

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0517-06

雷达图像中的转换构造信息及其应用

石火生¹, 林 瑋², 王长林³

(1. 南京大学 地球科学系, 南京 210093;

2. 香港中文大学 地球信息科学联合实验室, 香港;

3. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 低序次断裂是地壳变形的直接产物, 具有丰富的构造变形信息。经过转换的低序次构造, 形式多样, 图案复杂, 是构造研究的重要对象, 也是地表稳定性研究的重要基础。利用香港地区航空雷达图像资料, 提取其中低序次构造的弱信息, 建立转换变形模型, 以分析区内不稳定地表的构造背景。区内北东向断裂是主要构造, 其右行剪切形成一系列低序次 R 面、 P 面、 R' 面构造, 在雷达图像上表现为线性弱信息并且与微地貌发育有关。利用线性构造增强、提取技术和低序次构造组合分析方法, 结合野外地质调查, 确定马鞍山地区 EW 向的张性破裂是 NE 向张剪断裂的转换, 是造成马鞍山滑坡的重要地质因素。

关键词: 雷达地质; 低序次断裂; 转换构造; 地表稳定性

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 研究背景

1.1 区域地质及地表稳定性研究

香港位于华夏地块南东缘(华南活动大陆边缘), 横跨莲花山断裂带。莲花山断裂构造带呈北东向展布, 是中国东南部的区域性构造, 属于丽水-政和大埔深断裂带的西南端, 可追踪长度逾 400km。该断裂带的两个亚带分布于莲花山脉两侧, 大致平行, 相距 20—40km。近年来的研究认为, 莲花山断裂带是具有韧性剪切特征的深断裂带, 自中生代以来, 断裂的应力状态具有从挤压到剪切拉张的演化规律, 相应的产生压性韧性脆性的变形作用特征。包括香港在内的中国东南部地区广泛分布的晚侏罗到早白垩纪火山岩系, 是活动大陆边缘的物质记录, 反映了地体碰撞拼贴的地质背景。莲花山断裂带就是太古界地体和元古界地体的碰撞缝合带, 是中国东部重要的控岩、控矿构造带。利用重力资料对香港地区进行的深部构造研究, 得知地表约 5km 之下, 就有代表太古界地壳和元古界地壳的特征岩石存在^[1], 表现出地体碰撞带混杂带的深部岩石构造

特征。

港九地块自晚中生代至早第三纪以来, 以持续稳定上升为主, 其活动性明显低于周边相对下沉的中新生代盆地^[1-4]。全区的构造地貌特征明显, 在断坡和断崖带附近, 地表不稳定因素大量存在。再加上花岗岩火山岩抗风化能力强弱不均、坡积物不易固结以及暴雨袭击等原因, 极易导致滑坡和山泥倾泻事件发生。利用雷达遥感技术研究香港地区的滑坡和山泥倾泻, 旨在利用雷达对低序次线性构造的探测能力^[5], 低序次构造规模小但数量多, 在雷达图像上表现为线性弱信息。这种线性信息在构造地貌演化分析中极为重要, 可在中小尺度上反复验证破裂构造组合关系; 在 GIS 的支持下还可以数字化, 即实现定量。本文利用香港的航空雷达图像资料, 小范围内对线性弱信息所反映的低序次构造进行分析, 以探索滑坡产生的构造机制, 为预测滑坡产生的潜在区域提供资料。

1.2 研究区断裂

香港地区北侧边界为深圳断裂, 南侧为海丰断裂, 这两条主干断裂呈北东展布, 左行剪切, 并导致

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 香港政府研究资助委员会(RGC)和工业署(ISF)资助项目(CUHK4334/98E, AF/169/98), 国家自然科学基金重点项目(编号49989001)资助。

作者简介: 石火生(1950—), 男, 南京大学地球科学系博士, 副教授, 长期从事雷达地质的教学和科研工作, 已发表论文 30 多篇。E-mail: hssh@nju.edu.cn

香港地区的 3 套断裂系统:北东向的区域断裂;北东东到东方向的断裂系统;次级的北西向断裂系统。这 3 组断裂控制了香港地区的构造地貌系统,在雷达图像上清晰地表现出岩块的破裂程度和断裂配套格局。

2 研究区雷达图像

本文主要利用香港地区机载 L-SAR 航空雷达图像,该数据由中国科学院于 1998-09-18 和 1998-09-19 获取,采用国产雷达系统。研究过程中还使用了香港地区其它遥感资料,如香港地区的 TM 图像和局部的航摄图像。香港地区 L-SAR 航空雷达图像参数如表 1。

表 1 香港地区机载雷达 L-SAR 图像参数表

Table 1 The parameters of airborne L-SAR image of Hong Kong

飞行日期	1998-09-18	1998-09-19
雷达波段	L	L
发射极化方式	H	H
接收极化方式	H	H
像元大小/m	6.25 × 6.25	6.25 × 6.25
飞行高度/m	8400	8400

2.1 香港地区的雷达图像特征

香港地区构造地貌特征明显,在香港机载雷达图像上可直接识别出控制地貌发育的主要构造,如海岸形态、山脉走势反映的北东向走滑构造及与其相关的北西向构造;次级地貌如港湾位置、沟谷方位反映基岩的次级变形构造形态。在新界东部包括马鞍山地区,雷达图像上有较丰富的低序次断裂显示,这种变形构造细节反映了构造变形的复杂性,有利于合理解释构造地貌的形成机制和发育规律。从香港雷达图像中提取代表低序次构造的弱信息,追踪低序次构造的分布方式,建立构造转换模型,从而分析微地貌滑坡的构造因素。

2.2 雷达图像处理

如上所述,雷达图像纹理信息丰富,可以较好的揭示线性构造特征^[6]。但 SAR 图像具有明显的斑点噪声,必需对图像进行滤波处理。在分析和比较了几种去噪声滤波方法以后,选择效果比较好的 K-均值自适应滤波。用于研究的基础图像中,还包括雷达图像与 TM 影像的复合图像,主要考虑到二者

获取地物波谱特征信息的波段范围及方式不同,在揭示地物电磁波谱特征方面有很大差异,只有将这两种表征地物不同波谱特征的信息源复合起来,相互补充,才可以最大限度地揭示地物特征,较好地反映低序次构造信息。为了把单波段 SAR 影像和多光谱彩色合成影像复合起来,我们用 TM3、4、5 这 3 个波段彩色合成,进行 IHS 变换,然后用滤波后的 SAR 影像代替 I 分量,作反 IHS 变换;再用 TM3、4、5 和 SAR 作 KL 变换,最后将反 IHS 变换得到的 G 分量、TM4 影像和 KL 变换的第一主分量进行彩色合成,得到最后的结果^[7]。对比结果影像,我们认为低序次信息得到了相当程序的加强,雷达和多光谱影像的特征都得到了体现,大大方便了地质解译。

在香港马鞍山地区的研究中,对该区的航空雷达图像作了多种处理,其中线性构造提取结果还重点配合了野外的验证,具有构造意义的断裂在图像上均有较好的反映。在马鞍山村北,陡坡上的隐伏断裂是首次为雷达遥感所探明,野外 GPS 定点,证实其与马鞍山滑坡有成因上的联系。该区主要的断裂构造见图 1。马鞍山地区有多处滑坡,它们与人工开挖有一定的关系,但主要是与基底的断裂构造有密不可分的联系,尤其与次级的转换构造有关。野外调查过程中多处发现有转换拉伸构造(Trans-tension)存在(图 2),因此,分析转换拉伸构造的成因,确定转换拉伸构造的分布区,乃是寻找潜在滑坡区的重要手段之一。

3 转换构造特征

3.1 R-P 构造分析

构造转换的基础是岩石在外力作用下产生原生的破裂,这些原生破裂规模小,方位不一,有固定的组合关系,为低序次破裂,在雷达图像上呈现弱信息。这种低序次破裂有两个重要特征:在持续变形过程中改变形态和方位,成为转换构造;在重力作用下,可影响覆盖物(如坡积物)中次生裂面的形成方位。

一般而言,外力作用下,伴随走滑断层运动过程中产生的低序次构造主要有 R 剪切面、R' 剪切面、P 剪切面。R 剪切面与走滑主剪面 Y 夹角为很小的锐角 α_1 (α_1 等于岩石内摩擦角 φ 值的一半,角度在 8° — 20° 之间),其指向为本盘运动方向。R 面为剪切裂面的断层或节理,它的旋向与主断面旋向相同,为同旋向剪面。R 面在右行主走滑断裂带中呈左列分

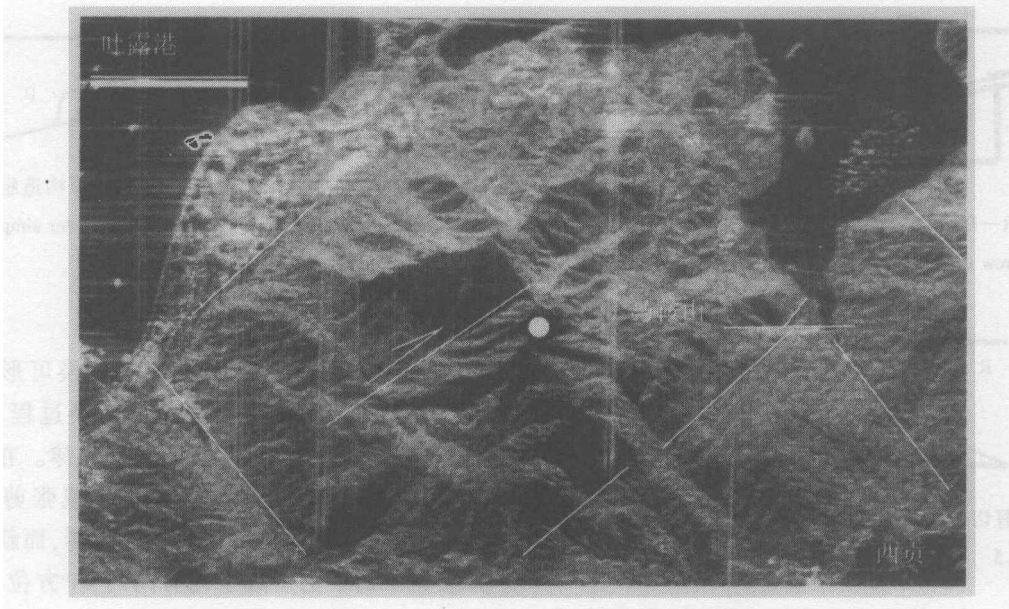


图 1 新界地区机载雷达图像及断裂构造分布图(线条比例 2000m)

Fig. 1 Distribution of main faults in the radar image of New Territories of HongKong (Scale Bar is 2000 m)

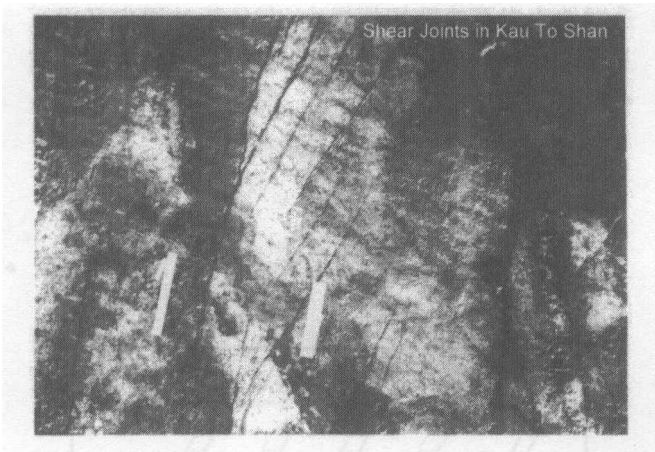


图 2 剪切带中的转换剪切破裂

Fig. 2 Trans-tension shear planes in shear zone

布;在左行主走滑断裂带中呈右列分布^[9]。R'剪切面与走滑主剪面 Y 夹角为较大的锐角 $\alpha_2 (\alpha_2 = 90^\circ - \varphi/2)$, 锐角指向本盘运动方向。R'面剪切旋向与主剪面 Y 旋向相反, 为反旋向剪面, 形成断层或者剪节理。R'面在右行走走滑断裂带中呈左列分布;在左行走走滑断裂带中呈右列分布。R'面与 R 面是次级应力场的一对共轭剪面。P 剪切面与 Y 面夹小锐角 $\beta_1 (\beta_1 = \varphi/2)$, 锐角指向对盘运动的方向。P 面为断层或剪节理, 旋向与 Y 面相同, 为同旋向剪面。P 面在右行走走滑断裂带中呈右列分布;在左行走走滑断裂带中呈左列分布。在香港的机载雷达图像上, 多处有低序次断裂构造的分布, 在城门水塘

左下侧, 即有北西向左行剪面 R' 分布。

R—P 面构造组合在脆性和韧性变形条件下均可产生, 并具有大、中、小各种尺度的构造意义, 例如, 根据 R 面在变形过程中的扩张机制来解释岩浆侵入的空间问题 (Tikoof, B., 1992); 根据 R 面的扩容机制和分布规律分析储矿构造、寻找矿体的分布部位等。在脆性条件下, R、P 面常常与其它构造面, 如 T 面共同出现 (图 3, P 面和剪切带夹角 15° , 动向和剪切带相同, 具压剪性质。R 面动向也和剪切带相同, 但具张剪性质。T 面目前处于张扭位置)。并且在 R 面和 P 面的交会处组成菱形体, 在剪空区有方解石晶体平行 P 面生长而与 R 面斜交 (图 4)。

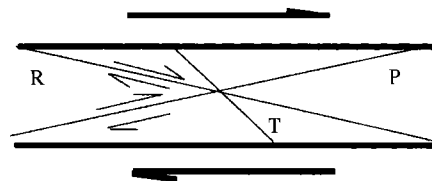


图 3 R、P、T 面分布方位示意

Fig. 3 Distribution of sub-shear planes R, P, T

图 5 是剪切带中另一种常见的 R、P 面匹配, 它们分布位置确切, 各具鲜明的构造特性, 可追踪其发育过程。在持续变形条件下, P 面逐渐向主剪切面靠拢; R 面则可改变方位或形成变形体 (有充填物。)

利用局部应力椭球体对 R—P 构造形成机制进行分析: P 面方位上的压应力值 σ_{PN} 明显的比 R 面上

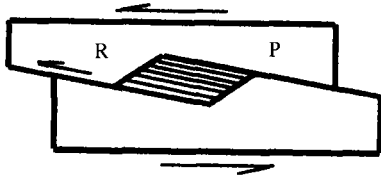


图 4 R—P 组合构造中纤维晶体的生长方向

Fig.4 Grow direction of crystal fiber in R-P structure

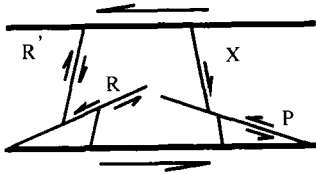


图 5 剪切带中的 R 面, P 面分布方位及动向

Fig.5 Move direction of R and P planes

的压应力值 σ_{RN} 大,甚至在 R 面上还可能出现张应力,在低的压应力或张应力面上,就可以形成具张性特征的构造(图 6)。

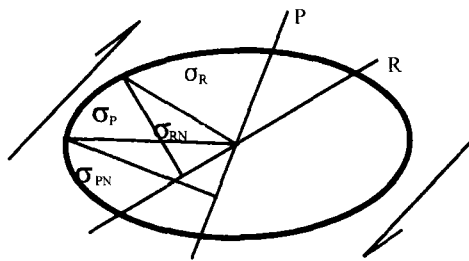


图 6 剪切作用的局部应力椭球体

Fig.6 Local strain ellipse under shearing

3.2 低序次破裂的转换机制

在持续变形的条件下,低序次破裂面通过形态和方位的改变释放应力,形成转换拉伸断裂构造(Trans-tension Faults)和转换挤压断裂构造(Trans-pressure Faults)。对于不同方位的低序次破裂,所形成的转换构造在性质上有很大的差别(图 7)。在持续单剪作用下,R 面转换为小型拉分构造,而 P 面则转换为挤压破裂构造。在雷达图像上,它们的纹理特征截然不同,前者表现为规则的直角相切纹理,后者则表现为弯曲的拖曳状纹理。对地貌的控制上,前者因应力释放点集中,表现为陡坡深谷;后者由于应力释放点散布,表现为低丘斜谷。造成的地表均衡过程,前者是通过崩落或坠落滑坡,后者通过蠕移或山泥倾斜。



图 7 单剪作用下形成的 R、P 面构造组合

Fig.7 Combination of R-P structure under simple shear

3.3 剪张破裂迁移和方位转换

在持续剪切作用下,T 面的转换可形成典型的雁行张裂(图 8),图 8 中所示的转换过程,清楚的表明了 T 面的形成过程和破裂迁移规律。在右行单剪作用下,同剪向约 45°方位首先形成张剪破裂 T 面 1;在持续剪切作用下,该破裂面右转,而新形成的张剪破裂 T 面 2 仍形成于同剪向约 45°方位;通过这样的旋转和迁移,最终形成雁行张裂。在适宜的条件下,R 面也有这样的演化过程,图 2 乃是 R 面方位的旋转构造。剪张破裂迁移和方位转换是构造研究的重要内容,可获取持续变形的构造信息。同时,该构造对地表岩石的破坏性极大,在分析过程中又因其具隐蔽性而极易忽略或误解,因此在滑坡构造研究中要特别注意。

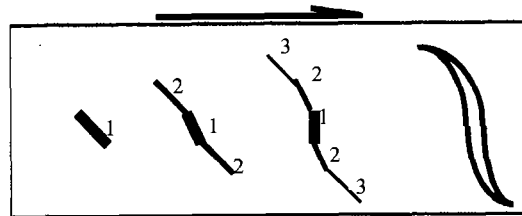
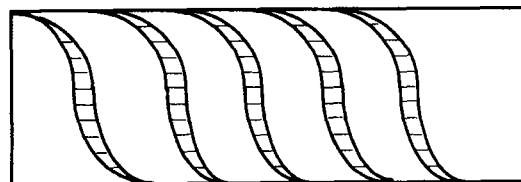


图 8 剪张破裂的方位转换

Fig.8 Transformation of tensional shear planes



3.4 转换构造对地表稳定性的影响

如前所述,转换构造是在持续变形作用下,原生破裂构造在形态、方位和性质上改变而形成的一种构造。这种构造不仅可以改变基岩的破坏崩解方式,同时在重力作用下,对基岩表面覆盖物中残余节理(Reduct-joint)的形成也有重要的制约作用。当岩

层中存在倾角大于 20° ,落差大于10m的断层时,就极易导致岩层和地表的移动。马鞍山地区的转换断裂构造主要是受北东向和北西向断裂的影响,尤其是在北东向断裂的左行作用下,R面方位的转换拉伸面迁移变形,形成NEE和EW方向上的转换剪张断裂,导致3处山坡下滑。该地区雷达图像较好地显示了滑坡体后缘的断裂构造,是分析3处滑坡之间的关系的重要信息提示。同时,该地区雷达图像对隐伏的断裂构造也有较好地显示,该点位置 $22^\circ 24' 15.3''N, 114^\circ 14' 44.4''E$;标高为290m;为滑坡体后缘断裂构造在延伸部位被茅草和坡积物覆盖的部分,是分析滑坡成因和完善转换构造系统的重要证据之一。

4 结论

(1)香港马鞍山地区的雷达图像提供了丰富的转换断裂构造信息,是研究本区地表稳定性不可缺少的资料。和香港其它地区一样,本区岩石的脆性弯曲变形不明显,没有低角度的断层发育,因此变形在平面上的特征比较明显。加上雷达波对线性构造的探测能力,使得R剪面、P剪面和R'剪面等低序次构造破裂面,以及与它们有关的转换破裂构造被雷达波记录的可能性增强。从图像分析获取的NEE向转换剪张断裂和EW向转换剪张断裂,是分析3处滑坡之间关系的重要信息提示。同时,雷达图像所揭示的隐伏断裂构造是分析滑坡成因和完善转换构造系统的重要证据之一。

(2)转换断裂构造一般规模较小,在雷达图像上示为弱信息。但通过图像处理而获取的低序次转换构造线性影像,绝大部分具有构造意义,可大大地避免构造分析误差。弱信息处理保留了原图像上主干断裂构造的特征,增强了低序次破裂构造和转换构造的特征,使得雷达图像构造解译的系统性加强,并有利于破裂理论的合理应用。野外调查验证,本区的3处主要滑坡均与转换剪张断裂有关,坡底的人工开采只是导致山坡提前下滑而已。

(3)研究区沟多、坡陡,基岩露头相对较多,坡积物厚度相对较小,因此微地貌所反映的坡度变化或地表高度变化,基本上与低序次构造剪面的分布方位吻合。马鞍山村附近坡积物相对较厚,是早期NE向断裂作用下在谷口堆积的山泥倾泻物,马鞍山村部分屋宇就坐落在坡积物之上。受基岩的影响,坡积物中隐约呈现NEE向残余节理,因此该处的滑坡

堆积体再次倾滑的可能性极大。

(4)按转换构造的分布方式,区域上 $N45E$ 度方向为主干走滑剪切断层,则 $N60E$ 右行剪切面位于R面方位, $N60E$ 也就是R面的迁移方位,EW方向上的转换剪张断裂是由R面转换而成。这样,从 $N60E$ 到EW再到 $N60E$ 就组成转换拉伸破裂构造的整体,其中EW向延伸部分的拉分量要大于 $N60E$ 方向的拉分量。

(5)一般而言,转换拉分构造对岩石的破坏是块状的,规模大的可形成拉分盆地或是深谷,规模小的则导致山坡下滑或岩块崩落。就马鞍山地区来讲,转换拉分构造主要是导致山坡下滑和岩块崩落,这一点已得到证实。早期山泥倾泻堆积体固结较差,在暴雨作用下主要还是产生山泥倾泻,但固结较好的以及存在残余节理的地方,不排除产生块体崩落的可能。

致谢 研究工作得到中国科学院遥感应用研究所郭华东教授和邵芸教授的支持和帮助,并赴现场协助和指导工作。参加野外考察的还有中国科学院遥感应用研究所廖静娟博士和王心源博士。香港中文大学地球信息科学联合实验室 Mr. Tam Yiu Ming, Eugene 协助野外, Ms. Ngan Ngan, Amy 协助室内工作。一并致谢!

参考文献 (References)

- [1] Fletcher C J M, Campbell S D G, Carruthers R M, et al. Regional Tectonic setting of Hong Kong: Implications of New Gravity Models [J]. *Journal of Geological Society, London*, 1997, 154: 1021—1030.
- [2] Bennet J D. Review of Tectonic History, Structure and Metamorphism of Hong Kong [J]. *Geotechnical Control Office*, 1984.
- [3] Y. Z. Ding, K W Lai. Neotectonic Fault Activity in Hong Kong: Evidence from Seismic Events and Thermoluminescence Dating of Fault Gouge [J]. *Journal of the geological society, London*, 1997, 154: 1001—1007.
- [4] Lee C F, Chen H. Landslide in Hong Kong: Causes and Prevention [J]. *Acta Geographica*, 1997, 52(Supplement): 114—121. [李焯芬, 陈虹. 香港滑坡泥石流成因及治理 [J]. 地理学报, 1997, 52(增刊): 114—121]
- [5] Guo Huadong. SAR Image Analysis and Its Geology Application [C]. Beijing: Science Press, 1991. [郭华东. 雷达图像分析及地质应用 [C]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [6] Chen Shupeng et al. Mechanical Study of Remote Sensing Information [M]. Beijing: Science Press, 1998. [陈述彭等. 遥感信息机理研究 [M]. 科学出版社, 1998.]
- [7] Pan Xizhe. SAR Image Procession [M]. Beijing: Science Press,

1996. [潘习哲, 星载 SAR 图像处理[M]. 科学出版社, 1996.]
- [8] Batlett W L, Friedman M, Logan J M. Experimental Folding and Faulting of Rocks under Confining Pressure [J]. *Tectonophysics*, 1981, **79**: 255—277.
- [9] Shi Huosheng *et al.* Study of Transformed Structures by SAR Image in East Shandong Area[J]. *Journal of Nanjing University*, 1996, **32**: (3). [石火生等. 胶东地区星载 SAR 图像的转换构造研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1996, **32**: (3).]

The Information of Transformed Structures in Radar Image and Its Application

SHI Huo-sheng¹, LIN Hui², WANG Chang-lin³

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Joint Laboratory for Geoinformation Science, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, N. T., Hong Kong, China;

3. Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101; China)

Abstract: Subordinate fault is the direct production of crust deformation, It has rich information of structure deformation. The forming and evolution of subordinate fault can lead to break up of the rocks and speed up the weathering of the rocks. Transformed subordinate faults have many types and are of complex patterns, they are important subject of structure study, and also they are the important study base of ground surface stability. In this paper, we use the airborne L-SAR image of Hong Kong, and select the weak-information of subordinate faults by processing the image, set up the model of transform deformation, in order to analyze the structure background of unstability ground surface of study area. The NE faults are the main faults in study area, their dextral movement formed a series of subordinate shear plane R , P , R' and related transformed faults. They are represented as weak information of lineation in radar image and related to the development of micro-geography. By selecting and enhancing the weak information, we made the deformation frame of subordinate faults. Together with field investigation, we found that there are EW and NEE trans-tension faults in Ma-An-Shan area, and the EW faults are the transformed faults of NEE faults. Most of these faults are related to the landslide, and are the main geological factors of Ma-An-Shan landslide.

Key words: radar geology; subordinate faults; transformed structures; stability of ground surface