

流体包裹体法在岩体滑坡周界预测中的应用

徐金明 孙昆仑

(上海大学, 上海 200072)

摘要: 岩体滑坡是岩体变形与破坏状态达到一定程度的结果, 岩体中流体包裹体参数及其变化是反映这一状态变化的重要微观指标, 研究这些参数及其变化可以确定岩体滑坡的滑动周界。以浙江省湖州市白鹤岭滑坡为例, 分析 16 个测试样本的流体包裹体迹面特征参数 (包括张开度、粗糙度系数和分布密度) 和包裹体热动力学参数 (包括水溶液包裹体和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体的均一温度和流体密度), 使用聚类分析与对应分析对反映流体包裹体迹面特征的样本、指标和滑坡周界的相互关系进行分析, 提出分类标准和聚类方法的建议。结果表明, 16 个测试样本分为 3 类比较合适, 3 种样本类型与稳定区、滑坡周界、滑动区基本一致, 样本、指标和滑坡周界之间具有较好的对应关系。在此基础上, 提出确定岩体滑坡周界的一种新方法: 流体包裹体方法。这一方法将为岩体滑坡的分析与预测提供一条具有良好前景的新方法。

关键词: 流体包裹体; 滑坡周界; 迹面特征参数; 包裹体热动力学参数; 聚类分析; 对应分析

中图分类号: TU457 文献标识码: A

文章编号: 1000-131X (2007) 01-0069-05

Determination of landslide boundary by fluid inclusions

Xu Jinming Sun Kunlun

(Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Rock landslides result from rock deformations exceeding certain extent. Parameters of fluid inclusions in the rock mass are important microscopic indices of reflecting the change of states. These indices and changes may be employed to determine the boundary of landslide. The Baiheling slope, located near Huzhou City, Zejiang Province, P. R. China, was considered in using clustering and correlation analyses to reveal the relationships among 16 samples, 7 indices and the landslide boundary. The indices include the characteristic parameters (such as aperture, roughness coefficient, distribution density) of fluid inclusion planes and the thermodynamic parameters (such as homogenization temperatures, densities of aqueous and $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ solutions) of the inclusions. A clustering criterion and method were proposed. It was shown that these samples may be classified into three groups corresponding to, respectively, the stable area, the boundary and the landslide area. A new technique for determining landslide boundary with fluid inclusions was proposed, which may be employed for analyzing and forecasting rock landslides.

Keywords: fluid inclusion; landslide boundary; characteristic parameter; thermodynamic parameters; clustering analysis; correspondence analysis

E-mail: xjming@163.com

岩体滑坡一直是我国山区建设中面临的重大问题, 确定岩体滑坡周界又是滑坡研究中的重中之重。传统确定方法主要是分析宏观、细观地质特征及相关参数, Furian 等^[1]研究了滑坡过程中不同位置处成分的空间分布规律, 兰恒星等^[2]进行了 GIS 支持下降雨型滑坡危险性空间分析预测, Casaghi^[3]等发现滑坡不

同位置颗粒分布具有比较明显的规律性, Busoni 等研究了地表物质的迁移与侵蚀形式^[4]; 而在山体滑坡治理方面, 张布荣^[5]使用“串层锚杆”研究了倾倒型岩石边坡工程的加固机理和设计参数, 张强勇等^[6]使用三维岩锚柱单元模型研究山体滑坡治理效果。但这些宏观分析研究方法费时费力、准确性也不是很高。

岩体滑坡过程也会在显微构造方面有许多表现。岩体变形破坏过程中产生的大量显微裂隙可以捕获周围流体介质而形成流体包裹体, 显微裂隙所对应的裂隙

基金项目: 国家自然科学基金 (40572162)

作者简介: 徐金明, 博士, 副教授

收稿日期: 2006-09-21

面称为流体包裹体迹面 (Fluid Inclusion Plane, 简作 FIP)。FIP 保存了构造变形活动的信息、对于地质动力环境反映十分敏感 [7-8], 不同性质断裂内的流体包裹体数量、粒径、气液比等具有不同特点 [9], 岩石微小裂缝形成过程基本都可以在流体包裹体中找到相应证据 [10], 变形、位移、位错、破坏活动迹象在 FIP 均有信息反映 [11-12]。测定 FIP 迹面特征参数和热动力学参数变化, 可以推算热动力参数变化过程、揭开岩体变形破坏历史的“密码”、了解构造应力与变化对滑坡产生过程的影响。

本文对流体包裹体迹面特征参数和包裹体热动力学参数进行了类别分析与对应分析, 提出了确定岩体滑坡范围的一种新方法——流体包裹体方法。

1 数据和方法

岩体的变形或破坏, 不仅使 FIP 特征参数 (包括长度、形态、贯通性、闭合性、粗糙度、交叉组合网络性质等) 发生变化、也使包裹体热力学性质参数 (包括形成温度、压力、流体密度、主要成分、氧逸度等) 因封闭流体泄漏而发生改变, 多组 FIP 反映了多次岩体变形作用和滑动过程。为了确定 FIP 参数与滑坡周界的关系, 选取浙江省湖州市西北的白鹤龄滑

坡进行研究, 采样点分布见图 1。野外采集的定向标本在室内沿水平方向切割并磨制成定向岩石薄片, 利用费氏五轴旋转台进行 FIP 方位测定, 对 FIP 中包裹体进行温度、盐度、成分等方面的测定。由于 FIP 特征参数和包裹体热力学性质参数比较多, 研究时选取具有代表性、易于测定的 7 个关键指标进行分析。这 7 个指标是: FIP 迹面特征参数, 包括 FIP 张开度 (μm)、粗糙度系数 JRC 和分布密度 (条/ cm^2), 这 3 个参数分别以 x_1 、 x_2 、 x_3 表示; 包裹体热动力学参数, 包括水溶液包裹体均一温度 ()、 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体均一温度 ()、水溶液包裹体流体密度 (g/cm^3) 和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体流体密度 (g/cm^3), 包裹体均一温度在冷热台上直接测定求出, 包裹体密度利用水溶液或 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 计算公式分别求出, 这 4 个参数分别以 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 表示。虽然这些微观指标都直接或间接地反映了岩石的变形破坏过程, 但目前尚难以建立它们与滑坡周界的准确定量关系, 因此, 本次研究主要采用样品聚类分析和对应分析方法。

聚类分析包括样品聚类 (也叫 Q 型聚类) 或指标聚类 (也叫 R 型聚类) 两大类。为避免不同量纲对聚类结果的影响, 样品聚类前对原始数值进行标准化处理、计算样本或指标之间的距离使用欧氏距离, 聚类时首先挑出样品对、使用加权平均方法删除原有

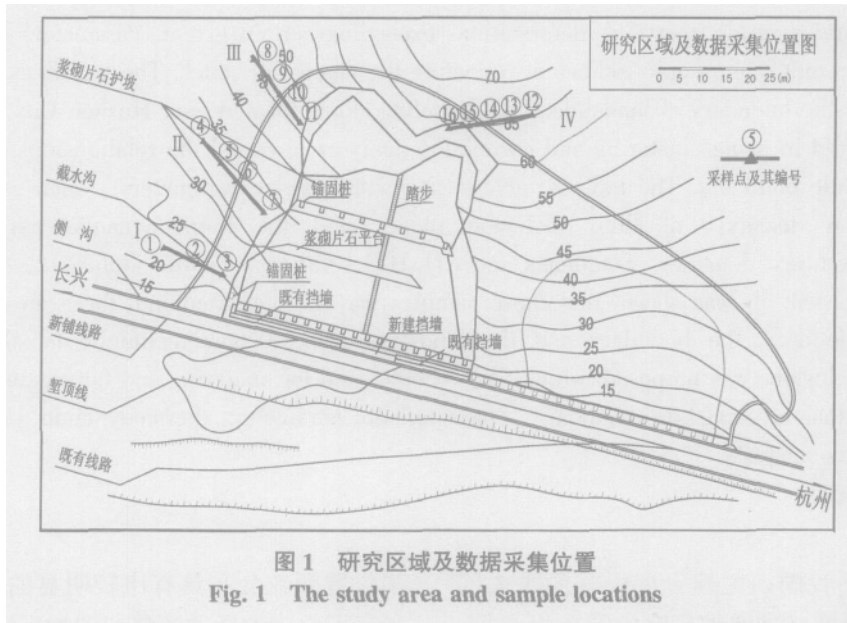


图 1 研究区域及数据采集位置
Fig. 1 The study area and sample locations

两个样品并形成一个新样品、重复这一步骤直至归为一类。

对应分析时, 将 p 个指标、 n 个样品的原始数据矩阵 $X=\{x_{ij}\} \{i=1, \dots, n \ j=1, \dots, p\}$ 转换为矩阵 $Z=\{z_{ij}\}$ [13]:

$$z_{ij} = (x_{ij} - \sum_{l=1}^n x_{li} - \sum_{k=1}^p x_{kj}) / \sqrt{\sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^p x_{lk}} \quad (1)$$

由于指标和样本间的协方差阵 $F=ZZ^T$ 、 $G=Z^T Z$ 存在

简明的对应关系、 $\{z_i\}$ 对指标和样本是对等的, 可以使用 F 的结果计算 G 的特征值和特征向量, 通过分析同一平面上的指标和样品散点图对指标和样品进行分类。

2 结果与分析

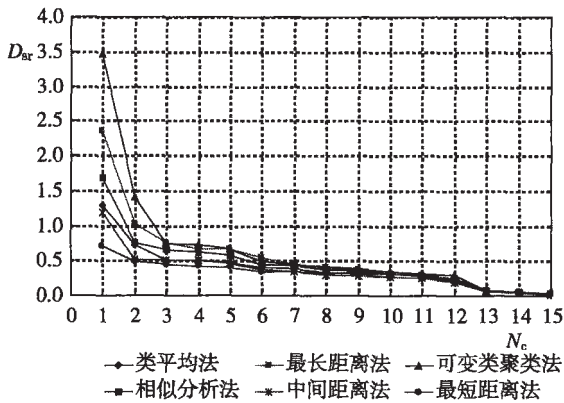
2.1 包裹体类别空间分布与滑坡周界的关系

聚类分析时必须确定类个数，根据 R^2 统计量、半偏 R^2 计算结果、伪 F 统计量或伪 t^2 统计量得到的聚类结果个数和聚类结果总有一些差别，统计学上还没有很好解决^[3]。实际类别数为 3~5 时通常就已足够、且类间样品对标准化均方根距离 D_s 在较小类别数 N_c 时总是随 N_c 增加而降低。为实用计，作者提出一个根据 D_s 增加率 D_r 来决定类别数的方法， D_r 定义是

$$D_r = (D_{s,n-1} - D_{s,n}) / D_{s,n-1} \quad (2)$$

式中： $D_{s,n}$ 与 $D_{s,n-1}$ 分别为聚类数为 n 和 $n-1$ 时的标准化均方根距离。

使用不同方法时类间样品对标准化均方根距离增加率与类别数之间的比较见图 2。由图 2 可以看出，当 N_c 从 1 开始增加时，若取 D_r 小于 0.20 的前一聚类数进行分类，则对大多数 N_c 来说所得类别数基本一致 (N_c 小于 6 时则类别数完全一致)。因此，我们建议，从实用、易于操作角度出发，取 D_r 小于 0.20 的前一聚类数作为类别。采用这一标准时不同聚类方法的类别判定结果虽有差别、但与统计学上根据不同统计量判定出的结果基本一致。根据不同聚类的比较结果 (见图 2)，采用类平均法进行样品聚类分析效果更好一些。因此，本次研究采用类平均法进行聚类并采用 D_r 小于 0.20 的前一聚类数作为类别数。



图中， D_r 为类间样品对标准化均方根距离增加率， N_c 为类别数

图 2 不同方法距离增加率下样品聚类结果

Fig. 2 Specimen clusters from different normalized distances linked between classifications

白鹤岭滑坡流体包裹体的样品聚类谱系图见图 3。由图 2 和图 3 可以看出，16 个样品可以分为 3 类。如果将这 3 类分别以 A、B、C 来表示，则样本编号为(2, 5, 9, 13)、(1, 4, 8, 10, 12)、(3, 6, 7, 11, 14, 15, 16) 分别归属于 A、B、C 3 类。把这些样本及其类别放在平面图上来表示 (见图 4)，则聚类结果与滑坡周界基本一致：A 类样品分布在滑坡周界外侧的稳定位置，B 类样品大致相当于滑坡周界位置，C 类样品大多位于滑动体内。同时我们还发现，若把全部样品

归为两类 (见图 3)，则 A 类和 B 类归为类别 I、C 类归为 II，I 类和 II 类的分界线恰恰就是实际滑坡周界。两种分类方案中，前一种更符合统计学原理、后一种更复合实际情况，10 号和 14 号样本为异常样本、但都分布在滑坡周界附近。

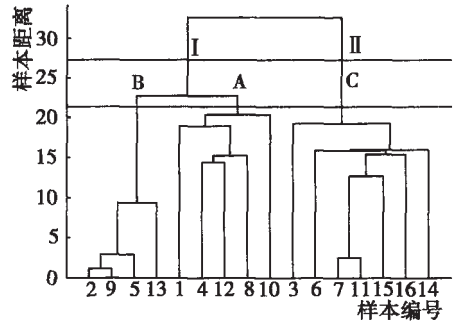


图 3 样品聚类分析的聚类谱系图
Fig. 3 A cluster spectrum for specimens

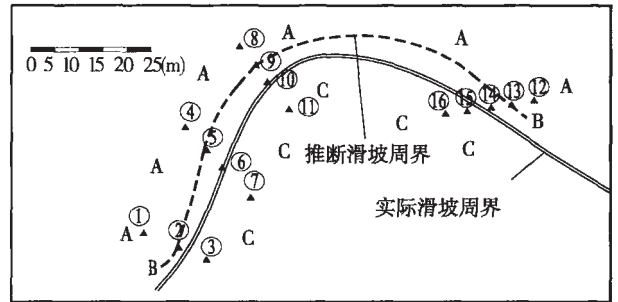


图 4 样品类别空间位置与滑坡周界的关系
Fig. 4 The relationship between landslide boundary and specimen locations

2.2 包裹体类别与指标对应分析

惯量和卡方分解结果见表 1。从表 1 可以看出，第 1 特征根解释了信息量的 62.72%，第 2 特征根解释了信息量的 31.45%，两者之和为 94.17%，因此，用二维图形完全可以表示两指标信息 (且以第 1 维度为主)。

表 1 惯量和卡方分解结果

Table 1 Results of inertia and Chi-Square decomposition

奇异值	惯量	λ^2	百分比
0.04585	0.00210	15.6266	62.72
0.03247	0.00105	7.8350	31.45
0.00956	0.00009	0.6788	2.72
0.00789	0.00006	0.4625	1.86
0.00647	0.00004	0.3113	1.25
0.00029	0.00000	0.0006	0.00

两维度内的样品和指标的坐标与统计量计算结果见表 2，表中 A1~A16 和 B1~B7 分别为样本编号与指标编号。图 5 为样本与指标的对应分析图 (根据表 2 中各样品及指标与第 1、第 2 维度关系作出)，图中还标出了前面的样品聚类结果。

表 2 两维度内样本和指标的坐标与统计量计算结果
Table 2 Coordinates and statistical parameters in two dimensions

样本/指标编号	第 1 维度	第 2 维度	对总特征根的 的贡献(%)	最大贡献率 所在维度	维度贡献率	
					对第 1 维度	对第 2 维度
A1	-0.0621	0.0153	0.0721	1	0.1015	0.0122
A2	-0.0490	-0.0259	0.0552	1	0.0679	0.0379
A3	-0.0296	0.0278	0.0388	2	0.0293	0.0513
A4	-0.0344	0.0029	0.0299	1	0.0283	0.0004
A5	-0.0514	-0.0353	0.0693	1	0.0740	0.0696
A6	0.0589	-0.0118	0.0735	1	0.1117	0.0090
A7	0.0493	0.0111	0.0550	1	0.0827	0.0084
A8	-0.0791	0.0405	0.1308	1	0.1539	0.0806
A9	-0.0437	-0.0247	0.0515	1	0.0541	0.0344
A10	0.0042	0.0753	0.1051	2	0.0005	0.3166
A11	0.0396	0.0074	0.0355	1	0.0530	0.0037
A12	0.0240	0.0302	0.0321	2	0.0145	0.0459
A13	0.0037	-0.0123	0.0041	2	0.0004	0.0087
A14	-0.0056	-0.0626	0.0797	2	0.0010	0.2506
A15	0.0457	-0.0312	0.0648	1	0.0699	0.0651
A16	0.0665	0.0089	0.1027	1	0.1573	0.0056
B1	-0.0202	0.0181	0.0274	2	0.0004	0.0007
B2	-0.0298	-0.0250	0.0225	2	0.0044	0.0062
B3	0.0955	0.0266	0.4845	1	0.7168	0.1108
B4	-0.0398	0.0341	0.2793	2	0.2562	0.3757
B5	-0.0031	-0.0333	0.1596	2	0.0022	0.5022
B6	-0.0921	0.0289	0.0115	1	0.0082	0.0016
B7	-0.1145	0.0403	0.0151	1	0.0117	0.0029

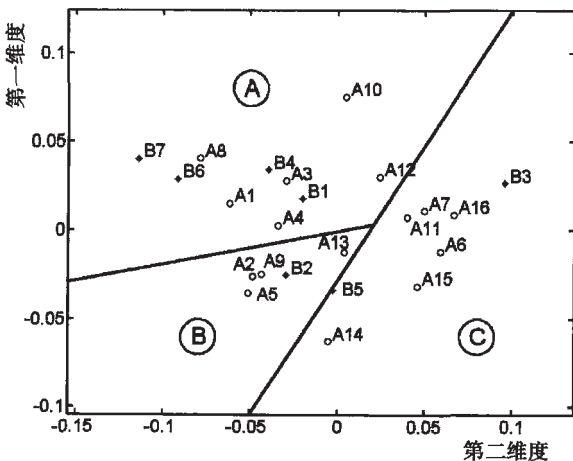


图 5 样本与指标的对应分析图
Fig. 5 The correspondence of specimens with indices

由表 2 和图 5 可以看出，在 16 个样本中，样本 10 和 16 对总特征根的贡献最大（这可能与这两个样本处于滑动周界附近有关），7 个指标中的 B3（分布密度）、B4（水溶液包裹体均一温度）、B5（CO₂-H₂O 包裹体均一温度）对总特征根的贡献较大，各个类别（样品和指标在 4 个象限中的分布关系）不是分得很开，从 3 类样品的分布可以看出，A、B、C 3 类在对应分析图中依次出现，两个维度与 3 类样品具有很好的相关关系。

就 7 个指标与 16 个样品的相关关系来说，x₁

（FIP 张开度）、x₂（FIP 粗糙度系数）、x₄（水溶液包裹体均一温度）、x₅（CO₂-H₂O 包裹体均一温度）与各样品的关系比其他指标更为密切，这与前面指标聚类的结果基本一致。CO₂-H₂O 包裹体均一温度更为重要，说明滑坡过程对包裹体流体成分与均一温度都会产生较大影响。由于 x₂ 和 x₅（尤其是 x₅）在聚类分析和对应图中具有重要地位，实际测定过程中要特别注意 FIP 粗糙度系数和 CO₂-H₂O 包裹体均一温度（尤其是后者）的测定。FIP 张开度和粗糙度系数可在现场方便获得、包裹体均一温度也可在实验室使用显微测温等技术较快获得，因此，通过室内外测定 FIP 参数及其变化将为分析与预测岩体滑坡提供一种具有良好应用前景的方法。

2.3 使用流体包裹体参数确定岩体滑坡周界过程

对于指定岩体边坡，根据上述 FIP 特征参数和包裹体热力学参数的类别分析与对应分析结果，可以得到使用流体包裹体方法确定岩体滑坡周界的一般过程：

(1) 在现场选择多个位置定向采集流体包裹体样本。

(2) 在室内测定流体包裹体 7 个指标，测定时特别注意 FIP 粗糙度系数和 CO₂-H₂O 包裹体均一温度（尤其是后者）的准确测定。

(3) 对各样品及其相应指标进行样本聚类成 3 类, 根据样品高程位置由高到低分别称为 A、B、C 类, B 类所在位置连线即为可能滑坡周界; 也可将全部样本聚类成两类, 将两类分界线作为可能滑坡周界。

(4) 根据各样品及其指标聚类与对应分析, 研究与滑坡有关的主要微观指标及其变化, 对滑坡发生时间和多次滑动的可能性进行动态预报。

3 结 语

(1) 本文提出了确定岩体滑坡周界的微观分析方法-流体包裹体方法, 分析参数是流体包裹体迹面特征参数(包括张开度、粗糙度系数和分布密度)和包裹体热动力学参数(包括水溶液包裹体和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体的均一温度和流体密度), 分析方法为样品聚类和对对应分析结果的综合评判。

(2) 使用流体包裹体方法确定岩体滑坡周界时, 流体包裹体参数中要特别注意流体包裹体迹面粗糙度系数和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体均一温度(尤其是后者)的测定, 确定样品类型时建议采用类平均法、取类间样品对标准化均方根距离增加率小于 0.20 的前一聚类数作为类别数。

(3) 根据样品聚类类型分布与滑坡周界的一致性可将样品聚类结果进行岩体滑坡周界的大致划分、再根据对应分析结果综合确定。

(4) 确定岩体滑坡周界的流体包裹体方法将从微观方面为有关自然灾害问题的分析研究开辟一条新途径。

感谢: 白鹤岭边坡岩体流体包裹体测定资料由上海同济大学地下建筑与工程系刘斌教授提供, 特此感谢。

参 考 文 献

- [1] Furian S, Barbiero L, Boulet R. Organisation of the soil mantle in tropical southeastern Brazil (Serra do Mar) in relation to landslides processes[J]. Catena, 1999, 38: 65-83
- [2] 兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测[J]. 科学通报, 2003, 48 (5): 507-512 (Lan Hengxing, Wu Faquan, Zhou Chenghu, et al. Spatially analysis and prediction of landslide hazard in rainfall using GIS technology [J]. Science Bulletin, 2003, 48 (5): 507-512 (in Chinese))
- [3] Casagli N, Ermini L, Rosati G. Determining grain sized distribution

of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: sampling and processing methods[J]. Engineering Geology, 2003, 69: 83-97

- [4] Busoni E, Sanchis P S, Calzolari C, et al. Mass movement and erosion hazard patterns by multivariate analysis of landscape integrated data: the Upper Orcia River Valley (Siena, Italy) case [J]. Catena, 1995, 25:169-185
- [5] 张布荣. 倾倒型岩石边坡工程加固的研究[J]. 土木工程学报, 1995, 28 (5): 70-75 (Zhang Burong. Study on strengthening technique for topping rock slope[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(5): 70-75 (in Chinese))
- [6] 张强勇, 向文, 朱维申, 等. 三维损伤岩锚支护模型在深圳大南山山体滑坡治理工程中的应用 [J]. 土木工程学报, 2005, 38 (4): 116-119 (Zhang Qiangyong, Xiang Wen, Zhu Weishen, et al. 3-D damage rock-bolt reinforcing model with application in Dananshan landslide prevention of Shenzhen [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38 (4): 116-119 (in Chinese))
- [7] Hodgkins M A, Stewart K G. The use of fluid inclusions in Costrain fault zone pressure, temperature and kinematic history: an example from the Alpi Apuane [J]. Italy. J. Struct. Geol., 1994, 16: 85-96
- [8] Vrdijk P. Tectonically driven fluid flow in the Kodiak accretionary complex [J]. Alaska Geology, 1987, 15: 466-469
- [9] 杨巍然, 张文淮. 断裂性质与流体包裹体组合特征 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1996, 21(3): 285-290 (Yang Weiran, Zhang Wenhui. Character of fault property and combination of fluid inclusions [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1996, 21 (3): 285-290 (in Chinese))
- [10] 林为人, 铃木舜一, 高桥学, 等. 稻田花岗岩中的流体包裹体及其导致高温条件下微小裂缝的形成 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (6): 899-904 (Lin Weiren, Shunnichi S, Manabu T, et al. Fluid inclusions and microcracking in Inada granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (6): 899-904 (in Chinese))
- [11] Boullier A M, France-Lanord C D, Adamy J, et al. Linked fluid and tectonic evolution in the High Himalaya mountains (Nepal) [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1991, 107: 358-372
- [12] Srivastava D C, Engelder T. Fluid evolution history of brittle-ductile shear zones in the hanging wall of Yellow Spring Thrust, Valley and Ridge Province, Pennsylvania [J]. U. S. A. Tectonophysics, 1991, 198: 23-34
- [13] 高惠璇. 应用多元统计分析 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005 (Gao Huixuan. Applications of multivariate statistics [M]. Beijing: Beijing University Press, 2005 (in Chinese))