋江    | 混合片麻岩       | Rb-Sr 全岩    | 0.7003±0.0006                      | 177.7±7.3  | [2]  |
| 晋江    | 细粒混合片麻岩     | Rb-Sr 全岩    | 0.7052±0.0002                      | 135.3±19.4 | [2]  |
| 金门马祖  | 花岗片麻岩       | Rb-Sr 全岩    | 0.7055±0.0003                      | 165±13.0   | [15] |
| 金门    | 花岗片麻岩       | Rb-Sr 全岩-矿物 | 0.7084±0.0001                      | 95±2.0     | [15] |
| 金门    | 黑云角闪片麻岩     | Rb-Sr 全岩-矿物 | 0.7060                             | 96.7       | [15] |
| 金门    | 花岗片麻岩       | Rb-Sr 全岩    | 0.7079±0.0005                      | 109.2±7.0  | [15] |
| 金门    | 花岗片麻岩       | Rb-Sr 全岩    | 0.7065±0.0007                      | 98.1±12.4  | [15] |
| 金门马祖  | 片麻状花岗岩      | Rb-Sr 全岩    | 0.70676±0.0008                     | 95.5±4.0   | [15] |

表 6 印支—燕山期岩石化学成分(%)及 DF 值

Table 6 Chemical compositions (%) and DF value of Indo-china—Yanshanian rocks

| 序号 | 岩石名称     | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO  | MnO   | MgO   | CaO  | Na <sub>2</sub> O | K    | DF    |
|----|----------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-------|-------|------|-------------------|------|-------|
| 1  | 二云夕线片岩   | 64.34            | 0.68             | 20.49                          | 1.40                           | 1.11 | 0.24  | 0.00  | 1.50 | 0.83              | 5.08 | -0.99 |
| 2  | 白云片岩     | 79.87            | 0.05             | 12.44                          | 0.84                           | 0.31 | 0.01  | 0.12  | 0.04 | 0.57              | 3.19 | -5.34 |
| 3  | 片岩       | 74.24            | 0.10             | 16.06                          | 1.25                           | 0.19 | 0.001 | 0.26  | 0.19 | 0.05              | 1.64 | -4.78 |
| 4  | 白云夕线片岩   | 72.25            | 0.40             | 15.50                          | 3.19                           | 0.13 | 0.05  | 0.84  | 0.08 | 0.29              | 4.34 | -3.70 |
| 5  | 二云夕线片岩   | 77.79            | 0.43             | 13.08                          | 1.23                           | 0.37 | 0.05  | 0.57  | 0.18 | 0.49              | 2.91 | -4.54 |
| 6  | 片岩       | 69.65            | 0.51             | 16.97                          | 1.00                           | 2.77 | 0.14  | 0.70  | 2.40 | 3.50              | 1.43 | 1.16  |
| 7  | 片岩       | 65.63            | 0.70             | 20.64                          | 3.30                           | 0.64 | 0.04  | 0.60  | 0.10 | 0.38              | 5.47 | -1.52 |
| 8  | 片岩       | 75.41            | 0.08             | 17.38                          | 3.51                           | 0.17 | 0.03  | 0.00  | 0.10 | 0.06              | 0.06 | -6.33 |
| 9  | 片岩       | 75.54            | 0.09             | 16.99                          | 2.81                           | 0.13 | 0.02  | 0.001 | 0.10 | 0.11              | 1.43 | -5.29 |
| 10 | 片岩       | 77.00            | 0.05             | 16.08                          | 2.66                           | 0.16 | 0.03  | 0.10  | 0.10 | 0.03              | 0.06 | -6.48 |
| 11 | 片岩       | 81.25            | 0.09             | 16.00                          | 1.13                           | 0.24 | 0.03  | 0.00  | 0.00 | 0.05              | 0.20 | -6.84 |
| 12 | 片岩       | 76.19            | 0.15             | 19.74                          | 2.15                           | 0.15 | 0.03  | 0.10  | 0.10 | 0.11              | 0.08 | -6.07 |
| 13 | 黑云二长片麻岩  | 72.84            | 0.25             | 13.87                          | 0.80                           | 1.27 | 0.06  | 0.66  | 1.90 | 3.64              | 3.98 | 2.37  |
| 14 | 浅色二长片麻岩  | 75.93            | 0.21             | 12.45                          | 0.46                           | 0.82 | 0.04  | 0.92  | 1.02 | 3.51              | 4.81 | 1.48  |
| 15 | 细粒片麻岩    | 71.17            | 0.18             | 14.45                          | 0.84                           | 1.48 | 0.04  | 0.71  | 2.45 | 4.23              | 3.26 | 3.37  |
| 16 | 变斑状二长花岗岩 | 72.53            | 0.37             | 14.31                          | 0.93                           | 1.16 | 0.04  | 0.56  | 2.15 | 3.81              | 3.63 |       |
| 17 | 晚侏罗世熔岩   | 70.18            | 0.39             | 14.18                          | 1.36                           | 1.99 | 0.07  | 0.88  | 1.93 | 3.09              | 4.23 |       |
| 18 | 早白垩世熔岩   | 71.27            | 0.39             | 13.54                          | 1.87                           | 1.32 | 0.06  | 0.75  | 1.46 | 3.22              | 4.51 |       |
| 19 | 晚侏罗世次火山岩 | 70.12            | 0.36             | 14.22                          | 1.31                           | 1.91 | 0.06  | 0.83  | 1.87 | 3.36              | 4.42 |       |

注:1—7 采自东山苏峰山,1—5 据谢奕克(1989)<sup>[8]</sup>,6—7 据陶于祥(1994)<sup>①</sup>;8—12 采自福清绵亭岭,据陶于祥(1994)<sup>①</sup>;13—16 采自晋江,据孙 鼎(1984)<sup>[2]</sup>;17—19 为闽东火山岩,据黄家厅(1985)<sup>[18]</sup>。

① 陶于祥. 长乐—南澳变形变质带地质地球化学研究. 中国科学院地球化学研究所博士学位论文. 1994.

表 7 印支—燕山期片岩稀土元素成分( $\times 10^{-6}$ )Table 7 REE abundances( $\times 10^{-6}$ ) of Indo-china—Yanshanian schist

| 采样地点 | La    | Ce     | Pr    | Nd    | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu   | Y     | $\Sigma$ REE |
|------|-------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------------|
| 绵亭岭  | 51.73 | 93.25  | 9.15  | 33.83 | 5.95 | 0.88 | 4.14 | 0.48 | 2.89 | 0.54 | 1.54 | 0.18 | 1.50 | 0.17 | 12.95 | 206.31       |
| 绵亭岭  | 45.45 | 90.17  | 8.62  | 33.59 | 5.54 | 0.93 | 4.20 | 0.48 | 3.04 | 0.63 | 1.53 | 0.23 | 1.12 | 0.13 | 14.84 | 196.20       |
| 绵亭岭  | 47.74 | 92.6   | 10.04 | 34.87 | 5.51 | 0.93 | 4.28 | 0.51 | 3.02 | 0.57 | 1.57 | 0.24 | 1.48 | 0.19 | 16.40 | 203.57       |
| 绵亭岭  | 70.07 | 103.81 | 9.91  | 34.71 | 6.57 | 1.04 | 5.38 | 0.70 | 3.84 | 0.66 | 1.91 | 0.24 | 1.19 | 0.14 | 15.00 | 240.17       |
| 绵亭岭  | 35.29 | 63.53  | 6.78  | 22.71 | 3.62 | 0.78 | 2.63 | 0.37 | 1.94 | 0.32 | 0.88 | 0.10 | 0.61 | 0.04 | 11.31 | 139.60       |
| 东山冬古 | 15.3  | 28     |       | 21    | 3.2  | 0.38 | 3.1  |      | 3.7  |      | 2.4  |      | 2.6  |      | 2.3   |              |

分析单位: 中国科学院贵阳地球化学研究所; 东山冬古据谢奕克<sup>[8]</sup>。

片麻岩: 主要分布于晋江、金門、马祖地区。花岗变晶结构, 片麻状构造。主要矿物: 长石、石英、黑云母。特征矿物: 磁铁矿。长石、石英从弱变形到强变形不等, 长石双晶发育。在尼格里四面体图解中投影, 大部分落入火成岩区; 在(al-alk)/C 图解中投影点在总体上表现出平行于长石线的变化趋势; 结合其 DF 值为正的特征判定其应为正变质岩。与闽东火山岩、混合花岗岩相比, 其岩石化学成分相近。

**稀土元素地球化学特征** 东山冬古片岩 Rb-Sr 等时线全岩年龄为  $202 \pm 12$  Ma; 福清绵亭岭变质岩为中生代凝灰岩变质而成<sup>[8]</sup>; 晋江地区混合片麻岩(花岗岩)的同位素年龄为 100—177.7 Ma, 它们均系中生代产物。

印支—燕山期片岩稀土元素含量及部分参数见表 7。可以看出,  $\Sigma$ REE 含量较高  $139.60 \times 10^{-6} - 240.17 \times 10^{-6}$ ; L/H 为 16.08—19.25, 轻重稀土强烈分异,  $\delta$ Eu 为 0.44—0.77, Eu 负异常。总斜率  $(La/Yb)_N$  高达 23.25—39.00, 稀土分布模式曲线为向右陡倾型(图 3)。

晋江地区片麻岩、花岗岩、变英云闪长岩稀土元素总量较稳定,  $\Sigma$ REE 为  $93.42 \times 10^{-6} - 131.65 \times 10^{-6}$ , L/H 为 21.08—39.66, 轻重稀土强烈分异, Eu 不亏损(无异常), 稀土分布模式曲线向右陡倾<sup>[8]</sup>。

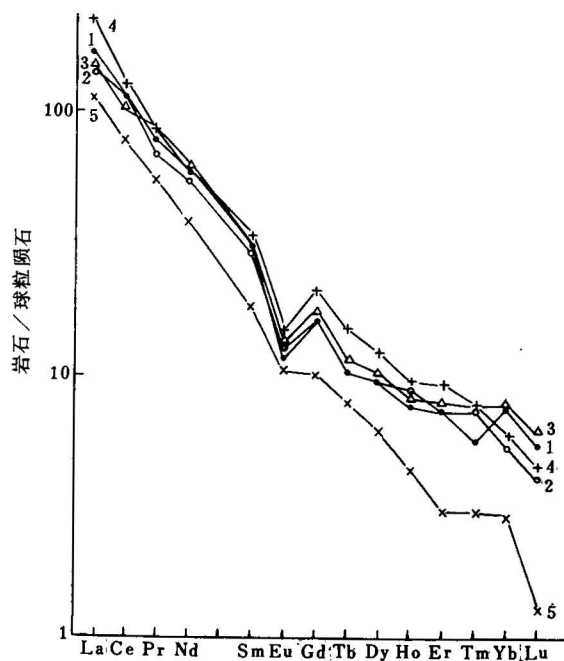


图 3 福清绵亭岭片岩稀土元素分布模式

Fig. 3 The REE distribution patterns of Fuqin Miantingling schist

## 4 结论

(1) 长乐-南澳变形变质带存在元古宙的古陆块, 随后至少经历了加里东、印支、燕山、喜马拉雅等 4 期构造热事件。

(2) 加里东基底主要由斜长角闪岩、石榴二云钾长片麻岩、变粒岩等组成。岩石化学特征显示其为正变质岩; 稀土元素分析可知: 稀土总量较低,  $\Sigma\text{REE}$  为  $47.18 \times 10^{-6}$ — $119.09 \times 10^{-6}$ ; 轻重稀土轻度分异, Eu 正异常, 为轻稀土轻度富集, 重稀土平坦型。其构造环境为板内稳定区。

(3) 印支-燕山期盖层主要由片岩、混合岩化片麻岩、花岗岩、火山岩等组成。岩石化学判别片岩为负变质岩, 可能为上三叠统文宾山组细砂岩、粉砂岩、泥岩变形变质而成; 片麻岩与闽东火山岩、花岗岩(混合岩化) 岩石化学成分相近, 片麻岩为正变质岩。稀土元素总量较高,  $\Sigma\text{REE}$  为  $93.42 \times 10^{-6}$ — $240.17 \times 10^{-6}$ ; 轻重稀土强烈分异, Eu 为负一无异常, 为轻稀土富集, 重稀土强烈亏损型。

(4) 从加里东(460—600Ma)→印支燕山期(60—200Ma), 岩石地球化学特征呈现规律性演化。 $\text{SiO}_2$  含量增加,  $\text{FeO}^*$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$  含量下降; 稀土元素总量由低→高, 轻重稀土分异由弱→强, Eu 从正→负, 无异常, 呈现规律性变化。

## 参 考 文 献

- 1 郭令智, 施央申, 马瑞士. 华南大地构造格架及地壳演化. 国际交流地质学术论文集(1). 北京: 地质出版社, 1980. 109—115 页.
- 2 孙 鼎. 中国东南沿海中生代火山岩混合岩化、花岗岩化作用的研究(以福建省晋江、东山地区为例). 花岗岩地质和成矿关系. 见: 徐克勤、涂光炽主编. 国际花岗岩学术讨论会论文集. 南京: 江苏科技出版社, 1984. 202—214 页.
- 3 任纪舜, 陈廷愚, 刘志刚, 牛宝贵, 刘凤仁. 华南大地构造的几个问题. 科学通报, 1986, (1): 49—51.
- 4 陈国达. 陈国达地洼学说文选. 长沙: 中南工业大学出版社, 1986. 1—30 页.
- 5 黄瑞华. 中国东部锡的构造地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 7 页.
- 6 李根坤. 福建基底构造格局及其特征. 福建地质, 1991, 10(2): 158—164.
- 7 肖诗兴. 闽—粤东南沿海大陆边缘韧性剪切带的基本特征. 现代地质, 1988, 2(1): 67—80.
- 8 谢舜克, 郭坤一. 中国东南岩石圈板块边界变质带. 北京: 地质出版社, 1989. 48—147 页.
- 9 杨泰铭, 黄文荣, 柳昌华, 徐安姑. 福建东南沿海存在古老基底的新证据. 大地构造与成矿学, 1985, 9(4): 372.
- 10 谢舜克. 福建长乐-南澳变质带的 O、Nd 同位素特征. 南京地质矿产研究所所刊, 1986, 7(4): 64—75.
- 11 俞文明, 张秀兰, 施满堂. 福建东山县澳角-冬古一带变质岩系中发现微体化石. 福建地质, 1988, 7(4): 290.
- 12 许景伟. 湄洲湾变质岩系中获得下古生界年龄资料. 福建地质, 1988, 7(4): 290.
- 13 黄 辉, 杨传夏, 李荣安. 东山变质岩中采到早古生代植物化石. 福建地质, 1988, 7(4): 290.
- 14 黄 辉, 李荣安, 杨传夏. 平潭-南澳变质岩带的 Sm-Nd 年代学研究及其大地构造意义. 福建地质, 1989, 8(3): 169—180.
- 15 Bor-Ming, Jahn, et al. Rb-Sr age of granite rock in southeastern China and their tectonic significance. Bull. Geol. Soc. Amer. 1976, 87: 763—776.
- 16 高 俊, 张建新, 王 荃. 福建长乐-东山构造带的变形特征及动力学研究. 地质论评, 1993, 39(1): 57—63.
- 17 朱杰辰, 郑懋公, 王扬德. 福建沿海地区岩浆岩的同位素地质年代学研究. 中国区域地质, 1988, (2): 150—157.
- 18 黄家厅, 苏世川, 洪尧萍. 中国东南沿海中生代火山岩地质及火山作用. 福建地质, 1985, 4(4): 18—48.

## GEOCHEMISTRY OF THE CHANGLE-NANAO DEFORMATION METAMORPHIC BELT

Tao Yuxiang

(*Nanjing Agriculture University, Resources and Environment Science Department, Nanjing, Jiangsu*)

Ouyang Zhiyuan and Xie Hongshen

(*Institute of Geochemistry, Academia Sinica, Guiyang, Guizhou*)

### Abstract

The study of isotope chronology shows that there possibly existed a Proterozoic continental block in the Changle-Nanao deformation metamorphic belt and that after the Proterozoic the Changle-Nanao deformation-metamorphism belt at least underwent 4 tectono-thermal events (Caledonian, Indosinian, Yanshanian and Himalayan). Petrochemical study shows: Caledonian basement rocks are positive metamorphic rocks; there are not only positive but also negative metamorphic rocks in the Indosinian-Yanshanian covers; there is a regular variation in the petrochemical composition from the Caledonian to Indosinian-Yanshanian metamorphic rocks, i. e. an increase of the  $\text{SiO}_2$  content and a decrease of  $\text{FeO}^* + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{TiO}_2$ . REE study indicates that the Caledonian basement rocks are characterized by a low  $\Sigma\text{REE}$ , a low ratio of LREE/HREE and positive Eu anomaly, showing a LREE-enriched and HREE-smooth pattern; whereas the Indosinian-Yanshanian covers have a high  $\Sigma\text{REE}$ , a high ratio of LREE/HREE and negative or no Eu anomaly, exhibiting a LREE-enriched and HREE-depleted pattern. There is a regular variation in the REE composition from Caledonian to Indosinian-Yanshanian metamorphic rocks, i. e. increases in  $\Sigma\text{REE}$  and LREE/HREE and a conversion from positive to negative or no Eu anomaly.

**Key words:** Changle-Nanao metamorphic rock, major element, REE.

### 作者简介

陶于祥, 1966年2月生, 四川忠县人。1986年毕业于华东地质学院地质系, 1989年获中国科学院长沙大地构造研究所构造地质专业硕士学位, 1994年获中国科学院地球化学研究所地球化学专业博士学位, 现为南京农业大学资源环境系博士后流动站博士后研究人员。通讯处: 南京农业大学资源环境系, 邮政编码: 210095。