



中国矿业大学博士学位论文出版基金资助

滑坡灾害遥感遥测预警 理论及方法

HUAPU ZAIHAI YAOGAN YAOCE YUJING LILUN JI FANGFA

王 坚 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

内 容 提 要

本书主要研究滑坡灾害遥感遥测监测数据的预警建模理论及方法。首先介绍了当代该领域研究的新成就和主要动向,然后从滑坡信息与灾害因子的遥感提取、风险分区以及滑坡动态变形数据建模三个方面研究滑坡灾害遥感遥测数据的综合建模及预警技术,最后以三峡库区为例,研究模型的应用。

本书是作者博士学位论文的研究成果,可供大地测量、遥感测量和工程测量专业的研究人员、科技人员及高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

滑坡灾害遥感遥测预警理论及方法/王坚著. —徐州

中国矿业大学出版社, 2010. 4

ISBN 978 - 7 - 81107 - 759 - 9

I. 滑… II. 王… III. ①滑坡—遥感系统: 预警系统
②滑坡—遥测系统: 预警系统 IV. P642. 22-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 155827 号

书 名 滑坡灾害遥感遥测预警理论及方法

著 者 王 坚

责任编辑 潘俊成

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 850×1168 1/32 印张 5.625 字数 270 千字

版次印次 2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷

定 价 42.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

本书是在作者的博士学位论文的基础上完成的,重点研究了滑坡灾害遥感遥测预警建模理论及方法,提出并发展了滑坡灾害体特征信息的融合增强模型,成功地进行三峡万县地区滑坡灾害空间风险分区预警,发展了滑坡体动态变形数据的预处理与预报模型,形成滑坡灾害遥感遥测数据的综合预警技术。

本书研究了滑坡特征信息的小波融合增强模型,首次提出滑坡体经验模态分解融合增强模型。研究表明,影像的小波融合模型更利于滑坡体特征信息的增强;经验模态分解融合模型适合滑坡灾害体遥感信息增强,考虑到模态分解的灵活性,该模型还具有巨大的应用潜力。

滑坡灾害空间风险分区预测定量模型分为物理确定性模型和基于格网决策理论模型两种。研究致灾因子模型时,首次引入归一化植被指数(NDVI)作为致灾因子,并在三峡区域取得成功应用。基于无限斜坡稳定性理论的 SINMAP 模型及加权分级模型进行风险分区预测,预测结果与实际情况相符,研究结果可以为政府决策支持提供依据。

滑坡体动态变形数据序列预报理论及模型研究包括数据预处理、特征分析及预报建模三个部分。本书发展动态变形监测数据的小波预处理理论与模型,重点研究了基于 MALLAT 与二进小波变换算法的粗差识别与修复技术,小波中值降噪模型,小波分尺度、分阶段阈值降噪模型,并以三峡某滑坡变形控制点动态变形数据为例进行模型应用。

通过建立变形数据序列的混沌性及分形特征的分析模型,理

论上解释了动态变形序列的本质特性,作为预报建模的依据;以三峡库区滑坡体变形控制点的实际变形序列为例,发展了遗传神经网络的动态变形预报模型;提出周期性特征的小波与傅立叶分析模型,并在沉降数据周期性分析中获得成功应用;进一步提出基于特征的变形预报新模型。

本书共分 7 章,第 1 章概述本书研究目标、研究内容及研究技术路线;第 2 章介绍了国内外的研究现状;第 3 章研究滑坡信息增强的遥感影像融合模型;第 4 章主要研究滑坡灾害空间风险分区预警建模;第 5 章与第 6 章主要研究滑坡动态变形监测数据序列预处理及预报模型;第 7 章对本书主要研究成果及需进一步研究的方向进行总结。

由于作者水平所限,书中难免有错误和不当之处,敬请读者不吝赐教。

作 者

2010 年 2 月

目 录

1 概述 (Introduction)	1
1.1 问题的陈述 (Problem Statement)	1
1.2 研究目标 (Research Objective)	3
1.3 研究内容 (Research Content)	3
1.4 技术路线 (Technical Scheme)	4
2 研究现状 (Overview of This Research)	9
2.1 滑坡灾害遥感监测 (Remotely sensed Monitoring of Landslide Hazard)	9
2.2 致灾因子分析模型 (Models for Hazard Inducing Factors Analysis)	11
2.3 滑坡灾害空间风险分区预测模型 (Prediction Model for Landslide Hazard Spatial Risk Zonation)	13
2.4 滑坡动态变形数据预处理模型 (Preprocessing Model for Landslide Kinematic Deformation Data)	14
2.5 滑坡动态变形数据预报模型 (Prediction Model for Landslide Kinematic Deformation Data)	16
3 滑坡信息增强的遥感影像融合模型 (Fusion Models for Landslide Information Enhancement)	18
3.1 小波变换基本理论 (Primary Theory of Wavelet Transform)	19
3.2 滑坡信息增强的小波融合模型 (Wavelet Fusion Model)	

for Landslide Information Enhancement)	28
3.3 滑坡体信息增强的经验模态融合新模型(Novel Model of EMD for Landslide Body Information Enhancement)	42
3.4 小结(Summary)	54
4 滑坡灾害空间风险分区预警建模(Spatial Prediction Model for LHRZ)	55
4.1 研究区基本情况(Primary Conditions of the Studied Area)	56
4.2 致灾因子分析建模(Analysis Model for Hazard Inducing Factors)	58
4.3 风险分区 SINMAP 预警模型(The SINMAP Prediction Model for Hazard Risk Zonation)	71
4.4 分级加权风险分区因子决策模型(Weighting-rating Risk Zonation Factor Decision Model)	80
4.5 两种风险分区模型的对比(Comparison of the Two Risk Zonation Models)	89
4.6 小结(Summary)	90
5 滑坡动态变形数据序列预处理模型(Preprocessing Model for Landslide Kinematic Deformation data)	91
5.1 动态变形信号的描述模型(Description Model of Kinematic Deformation Signal)	92
5.2 中值—小波降噪模型(Median-Wavelet Filter Model)	93
5.3 分尺度、分阶段降噪原理(Multi-scale and Multi-stage based noise reduction Principal)	97

5.4	变形信号的提取和粗差识别修复(Deformation Signal Extraction and Gross Error Recovery) ...	103
5.5	二进小波变换的粗差识别与修复(Gross Error Recognition and Recovery Based on the DWT)	107
5.6	三峡坡体变形监测实例数据分析(Deformation Data Analysis Example of 3-Gorge area)	112
5.7	小结(Summary)	118
6	滑坡动态变形数据序列预报模型(Prediction Model for Landslide Kinematic Deformation data)	120
6.1	动态变形数据特征分析(Feature Analysis of Dynamic Deformation Data)	121
6.2	遗传神经网络原理(Principal of GA-NN)	125
6.3	动态变形数据预报实例(Prediction Example of Dynamic Deformation Data)	134
6.4	周期性特征分析的小波模型(Wavelet Model for Periodical Feature Analysis)	139
6.5	周期性特征分析的傅立叶变换模型(Fourier Transform Model for Periodical Feature Analysis)	145
6.6	基于特征的预报模型(Feature based Prediction Model)	149
6.7	小结(Summary)	150
7	总结(Conclusions)	152
	致谢(Acknowledgements)	155
	参考文献(References)	156

1 概 述(Introduction)

自然灾害给社会经济、人民生活带来严重的威胁,其严重性日益受到人们的广泛关注。世界各国政府都从战略角度强调自然灾害防治工作的重要性。在我国,国家“十五”、“十一五”规划都将自然灾害防治工作作为一项重要内容,把灾害防治列入可持续发展战略考虑的一个重要部分,受到政府的高度重视。1995~2003年间,仅滑坡、崩塌、泥石流等突发性地质灾害就造成10 499人死亡或失踪,65 356人受伤,575亿元财产损失。2005中国科学发展报告明确指出中国重大自然灾害预测预警和防治对策是今后一段时间科学界研究的重要内容。

1.1 问题的陈述(Problem Statement)

滑坡灾害是最为普遍的一种自然灾害,其影响广,破坏严重。滑坡灾害给世界各国带来巨大的经济损失,世界各国都把滑坡灾害的防治研究提升到战略地位,如美国在20世纪70年代,滑坡损失达平均10亿美元/年,防灾减灾的费用惊人;最新统计表明,每年滑坡灾害给美国带来的损失已增加到20亿美元,伤亡达到25~50人。我国1310~1987年600多年中死于滑坡灾害的人数高达25.6万之多,平均每次死亡378人^[2]。近几十年来,随着社会经济的发展,人类活动对自然的影响越来越大,滑坡灾害的发生也有所增加,一些古滑坡复活,对滑坡的研究紧迫性更加强烈。在我

国,随着三峡工程的建设,库区滑坡灾害监测与预警工作也引起社会各界普遍关注,并取得了重要进展。《科技日报》对此进行跟踪报道,《人民日报》、《中国矿业报》等重要新闻媒体也都对此进行过专门报导。对滑坡地质灾害进行研究已成为科学界义不容辞的责任。

遥感遥测技术的发展为滑坡地质灾害观测提供了新的监测途径,灾害监测数据源也发生了本质变化。探索卫星遥感监测、GPS监测及传统测绘地质监测相结合进行滑坡灾害预警的建模研究很有必要。地理信息技术的进步,不仅可以有效管理影响滑坡发生的各种静态因素,又可以将内外因素作用机理进行有效的结合,为滑坡灾害危险性的空间预测提供强有力工具。本书基于这些多源数据,研究滑坡灾害的遥感遥测预警理论及方法,从而达到提高人类综合抗灾能力的目的。

遥感遥测技术包括卫星及雷达影像、航空摄影测量、全球定位系统、干涉测量、三维激光扫描、近景摄影测量等。作为遥感遥测预警数据源还应该涉及传统滑坡体时空运动监测的数据源,如全站仪、水准仪、变形监测数据、基本的地质水文数据等。

遥感影像的滑坡体监测可用于提取滑坡体的长、宽以及周围地形地貌特征等,植被覆盖、水文地质等背景信息也可以通过遥感影像获得。

滑坡灾害空间风险是滑坡空间预警的一个重要研究内容。通过综合滑坡体发生的历史因素、地质环境等内在背景信息及滑坡的外界驱动因素,采用各种模型与决策分析系统,达到对区域内滑坡体危害性分级。滑坡危险区划理论的研究始于20世纪60年代,美国以及一些西欧国家为了合理地开发和利用斜坡土地资源,利用敏感因素对斜坡的危险性进行分带^[3]。由于滑坡体灾害风险评估具有可操作性,这对减少滑坡灾害对人们的生命财产威胁起到了重要作用,因此得到各国政府的重视,逐步将确定相应的法规范畴。

通过比较滑坡体随时间变化的状况来对滑坡体运动过程的动态监测,通常的遥感监测技术包括航空、卫星光学遥感或雷达微波遥感影像进行滑坡前后变化监测、灾害影响范围估计。滑坡体地表运动速度及变化监测手段除有 GPS 变形监测、三维激光扫描、InSAR 变形监测等,还可以有光纤、变形传感器、钻孔测斜等其他变形监测方法,目的在于采集变形的时间变化及空间变形数据。

1.2 研究目标(Research Objective)

本书基于 RS/GPS 等遥感遥测信息源,结合 GIS 的分析理论与模型,以滑坡预警需要为目的研究相关预警建模理论及方法,提出滑坡灾害遥感遥测预警的技术路线。在滑坡信息增强、空间风险分区预警及滑坡动态监测的预报建模三个方面进行深入研究,建立可行的预警模型,并以三峡库区的滑坡灾害为例,进行模型应用。

1.3 研究内容(Research Content)

新形势下,滑坡灾害预警建模技术表现出如下特点:① 遥感影像监测数据的处理理论将为大面积滑坡灾害信息快速获取、灾害背景调查提供可能;② 多源遥测数据结合地理空间分析技术进行预警建模将成为该领域研究的一个必然趋势;③ 综合应用数学、信息科学等领域的相关理论和方法,研究滑坡预警模型。滑坡灾害预警研究可从三个方向进行考虑:现有滑坡灾害信息的监测数据处理与分类模型;滑坡体运动过程模型;在此基础上研究预警模型。

围绕滑坡灾害预警建模技术发展的特点及滑坡灾害预警研究的三个方向,在 3S 框架的支持下,本书研究的内容有滑坡信息的

影像融合增强理论及模型;滑坡灾害空间风险分区 GIS 预警模型;滑坡动态变形的 GPS 遥测数据建模,提出可行的动态变形数据预处理及在此基础上的预报模型,具体包括:

① 研究小波融合增强模型及经验模态分解融合模型在滑坡灾害遥感信息增强中的应用模型。

② 研究滑坡灾害空间风险分区预测的灾害因子提取模型,进行基于 GIS 的风险分区建模,以万县区域为例,重点研究 SIN-MAP 模型与分级加权风险分区预警模型。

③ 研究滑坡体 GPS 动态监测数据序列预报模型的建立。首先研究基于 MALLAT 多尺度算法及静态小波变换的滑坡体 GPS 动态监测数据序列噪声及粗差预处理模型。

④ 研究动态变形监测数据的特征定性定量描述模型,研究神经网络与遗传神经网络预报模型,并提出基于特征的滑坡体预警模型。

1.4 技术路线(Technical Scheme)

1.4.1 技术路线(Technical Scheme)

根据本书的研究内容,提出图 1-1 的研究技术路线。通过遥感影像的融合增强提高滑坡信息分析精度,进行滑坡灾害分布现状的调查,提取滑坡灾害的致灾因子,结合 DEM 信息,可以进行滑坡灾害的空间风险分区建模。

滑坡变形的 GPS 监测与预警是常用的有效方法,研究滑坡体动态变形数据的预报建模理论及方法,主要包括数据预处理及在此基础上的预报模型,建立坡体变形的时间预报模型。

1.4.2 技术路线分解(Detailed Technical Scheme)

1.4.2.1 滑坡信息增强的融合建模(Fusion Modeling of Landslide Information Enhancement)

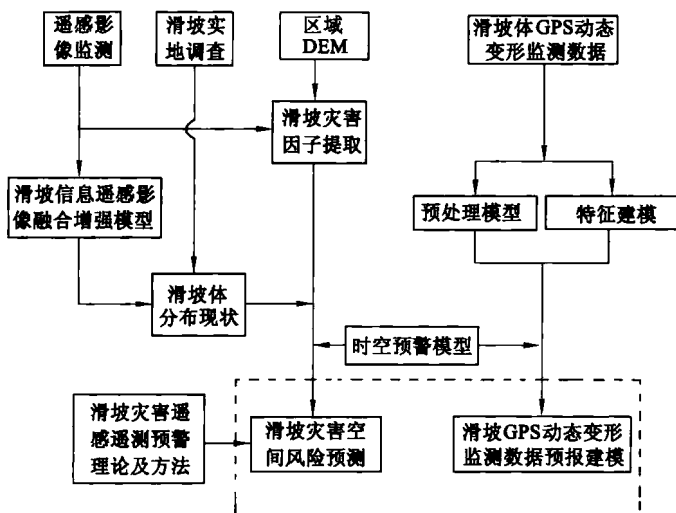


图 1-1 滑坡灾害遥感遥测预警理论及方法研究技术路线图

Figure 1-1 Technique scheme for landslide hazard remote sensing modeling

基于小波变换算法的影像融合算法是影像信息增强的重要途径之一,正交二进小波变换、平移不变小波变换等算法已被广泛应用于影像信息融合增强,但不同融合方案对滑坡体信息的增强效果研究还很少见。本书对多种融合方案在滑坡体增强效果中的应用进行了研究,主要研究不同小波变换算法改进的 IHS 融合方案滑坡体信息增强算法,实现多光谱影像与全色高分辨率影像的融合增强(以 ETM+影像为例),达到增强滑坡体信息或灾害背景信息的目的。根据二维经验模态分解理论首次提出基于 EMD 分解的二维影像融合方案,提出可行的算法,并针对不同分辨率影像进行实验。结果表明,模态选择合理,此方法可以取得很好的影像融合效果,有效增强滑坡体信息。滑坡体信息融合增强算法研究的

技术路线如图 1-2 所示。

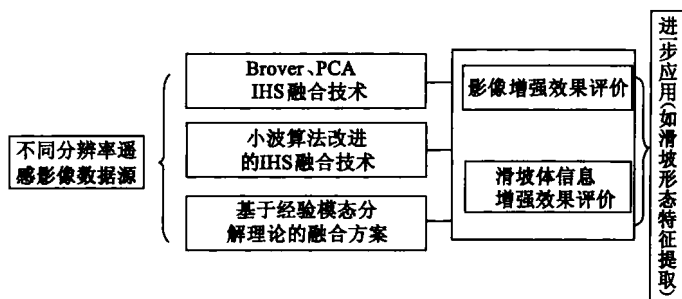


图 1-2 滑坡体信息融合增强算法研究的技术路线图

Figure 1-2 Technical scheme for landslide body characteristics enhancement

1.4.2.2 空间风险评估预警建模(Spatial Risk Zonation Prediction Modeling of Landslide Hazard)

滑坡的空间风险评估是在遥感监测的数据源基础上,研究滑坡风险与致灾因子的相关关系,并尽可能使用物理力学信息,建立相应的模型,进行最终风险预警。根据灾害因子来源的不同,可分为三类:① 基于遥感影像分析的灾害因子;② 基于 DEM 分析的灾害因子;③ 其他相关的灾害因子。

在此基础上,可采用物理确定性模型,结合 GIS 等空间数据分析技术进行空间的风险评估;或通过建立 GIS 中常用的格网单元,将考虑的区域划分为属性分布均匀的子区域,通过各种可行的格网决策方法,获得最终的风险值分级结果(图 1-3)。

1.4.2.3 滑坡 GPS 动态变形监测数据分析与预警建模(GPS dynamic deformation monitoring data analysis and prediction modeling of Landslide)

目前已有滑坡灾害体动态变形监测系统用于采集动态变形数据,可以对滑坡体动态变形监测数据进行预处理、信息提取与粗差

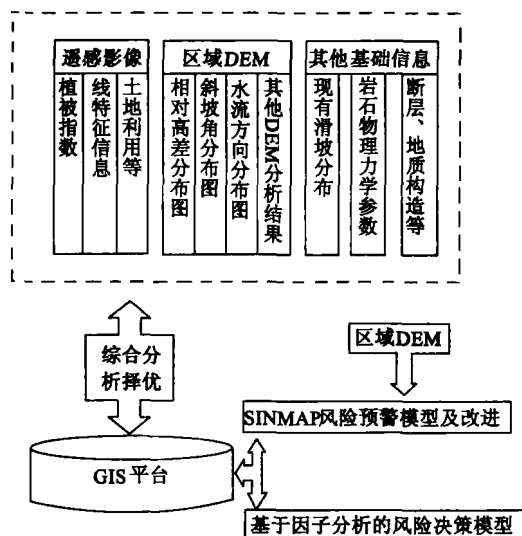


图 1-3 滑坡灾害体空间风险评估预警建模的技术路线图

Figure 1-3 Technical scheme for landslide hazard spatial prediction modeling

修复,并进行特征提取与变形预报建模。预处理可以采用各种信号降噪的方法进行,粗差识别与修复的方法也有很多。变形预警最终的目的是为了提高预报建模的精确度,有必要对动态变形数据序列的内在特征进行深入分析,如周期性信息、序列的嵌入维大小等,并引入到预警建模中来,使得建模结果更有效。滑坡体动态变形监测数据预报建模流程如图 1-4 所示。

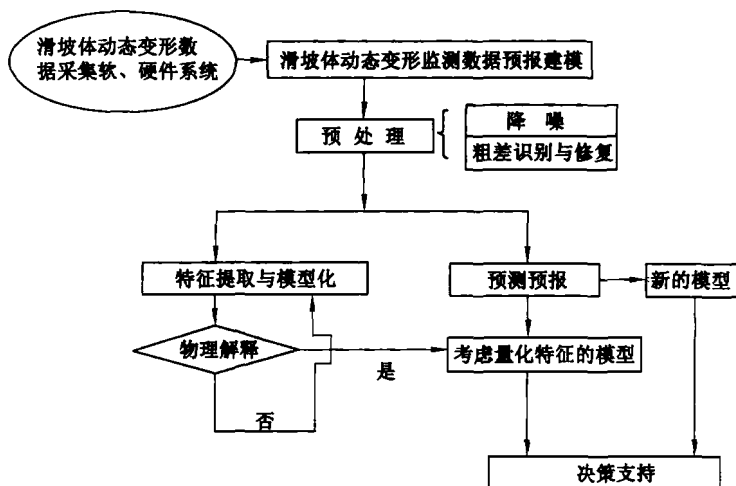


图 1-4 滑坡体动态变形监测数据预报建模流程图

Figure 1-4 Technical scheme for landslide dynamic deformation data series analysis and prediction modeling

2 研究现状 (Overview of This Research)

滑坡灾害遥感遥测预警的内容包括滑坡体信息的影像融合增强模型,滑坡重要孕灾背景信息的提取,滑坡体空间风险评估建模,滑坡体动态变形的 GPS 遥感监测动态变形数据预处理与预报理论及模型,现对国内外研究现状阐述如下。

2.1 滑坡灾害遥感监测 (Remotely Sensed Monitoring of Landslide Hazard)

滑坡体形态及分布信息是进行滑坡风险建模及预警的首要数据,如通过滑坡堆积物可进行滑坡信息识别,对识别的滑坡体进行分类。在此基础上,测量滑坡体的长、宽、厚及局部坡度等用于滑坡风险预警建模。滑坡体信息影像判读的主要特征如快速的色调与纹理变化、弓形陡崖隔开的斜坡、带状沉积物、大量裸岩暴露区域、河流的缓冲区域可以直接在影像图上进行判读,ERS、RADARST 及 SPOT/TM 影像都可直接进行滑坡体信息的提取^[4,5]。利用 IKONOS 高分辨率伪彩色合成影像可以用来提取滑坡信息^[6],采用一定的算法还可消除阴影对滑坡信息提取的影响^[7,8]。摄影测量的正射影像图具有高清晰度的特点,利于滑坡灾害的监测^[9],SAR 影像可直接进行滑坡信息制图^[10],遥感影像通过记录滑坡引起的地表侵蚀景观并有效进行滑坡制图^[11,12],航空摄影测量建

立立体像对滑坡信息进行提取是最为成熟的方法之一;SAR 影像具有丰富的纹理信息,通过 SAR 影像与光学影像融合或其他算法可以有效增强滑坡体表面的特征信息^[13,14],采用 SAR/TM 影像可以很好地分析斜坡特征,提取滑坡信息,还可与航空摄影测量影像结合进行滑坡监测^[4],激光高度计也可用于计算滑坡体表面粗糙度,分析坡体表面的特征^[15]。采用多时相 TM 影像处理技术结合 GIS 系统可准确描述滑坡信息并进行管理^[16]。而更为有效的滑坡体信息获取方法则是采用多源不同分辨率的影像进行特征增强建模,达到提高滑坡体信息提取精度的目的。

遥感影像的信息增强包括影像的噪声去除、辐射校正、大气校正,最后获得地表实际的反射强度影像,是减少影像失真度、增强信息量的图像处理技术。影像融合技术是提高滑坡体及孕灾背景信息的重要途径^[17]。

融合算法是滑坡体相关特征信息增强最为有效的方法之一,20 世纪 80 年代以来,数据融合技术在国内得到迅速发展和利用,被广泛用于遥感图像处理、工业应用、数字地球、目标识别等范围。多传感器遥感图像融合可以弥补单一传感器获取图像信息的不足^[18,19]。融合影像比多源影像包含更多的信息量,更少冗余,并对研究对象提供更为优化的信息表征,在空间信息和光谱方面有更好的可用性^[20]。各种数据融合方法也不断地被开发探索,对于不同领域应用,需要采用特定的融合算法,才能取得最佳效果。影像融合算法可分为像素级、目标级或特征级及决策级融合^[21,22]。

基于小波理论的多源影像融合增强是公认的最为有效的方法之一^[23],SPOT 影像的全色波段与多光谱的融合可以获取较好的效果^[24,25];采用小波理论结合 IHS 等其他变换算法能有效增强影像的特征信息^[26]。基于小波理论的多尺度融合算法可被用于增强滑坡体的特征信息^[7,27]。平稳不变小波可用于融合 TM 影像的 5、4、3 波段及全色波段,并有效地增强了滑坡碎石带信息^[17]。