

滑坡时间预测预报研究

许强 黄润秋 李秀珍

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

[摘 要] 我国是一个深受滑坡灾害困扰的国家之一, 每年由滑坡所造成的经济损失异常惨重。因此, 滑坡预测预报已成为人们研究的一个热点问题。本文对滑坡时间预测预报的研究现状和研究进展作了系统地总结, 重点探讨了滑坡预报模型(包括定量预报模型、定性预报模型以及 GMD 预报模型等)、预报判据研究方面的进展, 提出了滑坡综合信息预报的思路及具体的实施技术路线。

[关键词] 滑坡预报, 预报模型, 预报判据, 综合预报, GIS, 专家系统

1. 前言

我国是一个崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害发生十分频繁和灾害损失极为严重的国家, 尤其是西部地区。据初步统计, 我国每年由崩塌、滑坡、泥石流等灾害所造成的直接经济损失约 200 亿元人民币。而由于灾害对社会所带来的影响(如中断水、陆交通)所产生的间接损失更是无法估量。直接由工程建设所诱发的崩滑灾害事件也屡见不鲜。因此, 与地震预报一样, 滑坡的预测预报也是近年来人们研究的一个热点问题。

崩滑地质灾害研究归根结底是对其发生的可能性作出合乎科学的评价以及对其发生时间作出准确的预测。这是人类自有工程活动以来就苦苦追求与探索的问题, 但也是一个直到现在也没有得到很好解决的问题。

回顾历史, 多数学者认为, 日本学者斋藤(M.Satio)在 20 世纪 60 年代提出的滑坡预报经验公式, 可以作为滑坡预报研究工作的真正起点。在此之后, 经过广大学者的苦心探索, 滑坡预报理论和方法有了较大的发展。

从滑坡预测预报理论而言, 目前国内外学者在不同的发展阶段已提出了数十个滑坡预测预报理论模型和方法。同时, 为了提高滑坡预测预报的精度, 尽量消除外界随机因素对预报结果造成的影响, 还有针对性地提出了一系列有关滑坡监测数据的预处理方法(如平滑、滤波、等间隔化等); 从滑坡预报发展阶段来讲, 已经历了从现象预报、经验预报到统计预报、灰色预报再到非线性预报的历程, 目前已进入了根据检测反馈信息进行实时跟踪动态预报, 以及将定性预报、定量预报以及现代数值预报技术有机结合的综合预报阶段。从技术方法角度, 已从手工、经验预报, 到开发基于理论预报模型的滑坡预报系统, 发展到基于 GIS 平台, 借助于专家系统的思路和方法, 开发滑坡综合预测预报系统的阶段^[1-5]。

纵观人们对滑坡预测预报问题的研究历程, 可见, 研究程度的每一次加深, 都是对滑坡灾害发生机理与预测评价认识上的一次质的飞跃。人们认识的每一次进步, 都在逼近对客观自然界更为确切地描述, 都在接近自然界发展的真理。本文特对滑坡预测预报相关方面的进展和问题作一系统总结。

2. 滑坡预报模型

近年来, 随着滑坡预报研究的逐渐深入, 人们已经逐渐认识到, 由于滑坡发生的地质条件、成因机理以及外界影响因素等方面的复杂性, 滑坡的预测预报仅仅从纯数学的角度建立滑坡预报的定量预报模型是很难从根本上解决问题, 于是人们又提出了根据宏观变形破坏迹象建立滑坡的定性预报模型, 以及通过现代数值与物理模拟手段, 将斜坡演化的地质力学机理、内部变形破坏过程与其综合表现——变形有机的结合起来的 GMD 预报模型。

2.1 滑坡定量预报模型和方法

滑坡定量预报模型主要是随着数学的发展阶段而提出的相应的模型, 具体包括确定性预报模型、统计预报模型、非线性预报模型三类。确定性模型是把有关滑坡及其环境的各类

参数用测定的量予以数值化，用严格的推理方法，特别是数学、物理方法，进行精确分析，得出明确的预报判断。此类模型预报可反映滑坡的物理实质，多适用于滑坡或斜坡单体预测。

统计预报模型主要是运用现代数理统计的各种统计方法和理论模型，着重于对现有滑坡及其地质环境因素和其外界作用因素关系的宏观调查与统计，获得其统计规律，并用于拟合不同滑坡的位移-时间曲线，根据所建模型做外推进行预报。非线性预报模型是引用了对处理复杂问题比较有效的非线性科学理论而提出的滑坡预报模型。

表 1 为现有的具有代表性的滑坡定量预报模型和方法一览表。

表 1 滑坡定量预报模型和方法总结^[6]

滑坡预报模型及方法		适用阶段	备注
确定性 预报模型	斋藤迪孝方法 HOCK 法 K·KAWAWURA 蠕变试验预报模型 福围斜坡时间预报法	加速蠕变阶段	以蠕变理论为基础，建立了加速蠕变经验方程，其精度受到一定的限制。
	蠕变样条联合模型	临滑预报	以蠕变理论为基础考虑了外动力因素
	滑体变形功率法	临滑预报	以滑体变形功率作为时间预报参数
	滑坡形变分析预报法	中短期预报	适用于黄土滑坡
	极限平衡法	长期预报	
统计 预报模型	灰色 GM(1, 1)模型[传统 GM(1, 1)模型、非等时距序列的 GM(1, 1)模型、新陈代谢 GM(1, 1)模型、优化 GM(1, 1)模型、逐步迭代法 GM(1, 1)模型等]	短临预报	模型预测精度取决于模型参数的取值，优化 GM(1,1)模型也适用于滑坡的中长期预报，逐步迭代法 GM(1, 1)模型计算精度较高
	生物生长模型(Pearl 模型、Verhulst 模型、Verhulst 反函数模型)	短临预报	在加速变形阶段预报精度较高
	曲线回归分析模型	中短期预报	多属趋势预报和跟踪预报，当滑坡处于加速变形阶段时，可以较准确地预报剧滑时间。
	多元非线性相关分析法		
	指数平滑法		
	卡尔曼滤波法		
	时间序列预报模型		
	马尔科夫链预测		
	模糊数学方法		
	泊松旋回法		
	动态跟踪法		
	斜坡蠕滑预报模型(GMDH 预报法)		
	梯度—正弦模型		
	正交多项式最佳逼近模型		
	灰色位移矢量角法	短期和临滑预报	主要适用于堆积层滑坡
	黄金分割法	中长期预报	
非线性 预报模型	BP 神经网络模型	中短期预报	较适合于短期预报预报
	协同预测模型	临滑预报	联合模型预报精度较单个模型高
	滑坡预报的 BP—GA 混合算法	中短期预报	
	协同-分岔模型	临滑预报	
	突变理论预报(尖点突变模型和灰色尖点突变模型)	中短期预报	
	动态分维跟踪预报	中长期预报	可跟踪预报斜坡的最短安全期
	非线性动力学模型	长期预报	
	位移动力学分析法	长期预报	

2.2 滑坡定性预报模型和方法

实例检验结果表明, 尽管目前国内外学者已提出了上述数十个滑坡预测预报的理论模型, 但完全依靠滑坡定量预报模型并不能完全解决滑坡预报问题。

目前所谓的“成功预报”, 大多只是根据临滑现象所作出的经验判断, 采用定量预报模型对滑坡所作出的预测预报, 几乎无一例外地都是一些事后检验。到目前为止还没有一个滑坡是真正依靠定量预报成功的实例。

究其原因, 由于各个滑坡体所处的环境条件、本身的结构特征等方法的差异, 使得滑坡体的变形演化规律具有极强的个性特征, 任何一个滑坡定量预报模型不可能适用于所有滑坡的预测预报, 往往仅能适用于某一类滑坡或某一演化阶段的预测预报, 而上述各滑坡定性预报模型究竟适用于哪种类型或哪个演化阶段的滑坡预报, 目前并没有调查清楚。这就导致人们在真正采用定量模型进行滑坡预报时具有很大的盲目性, 对于同一个滑坡, 采用不同的预报模型可能会得出千差万别的预测结果, 究竟哪些结果更接近真实, 目前尚无很好的判别方法。

基于此, 目前国内外学者开始重视对滑坡宏观变形破坏迹象以及滑坡前兆信息的研究, 并倡导将斜坡变形破坏的宏观信息与滑坡监测的资料有机地结合起来, 将定量预报与定性预报有机结合的综合预报方法。

滑坡定性预报模型是以滑坡开始变形直至最终破坏过程中所表现出来的各种前兆、迹象等为依据, 以模糊评判、加权平均等法为主建立的与各类滑坡特征相适应的预报模型。一般滑坡的变形演化过程可分为缓慢蠕动、匀速蠕滑、加速蠕滑和急剧变形 4 个阶段。

根据宏观变形破坏迹象, 可定性识别滑坡所处的变形演化阶段。

大量的滑坡实例研究结果表明, 滑坡滑动前一般都会表现出明显的宏观变形破坏迹象, 如地表变形, 包括滑坡后缘的张裂缝、错台、沉陷、滑体两侧的剪切裂缝、羽状裂缝、前缘的鼓张裂缝、放射状裂缝等; 地物变形, 包括滑坡体上建筑物开裂、道路错断、滑坡剪出口形成和贯通导致前缘土体松弛、坍塌或局部滑动、树木倾斜等。

例如, 表 2 为王尚庆^[2]等人归纳总结的新滩滑坡和各演化阶段的宏观变形破坏迹象。

表 2 新滩滑坡各演化阶段的宏观变形破坏迹象(据王尚庆, 1998, 有删减)

预报判据	I:缓慢变形阶段 (1979 年 8 月以前)	II:匀速变形阶段 (1979 年 8 月~1982 年 7 月)	III:加速变形阶段 (1982 年 7 月-1985 年 5 月上旬)	IV:急剧变形阶段 (1985 年 5 月中旬-6 月 11 日)
1. 裂缝	主滑区地表局部出现近南北向长大裂缝	雨期原地表裂缝复活, 有新的扩展变形迹象	滑体后缘及两侧出现羽状张裂缝, 并逐渐扩展, 趋于连通, 呈现整体滑移的边界条件	裂缝形成弧形拉裂圈, 并急剧加长、增宽、下沉、新裂缝不断产生
2. 隆起与沉陷	无明显隆起与沉陷现象	滑体局部有小的隆起与沉陷变形	滑体后部拉张下沉, 前缘坡脚出现剪胀异常	滑体后部急剧下沉, 前缘出现鼓包, 路面隆起
3. 崩塌	滑体后缘、西侧上方的危岩体时有小崩塌	滑体后缘广家崖逐年崩塌加载, 量达 160 万 m ³ , 前缘陡坎有小规模崩滑发生	雨期滑体前缘小崩塌现象时有发生	滑体后部大幅度沉陷, 前缘崩滑日夜不断, 频次渐高, 规模渐大
4. 变形量	变形微弱, 月变形率 <10mm, 坡体呈现向下蠕动趋势	变形量逐渐增大, 月变形速率为 10~50mm, 近似匀速运动	变形量显著增大, 月变形速率为 50~100mm, 蠕变曲线变化呈不可逆的增值现象。位移矢量角发生显著变化	变形量急剧增大, 位移处于峰值, 月变形速率 >100mm 或更大, 蠕变曲线出现拐点, 斜率变化突增变陡, 趋于 90°
5. 变形量	变形量与降雨关系	当月降雨量 >200mm	当月降雨量 <200mm	变形与降雨近于同步

与降雨关系	不明显	时, 变形出现突变, 且有滞后现象	时, 乃出现突变, 且有滞后期缩短	
6.地下水动态	滑体内地下水无明显异常变化	滑体内地下水较正常值高, 泉水流量增大或减小	滑体内地下水位维持高水位, 泉水冒砂变浑, 流量大幅度增大或减小, 主滑区坡脚泉水干枯	滑体剪出口附近水位升降异常, 湿地面积突然增大, 剪破日甚一日, 率先发生 70 万 m ³ 滑坡
7.其它	滑体后缘广家崖和西侧黄岩逐年崩塌加载堆积, 促使斜坡开始蠕动变形	1982 年 3 至 5 月, 主滑区姜家坡陡岩坍塌 3 万 m ³ 土石	主滑区坡体上树木南倾, 前缘率先出现崩滑体, 伴有小崩、小滑产生	出现地微动、地声、地热及经纬仪气泡整置不平等异常

此外, 在滑坡的临滑阶段还会表现出明显的前兆异常。主要为变形异常(滑坡、崩塌发生前数天或数小时, 一般会伴随间断的小规模崩滑、滚石、坠石。坡体后缘裂缝加速张开、闭合、陷落, 前缘隆起、鼓胀等)。地下水异常(包括滑坡体及前缘泉点数目增加或减少, 水位跃变, 水质、水量、水温、水的颜色发生变化等)。动物异常(包括蛇、鼠出洞, 鱼群聚集, 鸡飞、犬吠等)。地声(包括岩土体移动、破裂、摩擦发出的声响、建筑物倒塌、滚石发出的声响等), 地气(包括滑坡区冒出的有味或无味的热气等)。

2.3 滑坡 GMD 预报模型和方法

无论是定量预报所利用的滑坡监测信息还是定性预报所依据的滑坡宏观变形破坏迹象和前兆异常特征, 都是斜坡体在其发展演化过程中的外在表现, 未顾及到斜坡变形破坏的内在本质, 其预测的精度和准确度自然会受到限制。为此, 黄润秋、许强等人^[1]突破传统的现象(位移等)预报模式, 提出以斜坡(滑坡)地质模型为基础, 斜坡演变过程中坡体内部地质-力学作用机理和过程分析为核心, 紧密结合位移监测成果, 将地质灾害发生的斜坡地质(Geology)结构基础、斜坡变形破坏机理(Mechanism), 尤其是滑动面发育演化的过程机理, 与斜坡变形的表现——位移(Deformation)三者有机的结合, 通过数值和物理模拟等途径, 建立能综合反映斜坡变形破坏内部作用机理与其外部表现相统一的综合地质(G)—力学机理(M)—形变(D)耦合模型, 即 GMD 模型。从本质上阐明通常利用各种手段监测到的滑坡外在表现所代表的滑体变形和失稳的地质—力学机理内涵。在此基础上, 根据所建立 GMD 模型, 通过数值模拟等手段对时间的进一步延拓和条件的改变, 达到预报滑坡的目的。

滑坡 GMD 预报思路和方法已经在三峡库区一些滑坡的研究中得到初步应用, 已证明其可行性, 当然要真正推广使用还需要作深入细致的研究工作。

3. 滑坡预报判据

除滑坡预报模型外, 滑坡预报研究的另一方面重要方面是预报判据。滑坡预报判据是指用于判定斜坡体进入临界失稳状态的指标。根据文献资料, 目前, 国内外学者已提出了 10 余种滑坡预报判据, 具体可归纳为表 3。

表 3 滑坡的各种预报判据^[6]

判据名称	判据值或范围	适用条件	备注
稳定性系数(K)	$K > 1$	长期预报	
可靠概率(P_s)	$P_s > 95\%$	长期预报	
声发射参数	$K = A_0/A > 1$	长期预报	A_0 为岩土破坏时声发射记数最大值; A 为实际观测值
塑性应变 ε_i^p	$\varepsilon_i^p \rightarrow \infty$	小变形滑坡 中长期预报	滑面或滑带上所有点的塑性应变均 趋于无穷大

塑性应变率 $d\varepsilon_i^p / dt$		$d\varepsilon_i^p / dt \rightarrow \infty$	小变形滑坡 中长期预报	滑面或滑带上所有点的塑性应变率 均趋于无穷大
变形速率 V_f		$V_f \quad V_{cr}$	中长期预报	不同类型的滑坡发生前,其临界变形 速率 V_{cr} 从 0.1mm/d 到 1000mm/d 不 等,差别较大
位移加速度		$a \geq 0$	临滑预报	加速度值应取一定时间段的持续值
蠕变曲线切线角 (α)		$\alpha \geq 70^\circ$	临滑预报	黄土滑坡 α 在 $89^\circ \sim 89.5^\circ$ 为滑坡 发生危险段
位移矢量角		突然增大或减小	临滑预报	堆积层滑坡位移矢量角锐减
分维值(D)		1	中长期预报	D 趋近于 1 意味着滑坡发生
分叉集方程判据(D)		0	临滑预报	D 趋近于 0 意味着滑坡发生
双 参 数 判 据	蠕变曲线切线角 和位移矢量角	$\alpha \geq 70^\circ$ 且位移矢量 角突然增大或减小	临滑预报	新滩滑坡变形曲线的斜率为 74° , 位移矢量角显著变化,锐减至 5° 。
	位移速率和位移 矢量角	位移速率不断增大 或超过临界值,位移 矢量角显著变化	堆积层滑坡临滑 预报	

4. 滑坡的综合信息预报

前已述及,由于滑坡地质灾害的成因机理、形成条件、诱发因素等的复杂性、多样性以及其变化的随机性、非线性,完全从定量的角度或完全从定性的角度准确地预测预报滑坡的发生时间都是非常困难的。因此,要想实现滑坡的准确预报,必须既要注重滑坡的共性特征,掌握斜坡演化的一般规律,又要注重滑坡的个性特征,研究滑坡体形成的基本条件、地质结构、成因机理、演化阶段即稳定性状况;将监测资料为依据的定量预报与以宏观变形破坏迹象和前兆异常为依据的定性预报有机结合,从而实现滑坡的综合信息预报。

欲真正实现滑坡的综合信息预报,首先必须借助于 GIS 手段将与滑坡预测预报相关的各种信息进行科学合理的管理;同时,滑坡的综合预报,既涉及到定量信息(如各种监测数据),也涉及到定性信息(如滑坡体的工程地质环境条件和影响因素、宏观变形破坏迹象、前兆信息等等),要充分利用这两类信息实现综合决策和判断,也必须借助于专家系统的思路和技术手段^[7、8]。为此,我们建立了如图 1 所示的滑坡综合信息预报技术路线。

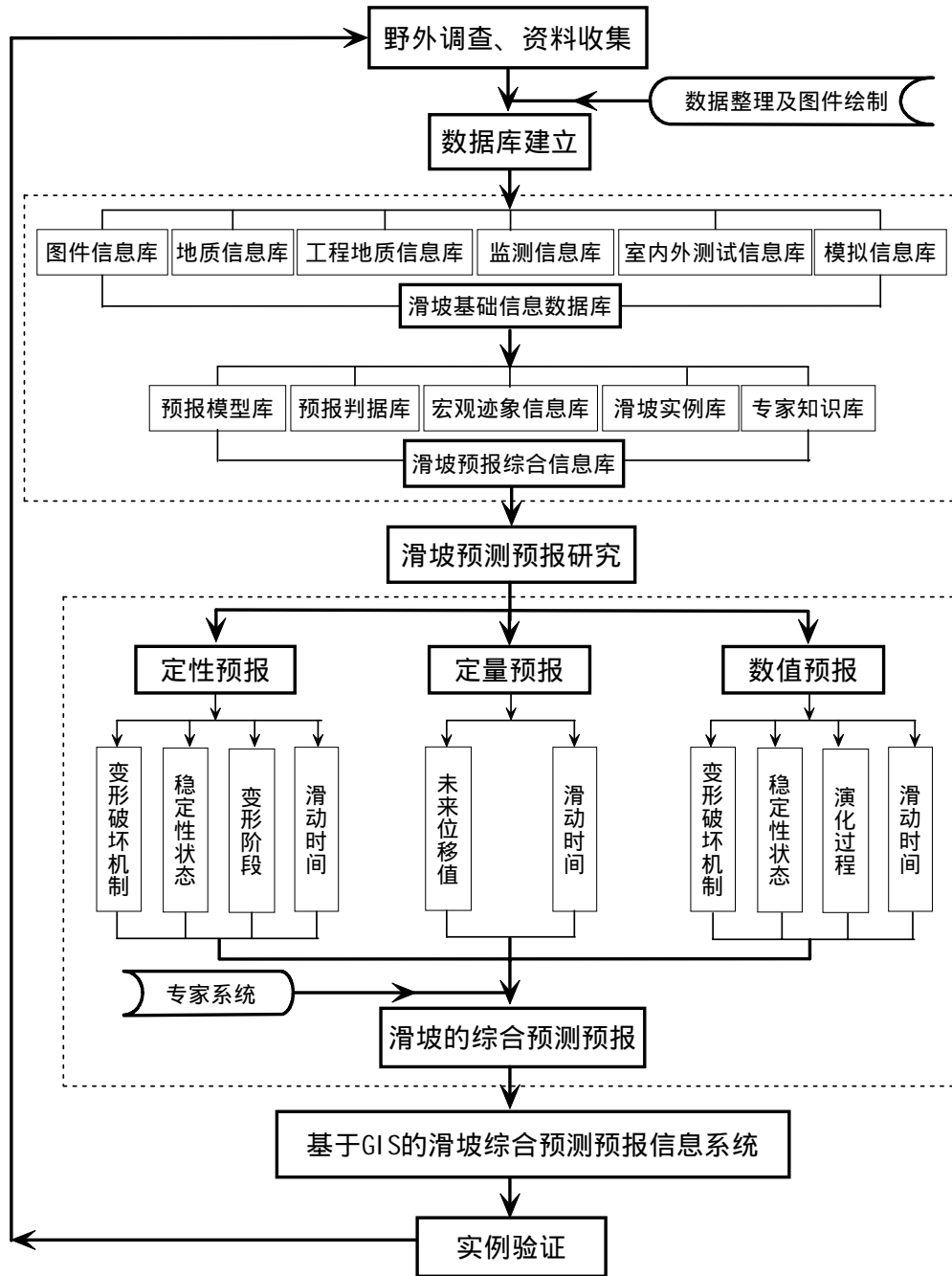


图 1 滑坡综合信息预报技术路线框图

从图 1 可以看出，滑坡综合信息预报的第一步是建立与滑坡预报密切相关的信息库，信息库又具体包括两大类，一类为与被预报的斜坡体直接相关的个性特征，如基本地质信息、监测测试信息、以及数值物理模拟信息等，通过这些信息，可以掌握被预报斜坡体的工程地质环境条件、成因机制、变形演化基本情况；另一类为滑坡预测预报所需要的共性特征，如通过大量文献资料归纳总结的具有一定普遍性和参考借鉴意义的信息(滑坡实例库、专家知识库、宏观变形破坏迹象库等)以及为滑坡预报提供的预报模型库、预报判据库等。

依据上述信息，便可以根据监测资料，采用定量预报模型对滑坡未来的位移和具体发生时间进行预测；根据坡体基本的值资料、宏观变形迹象和前兆信息，采用定性预报和 GMD 预报方法，判断坡体变形破坏的成因机制、变形演化阶段、目前的稳定性状况，推测发生失稳破坏的大体时间。在此基础上，借助于专家系统的思路 and 手段，对滑坡体目前的状况作出

综合判断。

基于图 1 所示的技术路线, 我们已基于 GIS 平台, 初步开发成功了滑坡综合预测预报系统。

5. 结论

由于斜坡本身所处的环境条件、影响因素、成生机理等方面的复杂性, 滑坡时间预报是一世界性难题。本文认为, 建立滑坡预报模型和预报判据是滑坡时间预报的核心, 将定性预报与定量预报有机结合, 进行滑坡的综合预报是实现真正成功预报的关键。

本文对滑坡预报模型分为定量预报模型、定性预报模型以及 GMD 预报模型, 并分别对这三种预报模型的研究现状及近年来的研究进展作了系统归纳和总结。

滑坡的定量预报模型主要是根据滑坡监测数据, 采用一定的数学方法所建立的坡体失稳破坏时间的预报模型, 具体又包括确定性预报模型、统计预报模型、非线性预报模型三类。

滑坡定性预报模型主要是根据斜坡演化过程中所表现出来的宏观变形破坏迹象以及临近失稳阶段所显现的异常特征来判断和推测坡体所处的变形演化阶段、稳定性状况及可能失稳时间。

GMD 预报模型是通过对斜坡地质模型的研究以及物理模拟和数值模拟手段, 建立能综合反映斜坡变形破坏内部作用机理与其外部表现相统一的综合地质(G)-力学机理(M)-形变(D)耦合模型。GMD 预报模型是今后滑坡预报发展的必然趋势。

滑坡预报判据是指用于判定斜坡体进入临界失稳状态的指标。本文对目前国内外学者所提出的 10 余种滑坡预报判据及其适用性进行了系统地分析和总结。在上述基础上, 提出了滑坡综合预报的观点及其具体的实施技术路线。

参考文献：

- [1] 许强, 黄润秋, 李秀珍等. 滑坡预报模型及预报判据总结及滑坡预测预报系统开发 [R]. 国土资源部 2000 年科技专项计划长江三峡地质灾害监测与预报研究报告. 成都: 成都理工大学, 2001.
- [2] 王尚庆, 等. 长江三峡滑坡监测预报[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [3] 李天斌, 陈明东, 王兰生等. 滑坡实时跟踪预报[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999.
- [4] 秦四清, 张倬元, 王士天等. 非线性科学导引[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.
- [5] 黄润秋, 许强著. 工程地质广义系统科学分析原理及应用[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- [6] 李秀珍, 许强. 滑坡预报模型和预报判据[J]. 灾害学. 2003, 18(4): 71-78.
- [7] 李彦荣. 基于 GIS 的滑坡预测预报系统开发及应用研究 [硕士论文 D]. 成都: 成都理工大学, 2002.
- [8] 李东山, 滑坡综合预报专家系统的开发及应用研究. [硕士论文 D]. 成都: 成都理工大学, 2002.