

声发射及 Kaiser 效应揭示广东河源地区历史应力特征*

吕娟霞¹, 罗强², 李朋³, 刘洁^{1,4,5}

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082
2. 广东省地质局湛江地质调查中心, 广东 湛江 524000
3. 广东省地球物理勘查院, 广东 广州 510800
4. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 珠海 519082
5. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 河源地区位于华南地块东缘, 区内出露大面积花岗岩。为了解河源地区花岗岩所经历的应力历史, 开展了不同加载方式的单轴压缩试验, 根据声发射信息的 Kaiser 效应, 分析河源地区花岗岩的应力特征。声发射结果显示, 单轴压缩过程声发射大致分为平静期、快速增长期、突增期。分级加载过程声发射累积振铃呈现对应的台阶状升高, 等幅循环加载过程有典型的 Kaiser 效应。利用 G-P 算法计算声发射振铃计数关联分形维数, 将与近似 Kaiser 效应点邻近的振铃计数关联分形维数最小点, 确定为最终 Kaiser 效应点, 并利用循环加载数据的 Felicity 比值衡量 Kaiser 效应的有效程度; 由此确定河源地区花岗岩最大历史应力为 79.1 MPa。据此推测该花岗岩形成时的深度约为 3.9~6.6 km, 新生代以来河源地区的断块运动使得地表抬升约 3.5~6.2 km。研究结果可为探讨华南地区构造演化提供全新佐证。

关键词: 声发射; Kaiser 效应; 花岗岩; 历史应力; 河源

中图分类号: P584 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)02-0046-10

Historical stress characterization in Heyuan, Guangdong unveiled by acoustic emission and Kaiser effect

LÜ Juanxia¹, LUO Qiang², LI Peng³, LIU Jie^{1,4,5}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Zhanjiang Geological Survey Center, Guangdong Geological Bureau, Zhanjiang 524000, China
3. Guangdong Geophysical Prospecting Institute, Guangzhou 510800, China
4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources Exploration, Zhuhai 519082, China
5. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: The Heyuan area is located on the eastern margin of the South China Block, where large granite outcrops are prominently exposed. To investigate the stress history of the granite in this region, a series of uniaxial compression tests were conducted. The stress characteristics of the granite were analyzed based on the Kaiser effect observed in acoustic emission (AE) signals. The AE results indicate that: 1) during monotonic uniaxial compression, the AE activity can be divided into three distinct phases: a low-activity phase, a rapid growth phase, and a burst phase; 2) in the case of incremental cyclic loading, the cumulative AE ringing counts exhibit a stepped increase; and 3) the

* 收稿日期: 2025-06-09

录用日期: 2025-10-09

网络首发日期: 2026-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(42072251)

作者简介: 吕娟霞(1999年生), 女; 研究方向: 岩石力学实验; E-mail: lvjx27@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 刘洁(1967年生), 女; 研究方向: 多尺度计算地球动力学; E-mail: liujie86@mail.sysu.edu.cn

全文阅读



ZR20250100

constant-amplitude cyclic loading demonstrates a typical Kaiser effect. The G-P algorithm was employed to calculate the correlation dimension of AE ringing counts, characterizing the fractal scaling of damage evolution. The point with the minimum correlation dimension, located near the approximate Kaiser point, was identified as the critical stress point satisfying the Kaiser effect. Furthermore, the Felicity ratio derived from cyclic loading data was used to validate the Kaiser effect. Based on this analysis, the maximum historical differential stress of the granite in Heyuan was determined to be 79.1 MPa. It is inferred that the granite formed at a depth of approximately 3.9 to 6.6 km, and that block uplifts since the Cenozoic era have caused a surface rise by about 3.5 to 6.2 km in the Heyuan area. The result provides new evidence for the study of tectonic evolution in south China.

Key words: acoustic emission; Kaiser effect; granite; historical stress; Heyuan

河源地区位于华南褶皱带的东部边缘。河源地区发育包含元古代到早古生代的基底,其中加里东运动导致基底变形和变质,随后晚古生代-早中生代盖层沉积;印支和燕山运动使基底连同盖层一起褶皱,并形成了多组断裂构造体系。这3次构造运动均伴有岩浆活动,且以花岗岩侵入为特征(Wan, 2012; Wang et al., 2014)。燕山运动后期,华夏地块东南缘进入拉伸阶段,导致包括河源断裂带在内的北北东、北东东向断裂带及相关盆地形成。河源地区广泛分布的褶皱、断裂形成了独特的地质环境(王霄飞等, 2014)。

河源地区蕴含丰富的矿产资源,如稀有金属、非金属矿产和建材资源,且富含地热资源,有较大的开发潜力(姜磊, 2018)。研究岩石的应力历史和力学行为,不仅有助于揭示区域的地质演化历史,还可为资源开发和地质灾害防治提供重要的科学依据(Tannock等, 2019)。但目前,有关该地区岩浆岩所经历的应力历史尚未见报道。鉴于此,本研究通过声发射 Kaiser 效应开展相应研究。

声发射是由固体材料和岩石的快速破裂、摩擦发出的一种弹性波(Zhuang et al., 2021; Anikiev et al., 2023)。在循环加卸载作用下,声发射信号会表现出规律性特征。只要应力保持在先前应力的最大值以下,声发射活动则表现为很少或无;而当应力达到先前最大应力时,声发射活动则会剧烈增加;上述现象被称为 Kaiser 效应。Kaiser 效应提供了一种直观且有效的方法来评估岩石的应力记忆特性(Bai et al., 2018; Zhou et al., 2021),从而推断岩石在其地质历史中所承受的最大应力水平(Meng et al., 2016),目前已经成为一种被广泛接受的岩石特征应力估算测量技术(Sun et al., 2023; Zhao et al., 2024),所测量的岩石特征应力可能是当前岩石所受的原地应力,也可能代表历史应力。已有大量研究通过声发射 Kaiser 效应研究岩石特征应力(Li,

2017; Qin et al., 2018; Fu et al., 2021; Kharghani et al., 2021),包括提供储层应力信息(卢运虎等, 2011; 孔政等, 2023; Li et al., 2021; Zhu et al., 2021),以及为第四纪冰川沉积物的成因鉴定提供证据(Zhao et al., 2006)。

Kaiser 效应点的准确确定方法目前尚无定论,不同方案可以给出不同的特征应力值。理论上,根据岩石破坏过程中声发射某个参数或累计参数随应力或时间的急剧变化程度,可以判断 Kaiser 效应点,声发射参数突变时对应的应力值即为原岩应力值(Villaescusa et al., 2002; Dinmohammadpour et al., 2022)。但在一些情况下,声发射参数随时间或应力变化的拐点通常并不明显,导致 Kaiser 效应点的判断存在一定的偶然性和不精确性。赵奎等(2012)提出了一种声发射测量地应力的综合分析方法,其结果表明所得地应力值精度明显提高。

目前尚未见有关河源地区乃至整个华南地区花岗岩历史应力特征的研究,本研究首次针对该问题展开探讨,基于常规判断方法与综合分析相结合的技术路线精确识别 Kaiser 效应点,通过循环加载实验的 Felicity 参数验证其可靠性,进而探讨河源地区花岗岩 Kaiser 效应所记录的历史应力及其反映的区域构造抬升量。

1 实验方案

1.1 样品及实验计划

本研究的岩样采自广东省河源市东源县黄村地热井 365.40 m 深度下一段长度为 50 cm 的花岗岩岩心。对岩心标本进行了 X 射线衍射(XRD)测试,结果表明,岩石主要成分为微斜长石(33.7%)、钠长石(31.7%)、斜绿泥石(9.9%)、石英(9.6%),并含有极少量的高岭石(图1)。

将样品加工成直径为 25 mm、高度为 50 mm 的圆柱体,共 25 个样品。实验均为单轴压缩,共分为 5

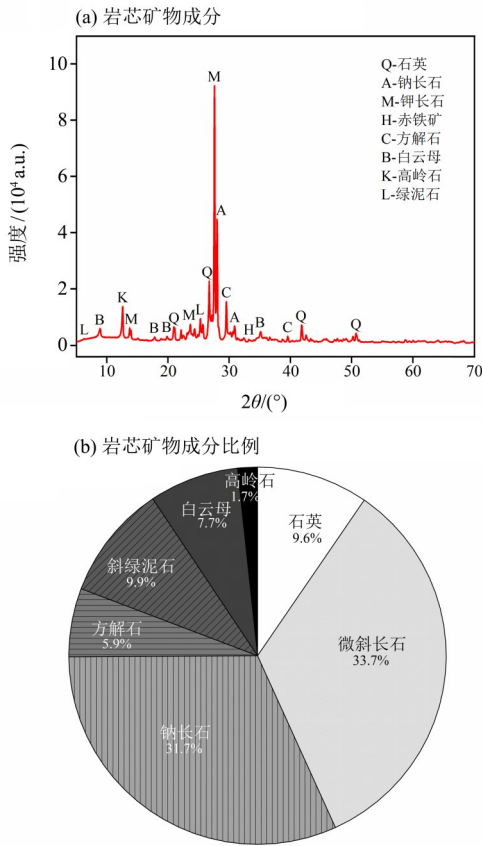


图1 X射线衍射(XRD)岩样矿物成分及比例
Fig. 1 Mineral composition and proportions of the rock sample based on X-ray diffraction (XRD)

组(A、B、C、D、E组),每组5个样品。A组实验为单调加载,将岩石所承受的最大应力值确定为峰值应力;B组实验为分级循环加载,循环加卸载的分级应力增量为20 MPa,直至样品破坏;C、D和E组分别进行30 a、50和70 MPa等幅循环加卸载实验,循环10次后单调加载至样品破裂。

1.2 实验装置

采用MTS E45试验机进行岩石力学实验。该设备可提供最大荷载100 kN,可满足本文研究需求。样品以0.002 mm/s的位移加载速率进行单轴压缩,在加载过程中实时记录应力-应变数据和声发射事件。MTS系统以20 Hz的频率记录时间、位移和轴向力数据;使用应变片以相同频率记录轴向和侧向变形。声发射采样率为3 MHz,门槛值为50 dB。采用RS-2A声发射传感器,采集频率范围值为50~400 kHz。

2 分析方法

2.1 Kaiser效应点判别的常规方法

Kaiser点可以通过不同声发射参数(振铃计数、撞击数、能量等)随时间的急剧增加来确定

(Villaescusa et al., 2002; Dinmohammadpour et al., 2022; Filimonov et al., 2001),如图2a、2b分别为通过声发射事件率和累计振铃计数曲线确定的Kaiser点。对于声发射参数曲线无明显拐点的情况,则绘制曲线初始抬升段和加速增加段的切线,将2条切线汇聚的点确定为Kaiser点(图2c)。但参数激增并无定量标准,据此确定Kaiser效应点具有主观性;绘图法对于一些曲线也难以准确确定Kaiser点。

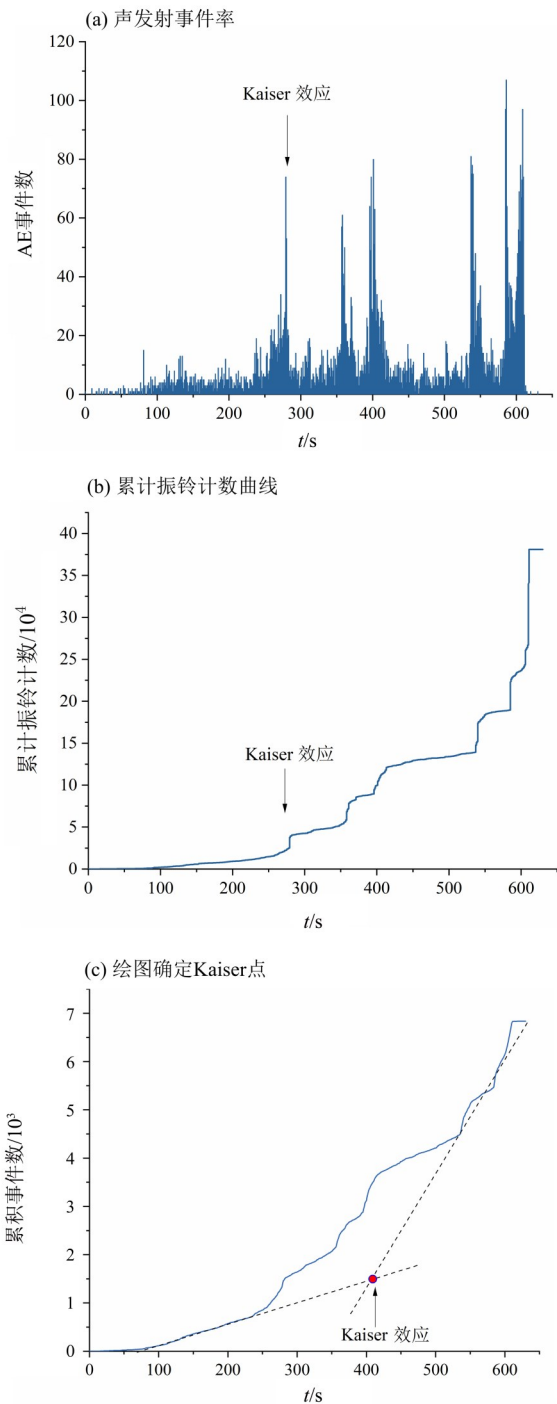


图2 常规的Kaiser点确定方法
Fig. 2 General methods for determining the Kaiser point

2.2 Kaiser点判别的综合分析方法

赵奎等(2012)提出在求取切线交点的基础上,根据岩石声发射能量关联维数曲线综合确定Kaiser效应点。关联维数是反映研究对象分形特征的参数,用于描述事物的复杂程度。赵奎等(2012)采用前人提出的G-P算法(Grassberger et al., 1983a, 1983b)计算关联维数,发现Kaiser点附近声发射活动表现出较高的有序性,其能量的关联维数小于其相邻点,结合应力与时间关系曲线综合确定Kaiser点,所得到的地应力值精度明显提高。关联维数最小本质上是岩石损伤从无序扩展,转向历史裂纹优先激活的临界状态在分形特征上的体现。该方案考虑了岩石破坏过程的统计学特征,为Kaiser效应提供可靠的定量化判据。

2.2.1 G-P算法原理 G-P算法首先考虑将声发射振铃计数作为基本参数序列,则有对应容量为 n 的序列集 X :

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}. \quad (1)$$

随后构造第1个 m 维度的向量,其第1个数据点为原始数据的第1个数据点,而后数据点按照时间延迟 τ 采样,形成1个 m 维度向量;第2个 m 维向量的第1个数据点为原始数据的第2个数据点,然后数据点往后移动 τ 个数据,构成另一个新的 m 维空间向量;以此类推,重构 m 维空间向量组如下:

$$X_N = \begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & \cdots & x_{1+(m-2)\tau} & x_{1+(m-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & \cdots & x_{2+(m-2)\tau} & x_{2+(m-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N_m-1} & x_{N_m-1+\tau} & \cdots & x_{N_m-1+(m-2)\tau} & x_{N_m-1+(m-1)\tau} \\ x_{N_m} & x_{N_m+\tau} & \cdots & x_{N_m+(m-2)\tau} & x_U \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 m 为重构向量的维数,也称为嵌入维数; τ 表示每次重构向量时向后推动的数据个数,也称为延迟时间,为采样时间间隔的整数倍; U 为重构向量空间所包含的数据集中 X_N 中的数据个数; N_m 表示重构向量空间中向量的个数,满足 $N_m = n - (m - 1)\tau$ 。

该系列声发射信号的积分函数表示为(Grassberger et al., 1983a, 1983b):

$$W(r) = \frac{1}{U^2} \cdot \sum_{i,j=1}^U H[r - |X_i - X_j|], \quad (3)$$

式中 $|X_i - X_j|$ 是重构相空间的向量 X_i 与 X_j 之间的距离, H 是Heaviside函数, r 为给定的尺度,通常定义为(Grassberger et al., 1983a, 1983b):

$$r = k \frac{1}{U^2} \sum_{i,j=1}^U |X_i - X_j|, \quad (4)$$

式中 k 为比例系数,其值的选择通常介于10~15。由式(3)可以得到给定尺度下的一系列点

$\{\ln W(r), \ln r\}$ 。已有结果表明,如果这些点为直线,则说明声发射振铃计数序列在给定的尺度范围内具有分形特征(Dai et al., 2025),直线斜率即为声发射振铃计数的关联维数 D 。

2.2.2 综合分析方法的实施 Kaiser点判别的综合分析方法主要包括以下3步:1)由实验记录得到声发射事件率、应力与时间之间的关系曲线;2)采用图2所示的常规方法得到近似的Kaiser点;3)计算声发射过程中的振铃计数关联维数,与近似Kaiser点(邻近的振铃计数关联维数最小的点,即为最终确定的Kaiser点)(图3)。

图3a显示了嵌入维数 m 为2~11、比例系数 k 为12、延迟时间为4个数据点获得的 $\ln W(r, m) - \ln r$ 的关系曲线, $\ln W(r, m)$ 和 $\ln r$ 的点的回归直线斜率即为声发射振铃计数的关联维数 D 。图3b为不同嵌入维数 m 和关联维数 D 的关系图,不同嵌入维数测试条件下的声发射振铃计数的关联维数逐渐趋于饱和,当 $m > 9$ 时, D 逐渐稳定在1.1,由此确定嵌入维数 $m=9$ 。图3c为叠加应力-时间曲线和关联维数 D -时间曲线。利用常规作图法(图2c)初步确定的Kaiser点在图上标为 $P1$,与其最邻近的关联维数最低的点为修正的Kaiser点($P2$),将该时间对应的应力确定为Kaiser应力。

2.3 Felicity效应

声发射Felicity效应是指在循环加载过程中,岩石当前应力值未超过上次加载阶段的上限应力值,但此时声发射振铃计数明显增加,又称为反Kaiser效应。Felicity比的定义为(Zhao et al., 2024):

$$F_i = \frac{\sigma_i^{\text{AE}}}{\sigma_{i-1}^{\text{max}}}, \quad (5)$$

式中 σ_i^{AE} 表示第 i 次加载过程中声发射突增时对应的应力值; $\sigma_{i-1}^{\text{max}}$ 表示第 $i-1$ 次加载过程中所受的最大应力。Felicity比表示岩石加载后对损伤累积的敏感性。 $F_i=1$ 表示仅当应力超过历史最大应力时才产生新的声发射,为理想的Kaiser效应; $F_i < 1$ 表示在应力未达到历史最大水平就出现声发射,反映材料存在损伤记忆或微观结构变化,值越小说明材料对历史损伤越敏感; $F_i > 1$ 则可能由应力路径差异、加载速率及材料愈合导致。通过判断岩石的早期应力历史,Felicity比给出Kaiser效应适用性的量化表达。考虑到实验误差,一般认为 F_i 介于0.9~1.1时,都存在Kaiser效应。

3 结果

按照1.1节准备的样品,每组实验可重复5次,

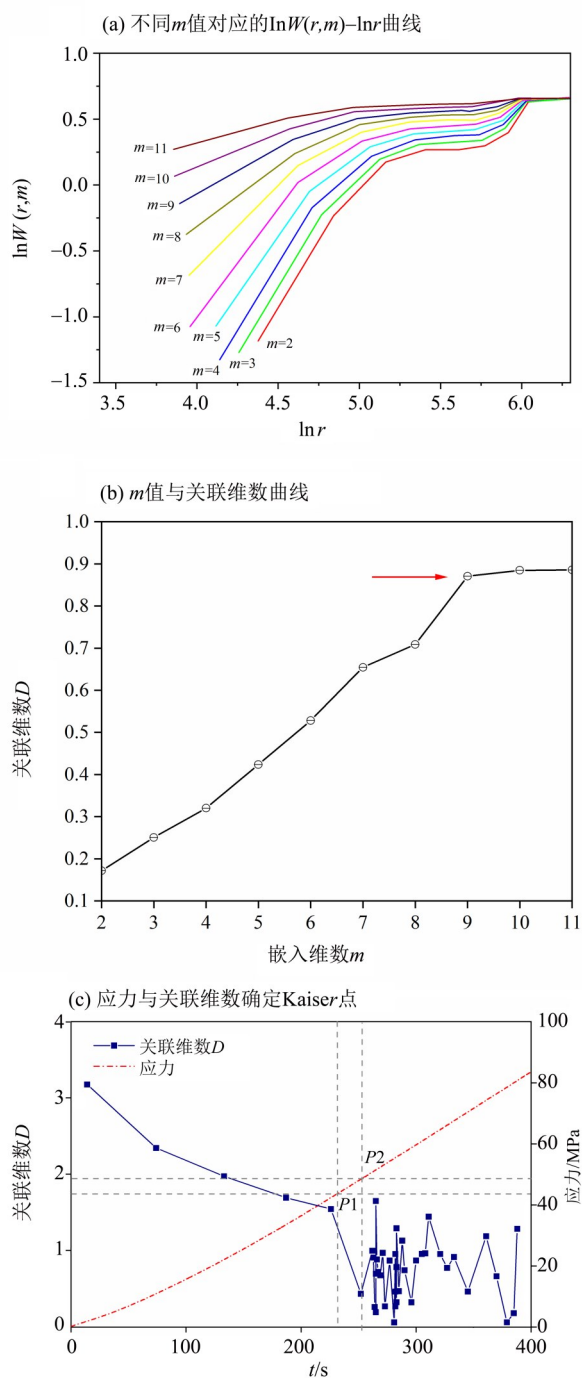


图3 G-P算法确定Kaiser点的3个步骤

Fig. 3 Three steps for determining the Kaiser point using the G-P algorithm

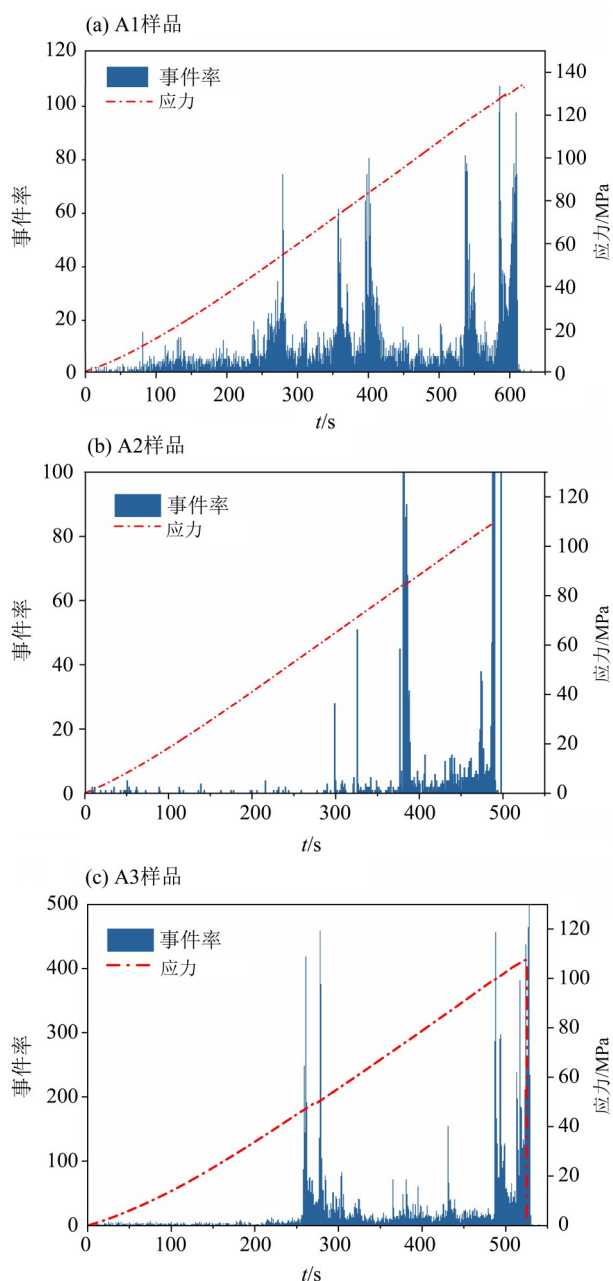
但实际操作过程中,除A组外的4组样品均存在循环早期样品破坏或数据采集不完整的情况,只保证了至少2次的重复数据,因此下文A、B组实验只展示3组数据,C~E组实验均只展示3个样品的结果。

3.1 声发射特征

3.1.1 单调加载 图4为A组实验3个样品的应力和声发射事件率随时间的变化关系。声发射事件数指检测系统在特定条件下检测到的声

发射信号总数量,声发射事件率指时间在1 s间隔内的声发射事件数。3个样品的峰值应力分别为132、108和104 MPa,另2个样品峰值应力分别为70和148 MPa,由此计算的平均峰值应力为112~114 MPa。

由图4可见,单调加载过程中声发射事件数在应力增大的过程中变化趋势基本一致,表现为加载初期事件率均较低,应力增大到一定值时,声发射事件率出现明显增加,随后进入较为稳定的阶段,临近峰值应力时事件率迅速增加。

图4 单调加载3个样品应力和声发射事件率的变化关系
Fig. 4 Variation of stress and acoustic emission event for three monotonic loading samples

3.1.2 分级循环加载 图5为B组分级加载实验3个样品的应力、能量、累积振铃数随时间的变化曲线。图中可见,岩石在加载初期观测到了声发射活动,在加载过程中累积振铃曲线呈台阶状上升;B1和B2样品分别在第5和第6次加载过程中发生破裂;B3样品早期声发射事件少,在轴压80 MPa时声发射活动突然明显,累积振铃计数和能量值迅速升高,在第6次加载中样品破裂。B3在前3个循环中声发射活动十分平静,这可能是由于B3样品内部可压密裂隙数量少。3个样品均显示分级加载前期(轴压小于60 MPa时),声发射活动变化的剧烈程度小于高应力阶段,能量和累积振铃曲线上升幅度也较小。

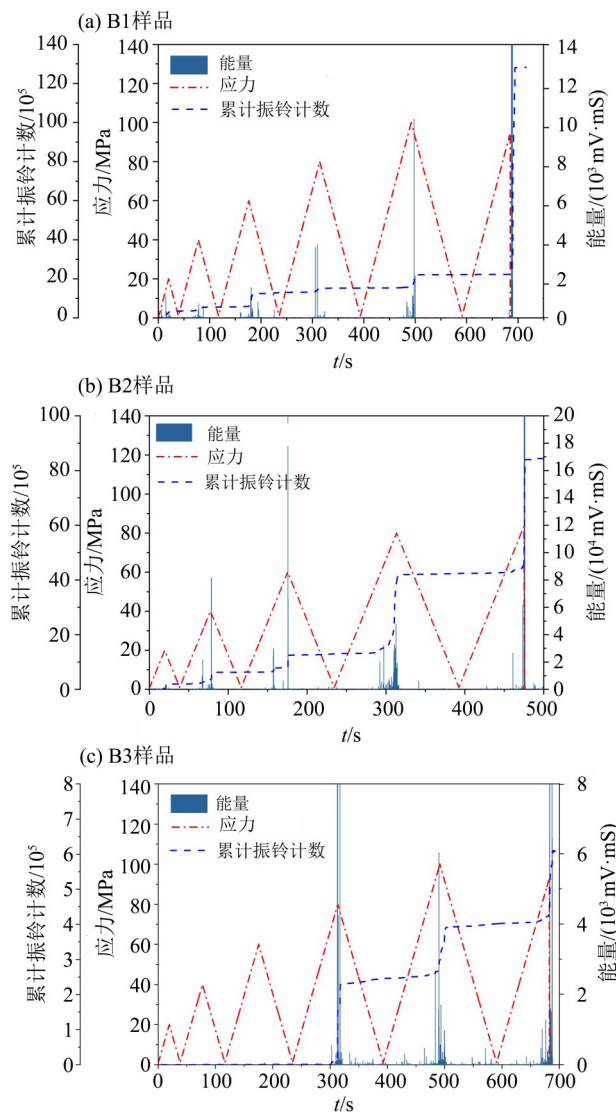


图5 分级加载实验3个样品应力、能量、累积振铃的变化

Fig. 5 Variation of stress, energy, and cumulative ringing counts for three samples under incremental cyclic loading tests

3.1.3 等幅循环加载 图6为等幅循环加载中的应力、能量、累积振铃数随时间变化曲线,循环应力(轴压)分别为30、50、70 MPa,10次循环后样品以0.002 mm/s的位移加载速率单调加载至样品破裂。

30 MPa应力加卸载循环期间,能量和累积振铃计数均未明显增长,曲线几乎与时间轴重合;在循环结束进入持续加载阶段时,C1样品在80 MPa时声发射活动剧烈上升,直至破裂,C2样品在70 MPa时能量值出现明显上升(图6a、b)。50 MPa应力加卸载循环时,声发射活动一直很低;在持续加载阶段,D1和D2在应力值为80 MPa时能量值和累积振铃计数迅速升高,呈现理想的Kaiser效应(图6c、d)。70 MPa应力加卸载时,E1在第1次加载中产生明显的声发射活动,此后循环中声发射处于平稳阶段直至岩石破裂前;E2在第1个循环加载中能量和累积振铃计数出现明显上升,在第5、第7个循环过程中能量值和累积振铃计数再次呈明显上升,随后声发射活动保持稳定直至岩石破裂前(图6e、f)。

3.2 关联维数

图7给出了参照图3所示步骤确定A组3个样品的Kaiser点(图7b、d、f),并与常规作图方法确定的Kaiser点进行对比(图7a、c、e)。利用常规作图法初步确定的Kaiser点(P_1),与其最邻近的关联维数最低的点为修正的Kaiser点标为(P_2)。

A1、A2和A3样品根据常规作图法确定的近似Kaiser点平均应力为82.7 MPa。综合作图法确定的Kaiser点值为分别为80.1、77.3和79.9 MPa,计算得到平均值为79.1 MPa。该值与常规作图法确定的值接近,但因为有关联维数支持,减少了常规作图法带来的不确定性,提高了Kaiser应力的精度。

3.3 Felicity 效应分析

为了评价上述方法确定的Kaiser效应的有效性,利用循环加载实验数据进行了Felicity比的计算。表1给出了分级加载条件下样品B1、B2、B3的循环次数和Felicity比之间的关系。

随着循环次数(应力)增加,Felicity比呈下降趋势(表1)。由表1可知,当循环次数为2时,B1和B2样品的Felicity分别为1.65和1.48,超出了Kaiser效应存在的Felicity比范围;当循环次数为4和5时,B2样品的Felicity比介于0.9~1.1;当循环次数为5和6时,B3样品的Felicity比介于0.9~1.1,说明在此阶段中Kaiser效应有效。

表2为等幅循环加载过程中循环次数和Felicity比之间的关系。在循环加载过程中,Felicity比值大

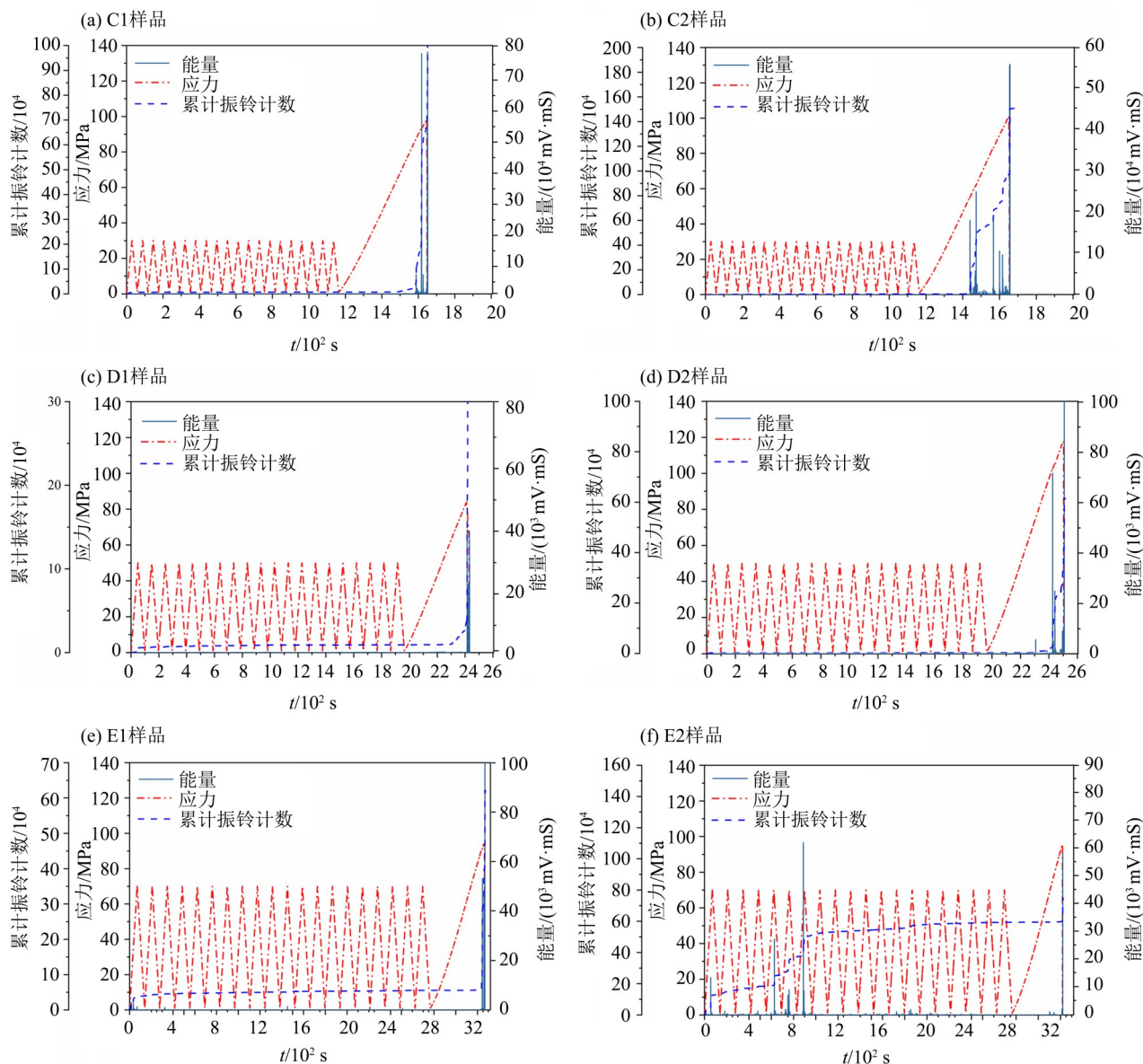


图6 等幅循环加载应力、能量、累积振铃数的变化

Fig. 6 Variation of stress, energy, and cumulative ringing counts under constant-amplitude cyclic loading

多介于0.85~1.00。该结果显示,当循环加载应力小于70 MPa时,样品内部未出现明显损伤。

对比表1和表2可知,在分级循环加载和等幅循环加载过程中,随着循环次数增加,Kaiser效应的有效程度增加。在等幅循环中,E2样品在第4~7次循环过程中,Felicity比值均在Kaiser效应有效区内,并且在第5和第6次循环中有效程度最高。在分级循环加载中,B2和B3样品分别在第4次和第5次循环过程中Kaiser效应有效程度最高。由此可知,在分级循环加载和等幅循环加载条件下,通过Felicity比值评估Kaiser效应有效的应力范围为42.9~92.3 MPa,利用综合分析方法确定的Kaiser应力为79.1 MPa,该应力值位于Felicity比评估的有效范围内。

4 讨论

河源地区花岗岩Kaiser效应显示所受历史应力约为79.1 MPa,其所代表的是花岗岩冷凝形成并具备脆性破裂特征之后所经历的最大差应力。

由重力引起的地下某深度 h 的垂向应力为 $\sigma_v = \rho gh$,其中 ρ 为上覆岩层的平均密度, g 为重力加速度。本研究的样品取样深度为365.40 m,测得样品平均密度为2.65 g/cm³,由于钻孔顶部土壤层仅数米,基岩岩性接近,可以依此密度计算该深度上的垂向应力为9.68 MPa。相同深度上,由重力引起的水平应力为 $\sigma_H = \nu/(1 - \nu)\rho gh$,其中 ν 为泊松比。本实验过程中,侧向应变和轴向应变记录得到的 ν 为0.33,由此计算完全弹性条件下样品深度上的水

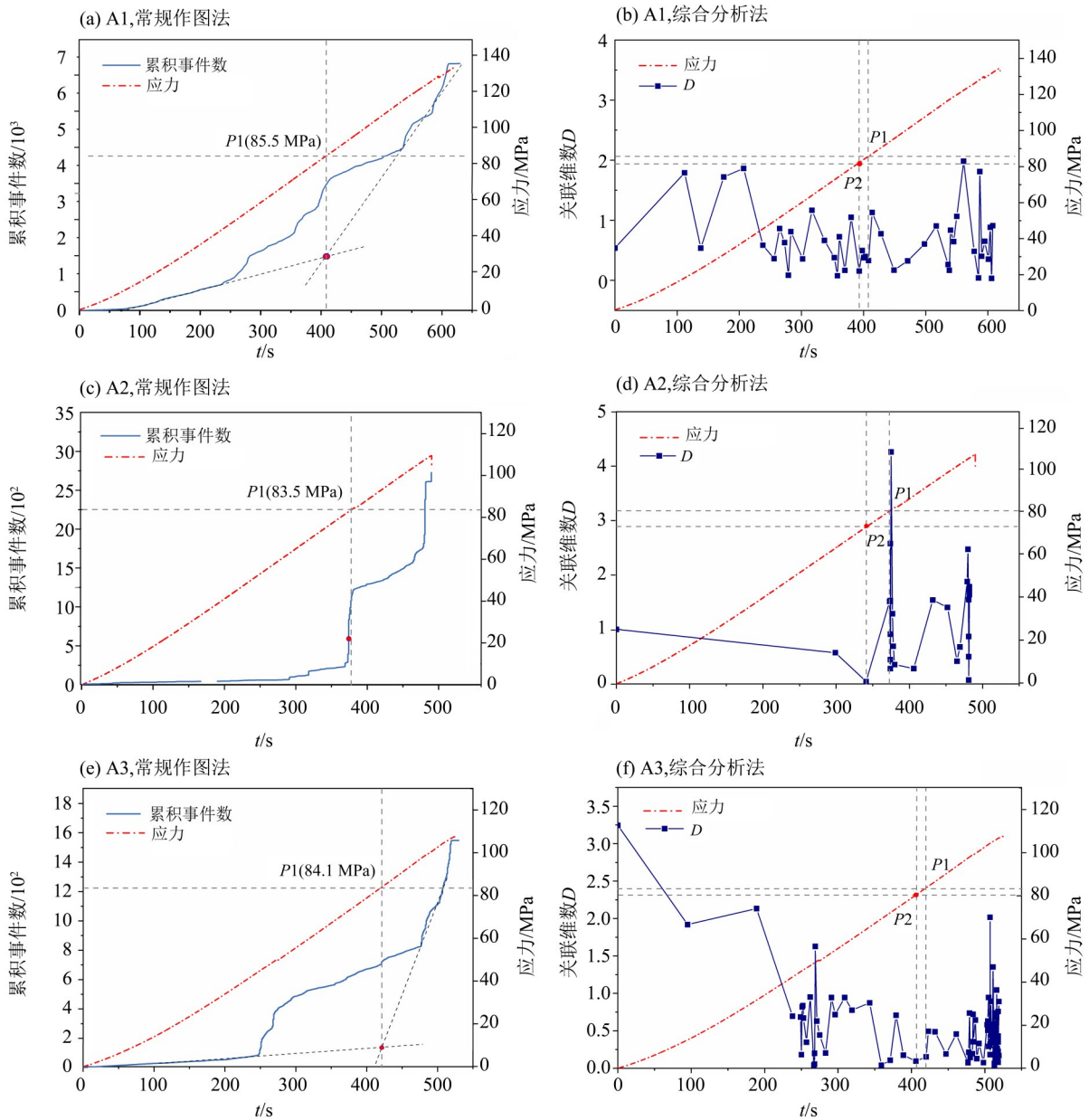


图 7 常规作图法和综合分析方法确定 Kaiser 应力

Fig. 7 Determining Kaiser stress using conventional plotting method and the integrated analysis method

平应力为 4.76 MPa, 差应力仅 4.92 MPa。显然, 仅考虑重力作用, 样品所在位置的应力状态与其所经历的历史应力状态明显不符。根据差应力计算公式 $\Delta\sigma = \sigma_v - \sigma_H = (1 - 2\nu)/(1 - \nu)\rho gh$, 得出差应力为 79.1 MPa, 对应的深度应为 5.9 km, 即取样部位岩石曾经存在于该深度。

中国东南部大量出露的花岗岩基多数形成于 130—150 Ma, 对应燕山运动晚期(娄峰等, 2010)。燕山运动之后, 华南地区新生代总体构造运动强度弱, 以北西—南东向伸展运动为主, 形成了控制该地区主要构造格局的北东向正断层, 后期构造应力转

为以北西西—南东东方向挤压为主, 但挤压作用不强烈(舒良树等, 2004)。总体而言, 华南地区新生代主要经历整体剥蚀, 内部断裂划分的不同块体之间存在一定差异(张敏等, 2021)。区域内并没有新生代整体沉降的证据, 由此推测取样点花岗岩可能在近 6 km 深处冷凝形成, 随后的地壳整体剥蚀使其到达地表以下仅 365 m, 即地表抬升幅度约 5.6 km。

岩石的泊松比一般介于 0.2~0.35, 相同钻孔在 104.5 m 深度岩心的实验测量得到花岗岩泊松比为 0.2。如果以泊松比为 0.2 计算, 则 79.1 MPa 的差应力对应的深度约为 4.0 km, 那么对应的新生代地表

表1 分级加载实验循环次数与Felicity比
Table 1 Loading cycle and Felicity ratio under incremental cyclic loading

样品	循环 <i>i</i>	σ_{i-1}^m	σ_i^{AE}	F_i
B1	2	20	33.1	1.65
	3	40	55.4	1.38
	4	60	73.0	1.21
	5	80	91.0	1.13
B2	2	20	29.67	1.48
	3	40	42.90	1.07
	4	60	59.42	0.99
	5	80	82.33	1.02
B3	4	60	67.75	1.12
	5	80	75.53	0.94
	6	100	92.39	0.92

表2 等幅加载实验循环次数与Felicity比
Table 2 Loading cycle and Felicity ratio under constant-amplitude loading

样品	循环 <i>i</i>	σ_{i-1}^m	σ_i^{AE}	F_i
E1	2	70	65.57	0.93
	3	70	57.50	0.82
	4	70	60.25	0.86
E2	2	70	57.14	0.81
	3	70	61.63	0.88
	4	70	64.52	0.92
	5	70	70.30	1.00
	6	70	70.10	1.00
	7	70	68.14	0.97

抬升、剥蚀量约3.6 km。这意味着,仅考虑重力作用时,岩石参数泊松比对构造抬升量的估计可能存在-2.0 km的误差。

进一步考虑水平构造作用力的影响,重力作用导致的地下应力均为压性,当水平某一方向存在拉

张应力时,其水平应力会减小且差应力增加;反之,如果水平某一方向存在压性构造作用时,其水平应力增加且差应力减小。水平构造作用力的大小较难估算,且不同构造部位差异极大。根据Richardson et al.(1979)的估计,洋中脊的推力大约数十兆帕量级。考虑到华南地区新生代构造变形不强烈,以一个可能的水平构造作用力(如10 MPa)进行分析,估算的深度误差约±0.75 km,小于泊松比参数引起的误差。

根据Kaiser效应反映的79.1 MPa的差应力,考虑岩石本身参数和构造力影响,推测岩石曾经的埋深范围约为3.9~6.6 km;取样深度仅365 m,二者差异(3.5~6.2 km)代表该地区新生代地表抬升量。前人根据钻孔地层资料推测珠江三角洲地区花岗岩形成深度在地表4~6 km以下(Chen et al., 2003),这与本研究根据历史应力特征推测的花岗岩埋深或抬升量基本一致。珠江三角洲以外,张雨薇等(2022)利用热运动学方法研究了黄山三维构造地貌演化,发现黄山地区新生代以来的抬升高度约6.8 km;王煜(2022)研究了闽西南晚中生代花岗岩对相关热液矿床形成及保存的约束,其中锆石、磷灰石裂变径迹定年及热史模拟结果表明抬升剥蚀高度介于0.5~3.2 km。与上述研究相比,华南地区内部的差异抬升仍有待开展更为深入、细致的研究。

5 结 论

本研究对采自河源地区的花岗岩进行了单轴压缩实验,获得了不同加载过程中的声发射信息。采用不同加载方式的方案分析Kaiser效应,进而利用Felicity比值分析其有效性,确定历史应力为79.1 MPa。根据华南地区新生代的整体构造运动特征,推测河源地区地表自燕山晚期以来抬升剥蚀量约3.5~6.2 km。该结果为探讨华南地区构造演化提供了新证据,更多相关研究将有助于详细了解岩石埋藏历史,从而为三维地质模型构建、相关矿产和地热资源的勘查提供附加信息。

参考文献:

- 姜磊, 2018. 河源市地热资源分布情况及其特征[J]. 西部资源, (4): 122-123.
- 孔政, 曾溅辉, 左名圣, 2023. Kaiser效应点识别方法及储层地应力预测[J]. 油气地质与采收率, 30(6): 54-60.
- 娄峰, 陈国能, 李宏卫, 等, 2010. 南岭地区中生代花岗岩成岩成矿物质来源研究[J]. 矿床地质, 29(S1): 239-240.
- 卢运虎, 陈勉, 金衍, 等, 2011. 碳酸盐岩声发射地应力测量

- 方法实验研究[J]. 岩土工程学报, 33(8): 1192-1196.
- 舒良树, 周新民, 邓平, 等, 2004. 中国东南部中、新生代盆地特征与构造演化[J]. 地质通报, 23(9): 876-884.
- TANNOCK L, 王亚, 李景富, 等, 2019. 广东河源断裂带地热成因及与构造关系初探[J]. 地质力学学报, 25(3): 400-411.
- 王霄飞, 余珊, 龚跃华, 等, 2014. 华南北东向断裂在南海北

- 部陆架的延伸[J]. 大地构造与成矿学, 38(3): 557-570.
- 王煜, 2022. 闽西南晚中生代花岗岩对相关热液矿床形成及变化与保存的约束[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 张敏, 旷健, 肖志才, 等, 2021. 广东惠州燕山期以来地质构造演化: 对华南构造的新启示[J]. 地球科学, (1): 242-258.
- 张雨薇, 李广伟, 蔡东旭, 等, 2022. 基于3D热运动模拟限定的黄山地区地貌演化初探[J]. 第四纪研究, 42(3): 783-796.
- 赵奎, 闫道全, 钟春晖, 等, 2012. 声发射测量地应力综合分析方法与实验验证[J]. 岩土工程学报, 34(8): 1403-1411.
- ANIKIEV D, BIRNIE C, WAHEED UBIN, et al, 2023. Machine learning in microseismic monitoring [J]. Earth Sci Rev, 239: 104371.
- BAI X, ZHANG D M, WANG H, et al, 2018. A novel *in situ* stress measurement method based on acoustic emission Kaiser effect: A theoretical and experimental study [J]. R Soc Open Sci, 5(10): 181263.
- CHEN G, GRAPES R, 2003. An *In-situ* melting model of granite formation: geological evidence from southeast China [J]. Int Geol Rev, 45(7): 611-622.
- DAI J, LIU J, YANG J, et al, 2025. Correlational fractal analysis of the Kaiser effect in rock: Implications for salt-cavern engineering under triaxial cyclic loading and unloading [J]. Nondestruct Test Eval, 40(3): 1180-1202.
- DINMOHAMMADPOUR M, NIKKHAH M, GOSHTASBI K, et al, 2022. Application of wavelet transform in evaluating the Kaiser effect of rocks in acoustic emission test [J]. Measurement, 192: 110887.
- FILIMONOV Y L, LAVROV A V, SHAFARENKO Y M, et al, 2001. Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurement in a rock mass [J]. Rock Mech Rock Eng, 34(4): 275-291.
- FU X, BAN Y X, XIE Q, et al, 2021. Time delay mechanism of the Kaiser effect in sandstone under uniaxial compressive stress conditions [J]. Rock Mech Rock Eng, 54(3): 1091-1108.
- GRASSBERGER P, PROCACCIA I, 1983a. Measuring the strangeness of strange attractors [J]. Phys D Nonlinear Phenom, 9(1/2): 189-208.
- GRASSBERGER P, PROCACCIA I, 1983b. Characterization of strange attractors [J]. Phys Rev Lett, 50(5): 346-349.
- KHARGHANI M, GOSHTASBI K, NIKKAH M, et al, 2021. Investigation of the Kaiser effect in anisotropic rocks with different angles by acoustic emission method [J]. Appl Acoust, 175: 107831.
- LI H, LIN C, REN L, et al. 2021. Quantitative prediction of multi-period tectonic fractures based on integrated geological-geophysical and geomechanics data in deep carbonate reservoirs of Halahatang oilfield in northern Tarim Basin [J]. Mar Petrol Geol, 134: 105377.
- LI Z, 2017. An investigation of failure modes and failure criteria of rock in complex stress states [J]. J South Afr Inst Min Metall, 117(3): 245-255.
- MENG Q, ZHANG M, HAN L, et al, 2016. Effects of acoustic emission and energy evolution of rock specimens under the uniaxial cyclic loading and unloading compression [J]. Rock Mech Rock Eng, 49(10): 3873-3886.
- QIN T, SUN H, LIU H, et al, 2018. Experimental study on mechanical and acoustic emission characteristics of rock samples under different stress paths [J]. Shock Vib, (1): 4813724.
- RICHARDSON R M, SOLOMON S C, SLEEP N H, 1979. Tectonic stress in the plates [J]. Rev Geophys, 17(5): 981-1019.
- SUN Y, YU F, LV J, 2023. Research on the characteristics of acoustic emission activities of granite and marble under different loading methods [J]. 2023(1): 2773795.
- VILLAESCUSA E, SETO M, BAIRD G, 2002. Stress measurements from oriented core [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 39(5): 603-615.
- WAN T, 2012. The tectonics of China [M]. Berlin, Heidelberg: Springer.
- WANG A D, SUN Z X, HU B Q, et al, 2014. Guangdong, a potential province for developing hot dry rock geothermal resource [J]. Appl Mech Mater, 492: 583-585.
- ZHAO K, YANG D, HUANG Z, et al, 2024. Investigations and new insights on the relation between the valid interval of the Kaiser effect and the characteristic stress [J]. Earth Sci Rev, 249: 104673.
- ZHAO Z, QIAO Y, TIAN J, et al, 2006. A new method to identify quaternary moraine: Acoustic emission stress measurement [J]. Acta Geol Sin Engl Ed, 80(5): 754-758.
- ZHOU X P, ZHANG J Z, 2021. Damage progression and acoustic emission in brittle failure of granite and sandstone [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 143: 104789.
- ZHU W, WANG S, CHANG X, et al, 2021. Three-dimensional ultrasonic imaging and acoustic emission monitoring of hydraulic fractures in tight sandstone [J]. Appl Sci, 11(19): 9352.
- ZHUANG L, ZANG A, 2021. Laboratory hydraulic fracturing experiments on crystalline rock for geothermal purposes [J]. Earth Sci Rev, 216: 103580.