

张海涛, 程新文, 陈性义, 等. 基于ICA/MNF变换的高分影像滑坡灾害检测方法研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 193-197. [Zhang Haitao, Cheng Xinwen, Chen Xingyi, et al. Research on the Landslide Disaster Detection Method of High Resolution Remote Sensing Image based on ICA/MNF [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 193-197.]

基于ICA/MNF变换的高分影像滑坡 灾害检测方法研究^{*}

张海涛, 程新文, 陈性义, 陈联君, 常亚洲, 马海荣

(中国地质大学(武汉)信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 快速准确地从灾后影像中提取出受灾区域对于灾后救援具有重要意义。鉴于现有提取方法过度依赖滑坡在影像中的光学、纹理等特征的问题, 研究了一种结合独立成分分析(ICA)与最小噪声比率变换(MNF)的变化检测方法, 以单一时相的影像为基础, 运用基于负熵最大化的Fast-ICA算法分离出两个时相影像相互正交的独立成分, 并构建对应独立成分的差异影像, 最后用最小噪声比率变换实现分布于各个差异影像上变化信息的集中, 应用直方图阈值法得到了最终的滑坡灾害信息。选取了滑坡灾害前后两时相的高分辨率遥感影像数据进行实验, 结果证实了方法的可行性。

关键词: 滑坡; 独立成分分析; 最小噪声比率变换; 负熵; 差异影像; 直方图阈值

中图分类号: P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)01-0193-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.036

近年来, 由于地震、滑坡、泥石流等地质灾害频发, 给人民带来了巨大的经济损失和人员伤亡, 比较典型的有2008年汶川8.0级地震及其引发的滑坡、泥石流等次生灾害造成约6.9万多人遇难和1.7万多人失踪, 2010年舟曲泥石流造成上千人死亡和数百人失踪。因此, 灾害发生后, 如何快速地获取灾害发生的位置及范围是实现减灾的关键。随着遥感技术的发展, 遥感影像呈现出成像速度快、覆盖范围广、高空间分辨率及高时间采集频率等特点^[1]。因此, 如何从遥感影像中快速准确地检测出灾害信息对于减灾具有非常重要的应用价值。

近年来, 相关学者提出了许多利用遥感影像提取滑坡等灾害信息的方法。李松^[2]等基于滑坡的地质原理, 结合多时相遥感影像的纹理信息, 利用比率变换方法实现了灾害的自动提取。赵祥^[3]等深入分析了滑坡灾害在遥感影像和SAR数据中的特征, 从理论上论证了方法的可行性。陈莹^[4]等结合灾前光学影像和灾后SAR数据, 分别利用NDWI指数和水体在SAR影像上的特性提取了河道以及河道变化信息, 经过去噪、膨胀等处理提取到了滑坡区域。鲁学军^[5]等基于高分影像及灾前灾后的DEM数据, 探讨了滑坡灾害的1维、2维和3维三种遥感解析方法, 并建立了滑坡多维

遥感解译方法体系。现有的方法大都是基于滑坡及其要素独特的地貌特征进行提取的, 过度依赖于滑坡在影像上的色彩、纹理等光学特征。

基于以上考虑, 本文基于灾前灾后两个时相的高分影像数据, 利用负熵最大化的Fast-ICA算法实现了两个时相数据的独立成分分离, 并构建相应独立成分的差异影像, 在对差异影像进行最小噪声比率变换(Minimum Noise Fraction Transformation, MNF)实现了变化信息的集中后, 又以MNF结果变量的直方图为依据获取了变化阈值, 经数学形态学后续处理并矢量化, 得到了最终的灾害区域。算法简单, 易于实现, 不仅解决了上述问题, 还避免了数据冗余及后续变化信息集中的难题。

1 算法描述

1.1 基于负熵最大化的Fast-ICA算法

独立成分分析方法(Independent Component Analysis, ICA)是近年来发展起来的一种盲源分离算法^[6-7], 其基本原理是根据信号的统计特征, 在仅有的观测数据(信号与噪声的混合体)中分离出相

^{*} 收稿日期: 2014-06-11 修回日期: 2014-07-18

基金项目: “高分辨率对地观测重大专项”(07-Y30A05-9001-12/13)

作者简介: 张海涛(1987-), 男, 河南长垣人, 博士研究生, 研究领域为高分辨率遥感影像信息提取及应用研究。

E-mail: zht_410728@126.com

互独立的源信号,进而由独立信息进行后续的数据处理,避免了数据冗余。

假设 n 维观测信息 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 和相互统计独立的 m 维($n \geq m$) 源信息 $S = [s_1, s_2, \dots, s_m]$ 之间存在如下线性关系:

$$X = AS, \quad (1)$$

且 S 中至多有一个符合高斯分布的。独立成分分析法是从寻优的角度出发^[8-9],通过一个合适的目标函数和优化算法,在混合矩阵 A 和源信号 S 未知的情况下,仅利用源信号统计独立与观测信号 X 这一假设,寻得最优的一个解混矩阵 W ,使得

$$Y = W^T X, \quad (2)$$

成为对源信号 S 的最佳估计。

负熵是一种量度随机变量非高斯性的有效工具^[10-11],收敛速度较快,其近似表达式为

$$J(y) \propto [E(G(y)) - E(G(v))]^2. \quad (3)$$

式中:假设变量 y 具有零均值和单位方差, v 为零均值单位方差的高斯变量。函数 G 为非二次函数,取为

$$G(x) = -\exp(-x^2/2). \quad (4)$$

将式(2)代入式(3),则有

$$J(W) \propto [E(G(W^T x))]^2, \quad (5)$$

即只要寻得最佳的 w ,即可得到负熵函数 $J(W)$ 取得最大值。牛顿法求解得到最优解的 Fast-ICA 算法迭代模型为

$$W = E(xg(W^T x)) \Leftrightarrow$$

$$(1 + \alpha)W = E(xg(W^T x)) + \alpha W. \quad (6)$$

按照 Kuhn-Tucker 条件,在 $E((W^T x)^2) = \|W\|^2 = 1$ 的约束条件下,则 $E(G(W^T x))$ 的最优值点(即负熵最大)将在点

$$E(xg(W^T x)) + \beta W = 0 \quad (7)$$

处取得。对其进行近似牛顿迭代处理,则式(6)的简化模型为:

$$W^+ = E(xg(W^T x)) - E(g(W^T x))W. \quad (8)$$

对其进行迭代,直至收敛即可得到解混矩阵 W 。

1.2 MNF 变换原理

最小噪声比率变换(Minimum Noise Fraction Transformation, MNF)以信噪比最大化为变换准则^[12-13],以上述基于 ICA 方法对应各独立成分构成的差异影像为输入数据进行线性变换,对分散在各个差异影像中包含的变化信息进行重组转换,使其集中分布到前几个变量中,得到一组新的差异影像,而在新影像中包含的变化信息按照信噪比依序减少,甚至于第一差异影像中包含绝大部分的变化信息。MNF 变换具有正交性与线性不变性,新的结果影像不影响原始差异影像中包含的变化信息。

MNF 变换的数学模型为

$$Z(x) = \alpha^T Y(x), \quad (9)$$

即对各差异影像 $Y(x)$ 进行线性变换,得到一组包含变化信息依次减少的结果影像 $Z(x)$ 。MNF 变换的流程如下:

(1) 构造噪声影像 N ;

(2) 分别计算影像和噪声影像的协方差矩阵 Σ 、 Σ_N ;

(3) 求解广义特征方程 $\Sigma a = \lambda \Sigma_N a$,其中特征向量 a 和特征值 λ 为待求值;

(4) 按特征值由大到小排序对应的各个特征向量,代入式(9)得到 MNF 结果影像。

1.3 变化信息提取准则

灾害信息的提取采用阈值法。在差异影像中,像元值有正值和负值,表现为两时相影像之间的增加或减少。像元值越接近于 0,说明对应位置上两时相之间的差异越小,即发生变化的可能性不大;如果像元值越远离 0,则说明对应位置上两时相之间的差异很大,即极有可能对应位置发生了变化,在影像上表现为很亮或很暗^[14]。故只要找到一个适合的阈值,将像元值大于该阈值的像元提取出来,即为检测到的变化区域。

阈值选择的好坏将会直接影像到灾害检测的精度,本文根据差异影像直方图信息进行变化阈值的选取。由于在差异影像中大量存在的是变化与非变化两类像元,而介于两类之间的过渡像元很少,即直方图会存在双峰且二者呈陡状分布,因此,差异影像直方图中双峰之间的陡变点即为寻找的最优阈值。

算法流程如图 1 所示。

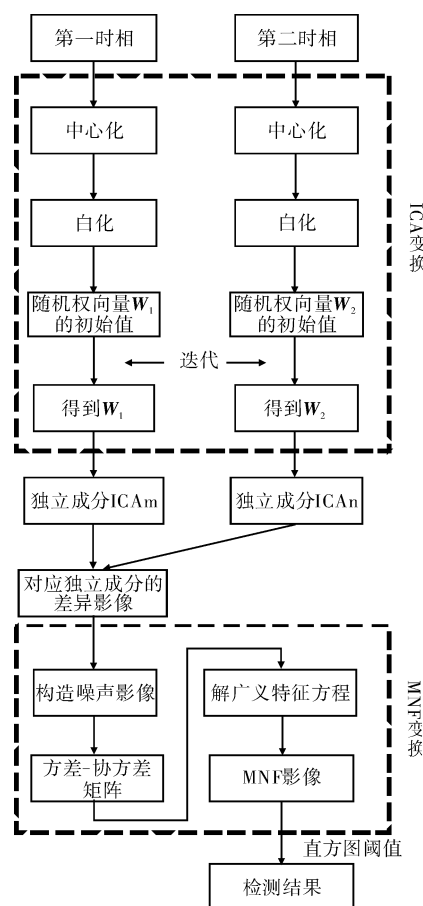


图1 算法流程图

2 实验结果与分析

基于上述原理选取三处滑坡灾害进行了实验。实验中先用 Fast-ICA 算法分别计算了两时相影像的独立成分,并依次求取了对应各独立成分的差异影像,之后借助 MNF 变换实现了三幅差异影像的变化信息的集中,并结合直方图阈值信息得到了最终的结果图。

从 QuickBird 影像中裁剪了三个实验区,共有三个波段,实验区位于新疆某地,该处地质灾害频发,常有滑坡、泥石流等典型地质灾害,灾害目视特征较为明显。

实验一数据大小为 289×300 个像元,时间分别为 3 月份和 6 月份,由原始影像上(图 2)可以看出,第一时相数据内植被生长较为茂盛、有大量裸土及部分人工构筑物(影像上侧的平坦区域,呈亮白色),而第二时相数据内由于滑坡灾害的出现,严重破坏了原来生长的植被及低处的人工地物,还在构筑物上方冲出了小水沟。

从独立成分影像中(图 3)可以看出,第一时相

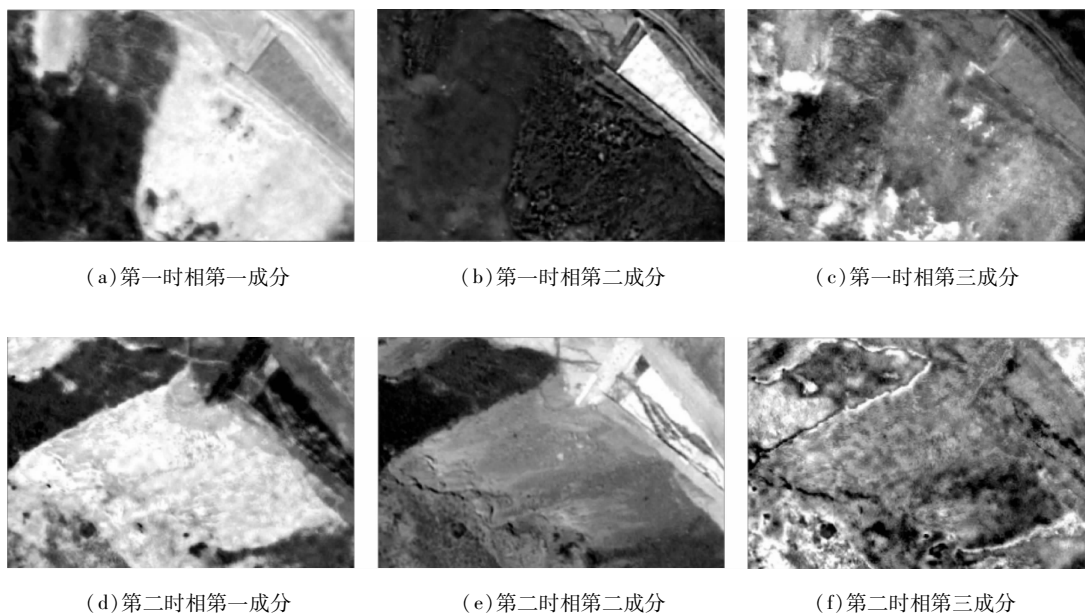
影像被独立地分成了裸土、人工地物、零星地物,而第二时相影像由于灾害的原因,影像特征被破坏,独立成分信息不明显,难以从图像中判读到地表覆盖信息。

从差异影像上(图 4)可以看出,第一成分差异影像主要检测出了两景时相间的植被差异,第二成分主要检测出了裸地的变化情况,而第三成分分布均匀,无明显变化。故根据目前情况,只有结合第一、第二成分才可以得到最终的变化结果。

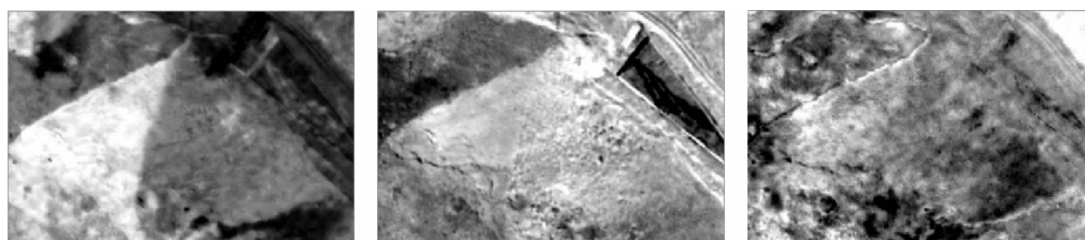
MNF 转换的三个结果图中可以看到,第一成分中已经涵盖了滑坡发生及受灾的绝大部分区域,并将两时相影像中包含的部分小水塘也全部实现了检测;而第二成分仅检测出了构筑物上的水流痕迹及部分零星变化,第三成分中包含变化信息



(a) 第一时相影像 (b) 第二时相影像
图 2 实验一原始影像



(a) 第一时相第一成分 (b) 第一时相第二成分 (c) 第一时相第三成分
(d) 第二时相第一成分 (e) 第二时相第二成分 (f) 第二时相第三成分
图 3 实验一数据独立成分



(a) 第一成分 (b) 第二成分 (c) 第三成分
图 4 实验一对应独立成分的差异影像

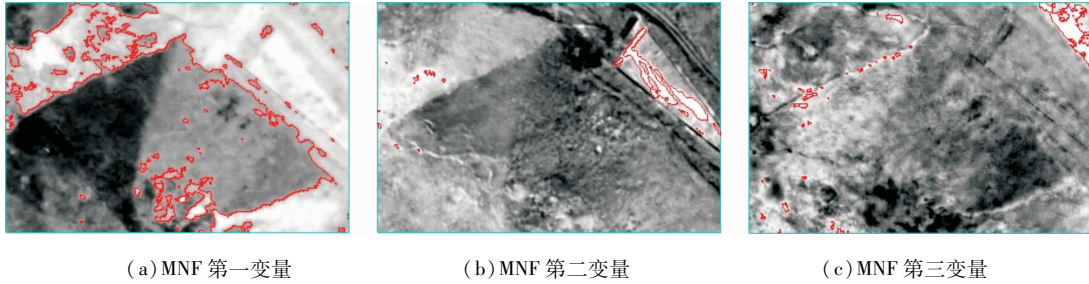


图5 实验一 MNF 结果与矢量叠加图

不显著,甚至可以忽略。MNF 变换结果与变化矢量叠加效果、最终的滑坡灾害发生区域分别如图5、图6所示。

从图6中可以看到,检测结果中不仅将滑坡区域实现了全部提取,还将滑坡体下方构筑物由水流引起的变化(影像右上方)以及植被中由于生长问题引起的部分变化(影像左上侧)。

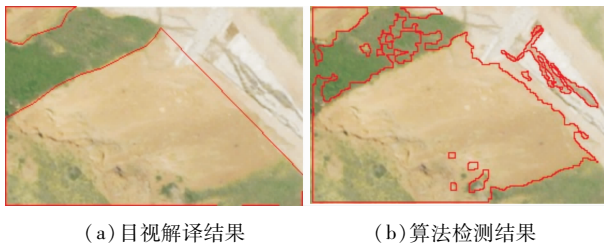


图6 实验一结果对比

实验二、实验三的原始影像及检测结果分别如图7、图8所示,从图7c、d图中看以看到,实验二中实现了灾害区域的绝大部分提取,但是由于辐射校正精度等问题的存在,使得检测结果有小部分的漏检区域,如滑坡区域中的几个封闭区域,另外在影像中的下侧有一定的过检区域;在实验三中也较好地实现了滑坡区域的提取,但是在影像的左上侧、中部有小部分的漏检测区域,而在影像的左下侧存在过检区域。

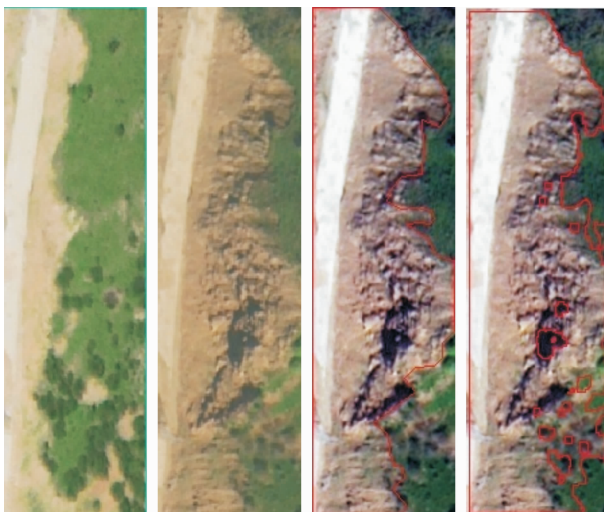


图7 实验二结果对比

在定性地评价变化检测结果的基础上,本文

以面积为量算单元,以目视解译的灾害区、非受灾区为参考数据,分别计算了生产者精度、使用者精度及K精度,定量地评价了本文方法的有效性,结果如表1、表2、表3所示。

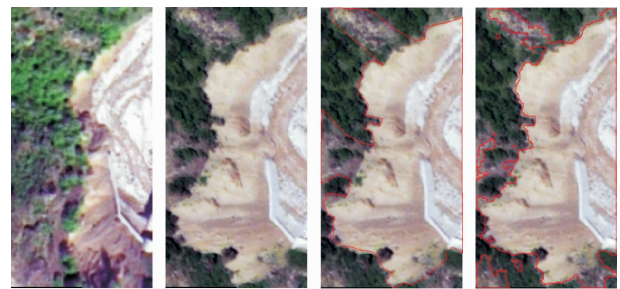


图8 实验三结果对比

表1 实验一检测精度 m^2

参考值	检测值			
	未变化	变化	总计	生产者精度/%
未变化	4 618.56	897.98	5 516.54	83.72
变化	1 202.54	7 682.02	8 884.56	86.46
总计	5 821.10	8 580.00	14 401.10	-
使用者精度/%	79.34	89.53	-	-
总体精度: 85.41%, K精度: 0.69				

表2 实验二检测精度 m^2

参考值	检测值			
	未变化	变化	总计	生产者精度/%
未变化	2 110.92	564.34	2 675.26	78.90
变化	410.15	7 935.41	8 345.56	95.09
总计	2 521.07	8 499.75	11 020.82	-
使用者精度/%	83.73	93.36	-	-
总体精度: 91.16%, K精度: 0.75				

表3 实验三检测精度 m^2

参考值	检测值			
	未变化	变化	总计	生产者精度/%
未变化	2 104.94	405.73	2 510.67	83.84
变化	806.52	5 552.02	6 358.54	87.32
总计	2 911.46	5 957.75	8 869.21	-
使用者精度/%	72.30	93.19	-	-
总体精度: 86.33%, K精度: 0.68				

从总的精度上讲,三个实验区检测的总体精度、K精度分别均达到了大于85%、大于0.61,即检测结果与实际情况保持高度一致性。从生产者角度考虑,变化部分的精度都达到了86%以上;非变化部分的检测精度分别为83.72%、78.90%

和 83.84%, 实际表现为约有少于 22% 的未变化区域被错误地认为是灾害发生区域, 即虚警率低于 22%。从使用者角度考虑, 变化部分的检测精度都达到了 89% 以上; 未变化部分精度分别为 79.34%、83.73% 和 72.30%, 实际表现为约有少于 28% 的区域为灾害发生区域而未能实现检测, 即灾害漏检率低于 28%。

从检测精度上看, 灾害与非灾害区域的检测精度均达到了较高的水平, 可以满足对灾后救灾的精度要求。检测结果的虚警率、漏检率仍有待加以抵制, 目前该值较高可能是由于辐射校正不够精确所致, 导致在差异影像上部分小区域被错误地分类; 另外采用目视解译法提取灾害区时, 人为地忽略了较小的灾害点(灾害区内部的非变化部分)也会对两类误差有一定的影响。

3 结论

本文研究了一种结合独立成分分析与最小噪声比率变换的多时相高分辨率遥感影像滑坡灾害检测方法, 解决了滑坡信息提取现有方法过度依赖滑坡体影像特征的问题, 可以较为理想地实现多时相高分影像间灾害信息的提取。首先利基于负熵最大化的 Fast-ICA 算法分别实现了两时相影像独立成分的分离, 得到了各自的独立成分影像; 之后构建相应独立成分的差异影像, 并运用 MNF 算法实现了分布于各个独立成分差异影像中变化信息的集中, 最后从 MNF 影像直方图中提取了突变点, 得到了最终的受灾区域。在实验过程中发现, 随机权向量的初始值 W 非常重要, 选择不当可能会造成结果不收敛; 直方图阈值的选取需要在微小的直方图陡变区间内反复调整, 直到得到满意结果为止。从实验结果中可以看出, 灾害信息的检测率达到了较高的水平, 可以为灾后的应急救援提供一定的参考信息。在实验过程中还发

现, 影像的波段数和大小关系到独立成分的个数及运算时间, 故如何实现大数据的处理将有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 宫鹏, 黎夏, 徐冰. 高分辨率影像解译理论与应用方法中的一些研究问题[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 1-5.
- [2] 李松, 李亦秋, 安裕伦. 基于变化检测的滑坡灾害自动识别[J]. 遥感信息, 2010(1): 27-31.
- [3] 赵祥, 李长春, 苏娜. 滑坡泥石流的多元遥感提取方法[J]. 自然灾害学报, 2008, 18(6): 29-32.
- [4] 陈莹, 孙洪泉, 赵祥, 等. 地震灾区河谷滑坡检测的遥感分析——以北川县滑坡为例[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 97-104.
- [5] 鲁学军, 史振春, 尚伟涛, 等. 滑坡高分辨率遥感多维解译方法及其应用[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(1): 141-149.
- [6] 贾春阳, 李卫华, 李小春, 等. 基于 ICA 的变化检测新方法[J]. 光电工程, 2013, 40(12): 39-43.
- [7] 武辰, 杜博, 张良培. 基于独立成分分析的高光谱变化检测[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 545-561.
- [8] 申丽岩, 方滨, 沈毅. 基于负熵极大的独立分量分析方法[J]. 中北大学学报, 2005, 26(6): 396-399.
- [9] 钟家强, 王润生. 基于独立成分分析的多时相遥感图像变化检测[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(6): 994-998.
- [10] 史习智. 盲信息处理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2008: 56-62.
- [11] Bingham E, Hyvarinen A. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex-valued signals[J]. Neural Systems, 2000, 10(1): 1-8.
- [12] Zhang Lu, Wang Yan, Liao Mingsheng, et al. SMNF-based spatial fuzzy clustering of remote sensing imagery[C]// Proceeding of SPIE Third International Symposium on Multispectral Image Proceeding and Pattern Recognition, Beijing, China, 2003: 632-635.
- [13] Nielsen AA. Kernel maximum autocorrelation factor and minimum noise fraction transformations[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(3): 612-624.
- [14] 张路. 基于多元统计分析的遥感影像变化检测方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 56-74.

Landslide Disaster Detection Method of High Resolution Remote Sensing Image based on ICA/MNF

Zhang Haitao, Cheng Xinwen, Chen Xingyi, Chen Lianjun, Chang Yazhou and Ma Hairong
(Department of Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: It is very important for disaster relief to extract disaster information from the disaster images quickly and accurately. Given the existing methods depends on landslide disasters' texture and other information on images heavily, a new method is studied which combined the independent component analysis and the Minimum Noise Fraction Transformation. It based on the single image, separated the independent component image using the Fast-ICA algorithm of maximum neg-entropy approximations and built the components' difference images, focused the different singles which distributed all of difference images based on the MNF and got the change information by the threshold from histogram method finally. Experiment results demonstrated the method's utility with images both before and after the disaster.

Key words: landslide; ICA; MNF; negative entropy; difference image; histogram threshold