

泥石流预测预报研究进展^{*}

崔 鹏 高克昌 韦方强

(中国科学院 成都山地灾害与环境研究所 成都 610041)
水 利 部

摘要 泥石流是山区常见的一种灾害现象。泥石流预测预报是减轻灾害的一项重要措施,成为当前国内外研究的重点。本文阐述了泥石流预测预报的类型和层次,介绍了国际和国内泥石流预测预报研究的进展,并对其未来发展提出了几个值得思考的问题。

关键词 预测预报,泥石流,研究进展

我国是世界上受泥石流灾害威胁最为严重的国家之一。泥石流灾害平均每年导致数百人死亡,造成多达数十亿元人民币的直接经济损失,严重威胁到国民经济和社会的可持续发展。泥石流成因复杂、量大面广、治理成本高,目前还无法进行全面的治理。泥石流预测预报作为一项重要减灾手段,受到了国内外学者的广泛关注,是减灾研究的热点和关键问题。

1 泥石流预测预报的类型和层次

1.1 泥石流预测预报的定义

泥石流预测预报作为一项重要的非工程减灾措施,通过提前判断其发生的时间、地点、规模、危害范围以及可能造成的损失,使危险

区的居民及时得到预警信息,提前采取预防措施,达到保证人民生命财产安全、减轻灾害的目的。因此,泥石流预测预报就是对其可能发生的地点(区域、或者沟谷)、时间(未来1小时、1天、1年或者更长时间)和特征(规模、流量、危害范围等)进行预先分析判断和结果的发布。现阶段通常也把泥石流预测预报简称为预报。

1.2 泥石流预测预报的类型

泥石流预测预报涉及多方面的内容,根据研究的侧重点和预测预报的依据,可分为区域预报和单沟预报、机理预报和统计预报、长期预报、中期预报、短期预报和警报等(表1)^[1]。表1是从理论上的预报分类,对于这些类型的预报,在实践中可以单独进行,也可以依据对泥石流的认识和资料掌握的程度以及预报的着重点,开展兼顾多种类型预报特点的综合预报。如:采用基于机理或统计的方法,进行单沟泥石流短临预报^[2]。目前,按时间和按范围的泥石流预测预报较为普遍,国内外研究最多的是单沟短期预警报和大区域中长期预测。

1.3 泥石流预测预报的层次

根据泥石流预测预报结果的内容和预报

^{*} 收稿日期:2005年9月6日

表 1 泥石流预测预报分类

分类依据	类型
时间尺度	中期、长期、短、短临预报
空间尺度	区域预报、单沟预报
预报依据的原理	统计预报、机理预报
预报结果的性质	定性预报、定量预报
预报结果的内容	事件预报、特征预报、灾情预报

结果提供信息的详细程度,预测预报有不同的层次(图1)。初浅的预报仅提供泥石流发生可能性的定性描述,进一步的预报可以细化到泥石流发生的概率,最详细的预报可以提供泥石流发生的基本特征(如流速、流量、规模、破坏力)和可能造成的灾害损失等信息,可直接用于泥石流临灾预案的制定。预报结果的内容越丰富,预报所需要的信息越多,难度也越大。

目前,国内外主要从以下4个方面进行泥石流预测预报的研究:以泥石流形成背景为主

预报研究,主要通过对泥石流起动条件和土体物理性质的研究来探索泥石流预测方法;以泥石流物理学特征为主线的监测预报研究,这方面的工作主要体现在依据泥石流的泥位、流速、声发射特征等研制的泥石流监测警报仪器。

2 国际研究现状

2.1 以泥石流形成背景为主线的预测预报研究

以泥石流形成背景为主线的预测预报研究是在区域和单沟两个层面上开展研究。

区域尺度上的研究主要体现在泥石流危险性区划研究中。根据泥石流形成背景条件(地质、地貌、植被等)和已知的泥石流沟分布和活动状况,进行泥石流危险度区划。前苏联早在1975年就出版了全国范围内的泥石流危险区划图,在危险区划分中,把全苏泥石流分

布划分为3个带、12个地区、28个省。日本政府早在20世纪70年代就进行了全国范围的泥石流危险性区划,确定出62 272条泥石流沟,102万户居民居住在泥石流危险区范围内^[3]。我国早在20世纪80年代就开展了泥石流危险性区划的研究工作。其代表性成果有中

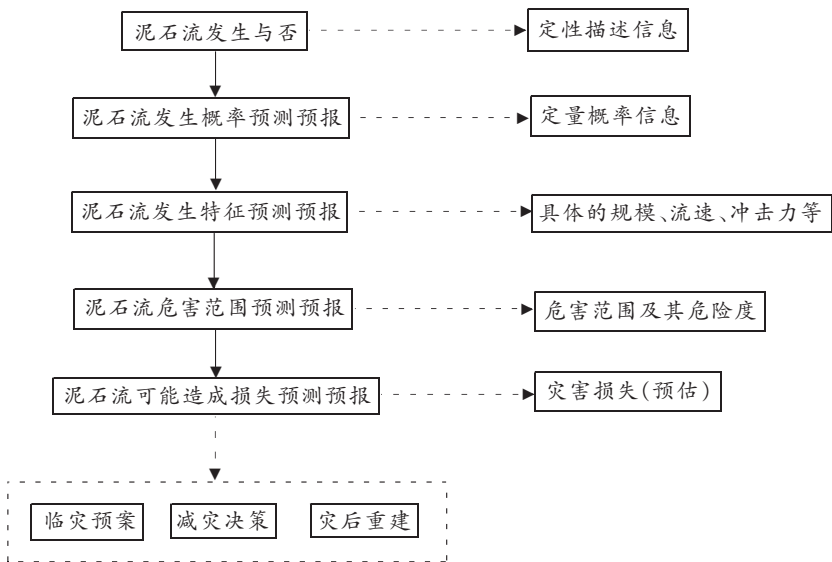


图 1 泥石流预测预报层次及其预报信息

线的敏感性分析,这主要体现在泥石流危险性区划研究方面;以泥石流形成的激发条件为主线进行的预测预报研究,主要是确定泥石流发生的临界雨量和建立与降雨相关的泥石流预报统计模型;以泥石流形成机理为主线的预测

科院成都山地灾害与环境研究所完成的一系列泥石流危险性区划图,如唐邦兴等完成的1:600中国泥石流灾害分布与危险区划图;钟敦伦、谢洪等完成的四川与重庆泥石流分布及

危险性区划图等。刘希林采用泥石流沟分布密度、洪灾发生频率、岩石风化程度系数、月降雨量变差系数、断裂带密度等 8 个指标将云南省昭通地区 10 个县市划分为 4 级危险区；韦方强、何易平等把 GIS 技术引入泥石流危险度区划研究中，完成了长江上游的泥石流危险性区划研究。此外，意大利、瑞士、美国、德国等也都进行了类似的泥石流危险性区划研究。

沟谷尺度上的研究主要有泥石流沟的判识、泥石流发生可能性（敏感性）分析和危险范围的确定这 3 个方面。泥石流沟的判识主要依据泥石流流域背景条件、泥石流活动历史和痕迹。钟敦伦、谢洪等根据四川境内成昆铁路沿线泥石流沟的特点，提出了当沟谷碎屑物质聚集总量与暴发泥石流的碎屑物质最低标准的比值大于等于 1 时，即可判定该沟为泥石流沟，做出可能暴发泥石流的预测。谭炳炎对流域地质、地貌、土地利用、人类活动等 15 种指标进行赋值和数量化分析，利用评分结果判定该沟泥石流发生的可能性（敏感性）。奥地利的奥里茨基提出了“荒溪分类及危险区制图指数法”，根据泥石流堆积特征（哑证）把泥石流扇形地划分为有危害、有威胁和安全区，并以红色、黄色和白色加以标注，便于政府和居民采取必要的措施，达到预警预报的目的。

意大利 L.Franzi 和 G.Bianco 通过对沟谷面积和泥石流体积分析，建立了二者的函数关系，并用来预测泥石流体积分。在瑞士，科学家和工程人员对于泥石流特征要素和与流域特征之间的关系进行了大量的研究，推导出两类参数之间的函数关系。如：Zimmermann 及其合作者发现，与泥石流冲出距离关系最密切的是流域面积，并提出了相应的计算公式。Rickenmann 研究了泥石流体积分与泥石流冲出距离之间的关系，并推导了相应的数学公式。随着计算机技术的进步，发展了利用泥石流运动模型，建立基于数值模拟的泥石流扇形地危险性预测预报模型。美国 J.OnBrane 建立了基于泥石流运动模型的泥石流危险区分析模型，

开发出相应的软件并使之商业化。意大利 D.D'Ambrosio 和 Gregorio 等建立了基于元胞自动机的数值模拟模型^[4]。S.D. Gregorio 和 R.Rongo 等建立了二维元胞自动机模型进行泥石流的数值模拟，进而预测预报。L.Fraccarollo 等利用一维圣维南方程模拟泥石流在沟道中的运动状况。香港 K.T.Chau 和 K.H.Lo 将 Takahashi 提出的理论模型和 GIS 相结合进行泥石流的数值模拟研究，取得了良好的效果。韦方强等利用泥石流运动数值模拟和 GIS 相结合的方法模拟了泥石流出口后的运动过程，建立了泥石流危险性动量分区模型，较 J.O'Brane 模型在精度和分区方法上有所提高^[5]。

2.2 以降雨条件为主线的泥石流预测预报研究

降水是目前导致泥石流暴发的最直接的触发因素。降雨泥石流预测预报的研究，主要是通过雨量资料的统计分析，确定泥石流临界雨量和触发雨量。目前众多的研究集中在此类研究中。

西班牙 J.Corominas 等通过分析东比利牛斯山 Llobregat 河附近的降雨资料和泥石流发生的关系，得出：（1）在无前期降雨条件下，短历时高强度降雨触发泥石流的条件是 24 小时降雨 190mm 左右，或者 48 小时降雨超过 300mm；（2）在有前期降雨的条件下，中等强度的降雨 24 小时降水达到 40mm 即可发生泥石流。P. Aleotti 以意大利西北部 P. Region 为例，通过研究降水事件与泥石流发生之间的统计关系，确定了该区导致泥石流发生的降水阈值^[6]。T. Glade、M. Crozier 和 P. Smith 等人，利用 Crozier 和 Eyles 提出的“前期日降雨经验模型”（Antecedent Daily Rainfall Model），研究了新西兰北岛地区的典型灾害区，证实模型的结果能够代表区域特定降雨条件下泥石流灾害事件的发生概率。F.G.Bell 和 R.R.Maud 等人建立了南非 Durban 地区临界降雨系数，其中考虑了前期累计降雨量对泥石流启动的影响，当降雨超过年平均降雨的 12% 的时候，

就会发生小规模泥石流;当超过 16% 的时候,会发生中等数量的泥石流事件;而主要的泥石流事件则与超过 20% 的年平均降雨密切相关。美国利用旧金山海湾地区 1982 年 1 月 3—5 日暴雨触发的 18 000 处泥石流的资料,通过分析多年平均日降雨强度与持续时间之间的关系,确定了 24 小时和 6 小时降雨指数阈值等值线,建立了预报模型,已在该区域实现业务化。

国内铁道部科学研究院西南分院利用成昆铁路甘洛预报试验区、陇海铁路拓石预报区、兰新铁路兰州预报试验区 157 沟次,黄河水利委员会天水、西峰、兰州水土保持科学实验站 195 沟次及宝成、成昆、北京市郊、湖南等地铁路沿线及地方泥石流灾害调查资料 80 沟次,总计 432 沟次的资料,提出了泥石流组合预报模式:

$$Y=R \cdot M, \quad (1)$$

$$R=k \left(\frac{H_{24}}{H_{24(0)}} + \frac{H_1}{H_{1(0)}} + \frac{H_{16}}{H_{16(0)}} \right)$$

其中, M 为环境动态函数,由流域面积、松散物质储量、坡度、植被覆盖率、不良地质发育程度、松散物质产状、沟床比降等要素确定; H_{24} 、 H_1 、 H_{16} 、 $H_{24(0)}$ 、 $H_{1(0)}$ 、 $H_{16(0)}$ 分别为 24 小时最大雨量、1 小时最大雨量、10 分钟最大雨量、区域 24 小时限界雨量、1 小时限界雨量和 10 分钟限界雨量。从单站的验证结果来看,该模式符合率最低可以达到 62%,各站的综合验证结果,符合率能达到 79%。

北京林业大学王礼先教授针对北京市泥石流灾害发生的特点,分别建立了泥石流临界雨量与最大 1 小时雨强的预报模型和泥石流临界雨量与 10 分钟雨强的预报模型。同时还尝试以前期实际 15 天雨量和发生灾害当日雨量为输入值,构建了泥石流 BP 神经网络预报模型,并用 273 条荒溪的雨量资料对预报模型加以检验^[7]。

中科院成都山地灾害与环境研究所和原兰州冰川与冻土研究所从 1961 年起,先后在云南东川蒋家沟、西藏波密古乡沟和加马其美

沟、甘肃武都火烧沟、四川西昌黑沙河和攀枝花三滩沟等进行泥石流及其降雨条件的观测,根据大量、长系列的观测数据,提出了蒋家沟泥石流预报模型:

$$R_{10}=5.5-0.098(P_a+R_i)>0.5\text{mm} \quad (\text{临界线})$$

$$R_{10}=6.9-0.123(P_a+R_i)>1.0\text{mm} \quad (\text{暴发线}) \quad (2)$$

式中: R_{10} 为 10 分钟降雨; R_i 为泥石流发生时刻前的当日降雨; P_a 为泥石流发生前 20 天内的有效降雨, $P_a = \sum_{i=1}^{20} R_i (K)^i$, K 为递减系数,取为 0.8, $i=1, 2, \dots, 20$, R_i 为泥石流发生前 i 天降雨量。该式预报提前时间为 17—20 分钟,报准率 86%,错报 3%,漏报 11%。

钟敦伦等通过对成昆铁路泥石流的研究,提出了泥石流的预报模式为:若碎屑物聚集总量/暴发泥石流的碎屑物质最低标准 ≥ 1 ,且日降雨量 $\geq 50\text{mm}$,则泥石流暴发,否则泥石流不暴发。

进入 20 世纪 90 年代,谭万沛和王成华等在国家自然科学基金“山地区域性暴雨泥石流与滑坡短期预报研究”课题中,以攀西地区为实验研究对象,建立了四川省攀西地区暴雨分级泥石流短期预报研究的概率模型:

$$\begin{cases} P_1 = P_{kb} \times P_{bd} \\ P_2 = P_{kb} P_{bj} + P_{kd} P_{dj} \\ P_0 = 1 - (P_1 + P_2) \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{kb} 为预报为 K 级雨量而实际出现暴雨的概率; P_{bd} 为预报为 K 级雨量而实际出现大雨的概率; P_{kd} 为预报区在暴雨时泥石流大面积发生的概率; P_{bj} 为预报区在暴雨时泥石流局部地段发生的概率; P_{dj} 为预报区在大雨时泥石流在局部地段发生的概率; P_1 为预报区泥石流大面积发生的概率; P_2 为预报区泥石流局部地段发生的概率; P_0 为预报区基本无泥石流发生的概率; K 的可能取值为: $K=1$, 预报日雨量为小雨到中雨; $K=2$, 预报日雨量为大雨; $K=3$, 预报日雨量为暴雨^[8]。

2.3 以泥石流形成机理为主线的预测预报研究

形成机理和形成条件是泥石流预测预报

的理论基础。因此,基于泥石流形成机理的预测预报研究成为学科的难点和前沿课题。泥石流的发生与松散固体物质的物理力学性质有密切的关系,研究人员从土体的物理力学性质入手分析泥石流的起动。

美国地质调查局 R.M.Iverson 通过大量室内和野外试验,研究泥石流起动时的土壤颗粒级配、孔隙水压力、粘粒含量等等土体内部物理性质的变化,进而通过监测这种变化预测泥石流的发生。意大利 F. Fiorillo 等通过分析降水和蒸发的关系,利用 Wilson 和 Wiezorek 提出的“Leaky barrel”模型分析累计降雨与土壤孔隙水压力之间的关系,识别出不同的暴雨对土体孔隙水压力的影响,提出了把一定强度降雨的持续时间作为预测泥石流起动的条件。M.Bertil 和 A.Simoni 研究了意大利阿尔卑斯山白云岩区流域降水强度和持续时间及其对应的水文反应之间的关系,建立了一个简单的水文模型,用以预测不同降雨条件下的水文反应,从而为理解泥石流的起动阈值提供了物理基础。英国 S.M. Brooks 等根据新西兰森林采伐区观测数据,建立了降雨-孔隙水压-泥石流滑坡灾害之间的关系模型,并确定了灾害发生的最大和最小概率阈值。

国内基于泥石流起动机理的预测预报研究以崔鹏的研究最具代表性。在系统分析泥石流的发生、发展和成灾特点的基础上,提出了准泥石流体的概念,分析准泥石流流体转化为泥石流体的力学过程,建立了以影响准泥石流体力学性质、便于测定的底床坡度 θ 、细粒含量 C 和水分饱和度 S_r 为自变量的应力状态函数。通过 100 余次模拟实验,揭示出随细粒含量的增加,准泥石流体弹性减弱,塑性增强,起动依次表现为加速机理、分离机理和连接机理,建立了泥石流起动临界条件数学模型和解析曲面,并进一步建立了泥石流起动的尖点突变模型。以泥石流起动机理作为预测预报的理论基础,认为泥石流起动时主要

因素的状态值,就是泥石流预测的临界值。对给定沟谷,沟床比降和固体物质组成特征相对固定并可测定,则由准泥石流体起动的临界条件即可确定出预测水量指标,提出了泥石流判断预测法、距离预测法和方差预测法。此研究以泥石流起动机理为基础,从理论上摆脱了目前单沟泥石流预测依赖长系列资料的局限,对于进一步研究单沟泥石流预测预报具有重要的意义。

总起来看,基于泥石流起动机理的预报目前仍处于初期阶段,距实用阶段还有一定的距离。

2.4 以泥石流物理特性为主线的预测预报研究

以泥石流物理特性为主线的预测预报,是通过仪器设备接收泥石流的物理特性,对泥石流发生和运动进行监测,依据这些信息进行泥石流预报和警报。铁道部和中科院曾研制过一系列泥石流监测报警及传感器,如超声波泥位报警器、地声报警器和次声报警器等,在泥石流监测警报中发挥了作用。目前,已经开发的泥石流警报仪器采用的原理主要有:

接触型泥石流警报:通过量测传感器(安装在泥石流断面侧壁的盆形凹槽里)被泥石流流体淹没之前的高电位 V_{k0} ,和传感器被泥石流淹没后沟通的电流从变压器流经限流电阻、传感器、泥石流流体、接地极又回到变压器的回路电压 $V_{ky}(V_{ky} \ll V_{k0})$,借助于 V_{ky} 和 V_{k0} 的显著差异,来判别传感器是否被淹没,从而确定和发报泥石流发生与否及其发生规模。

超声波泥位警报:依据到泥石流流深能够直观反映泥石流规模大小和可能危害程度的特点,利用回波测距的原理,测得传感器断面的泥石流流深推断泥石流的规模并发布预警报。

根据这一原理研制的 DFT-3 型遥测超声波泥位报警器于 1985—1986 年在云南蒋家沟内安装,共测得 14 次泥石流,并成功报警。

遥测地声警报:泥石流运动过程中摩擦、

撞击沟床和岸壁而产生震动,并沿沟床方向传递,称之为泥石流地声。其信号具有一狭窄的频率范围,且其卓越频率较其它频率成分(环境噪声)至少可以高出 20 分贝;地声信号的强度与泥石流规模成正比。利用泥石流地声的这些特点,即可通过信号接收与转化,对泥石流实施报警。根据这一原理研制的 NJ-2 型遥测地声报警器于 1985 年在蒋家沟试用,测报 13 场泥石流,成功报警 12 场(一场因为传感器故障而未完成测报)。

遥测次声警报:泥石流运动时在产生地声的同时,也会产生在空气中稳定传播的次声波。根据泥石流次声音频特征,利用次声原理研制了泥石流次声警报系统。该系统在中科院东川泥石流观测研究站实测实验,可提前 30—40 分钟发出泥石流警报,达到了预期的效果。

4 泥石流预测预报发展趋势和研究重点

尽管许多国内外学者把泥石流预测预报作为本学科的重要方向和前沿科学问题,集中精力开展多方面的研究,取得了诸多可喜的研究成果,在减灾中发挥了积极的作用。然而,由于泥石流现象的复杂性,目前对泥石流形成过程的认识尚不成熟,要达到较为准确的预测预报泥石流灾害及其损失的目标,还需要解决一系列科学和技术问题。在理论上应该进一步深化泥石流形成机理研究,确定不同类型泥石流形成的临界条件,建立基于泥石流形成机理和起动条件的预测预报模型,实现泥石流预测预报质的突破。在技术方面,要充分利用现代新的数学方法和技术手段,快速获取和分析与泥石流形成相关的信息,构建泥石流预测预报技术平台体系,实现预测预报的业务化和规范化。建议今后重点开展如下几方面的工作。

4.1 加强预测预报的理论基础研究

只有建立在泥石流形成机理和形成条件基础上的预测预报模型和方法,才能对泥石流做出科学的和相对准确的预测预报。目前,泥

石流形成机理研究非常薄弱,成为限制预测预报发展瓶颈,必须加强形成理论研究才能有所突破。对单沟泥石流预测预报来说,主要研究泥石流起动过程、起动条件和汇流机理。对区域泥石流预测预报来说,主要研究泥石流区域活动规律和控制区域泥石流活动的环境背景条件的耦合机制。进一步确定不同区域和不同类型泥石流沟谷暴发泥石流的气象、水文条件。

4.2 采用新理论新技术,提高预报精度

在今后的泥石流预测预报研究中,除了加强泥石流基础理论研究外,还要注意采用新技术和新方法,从不同的角度尽可能充分地利用现有对泥石流的认识和相对不完备的信息资料,获得尽可能好的预报效果。比如,利用可拓数据挖掘技术,尽量发挥有限数据的作用,取得较高的预报精度;利用数值模拟技术推演泥石流过程,进行情景设计,优化预报结果;充分利用 GIS 空间分析功能和遥感技术及时更新基础数据,为精细化的预测预报提供动态数据库。此外,还应注意探索人工神经网络技术、灰色系统理论、元胞自动机理论等一系列技术在泥石流预测预报中的作用,开拓新的预报方法和手段。

4.3 开发监测预警仪器

应进一步充分利用泥石流的物理特性,吸纳相关学科的最新成果,不断研制开发性能稳定、灵敏度高、误判率小的泥石流监测预警仪器,以满足对居民点和重大工程周边泥石流监测和报警的需要。

4.4 建立预测预报平台和监测预报体系

在我国广阔范围内进行泥石流的短期预测预报,必须建立与气象预报接轨的国家级预测预报平台,从宏观上指导减灾工作的开展。同时,还需要开展重点区域、沟谷的泥石流预测预报工作,构建区域和沟谷相结合、专业队伍和群众参与相结合的预测预报体系。进而,还要在对城镇和重大设施有严重威胁的沟谷

内布设仪器进行监测预警,对每条泥石流沟发生泥石流的可能性进行预报,确定出防灾和减灾的重点,并提前做好减灾预案。从而构成一个自上而下、点面结合的泥石流预测预报和监测预警体系。

致谢 本研究得到国家杰出青年科学基金项目、中国科学院知识创新工程方向项目和成都山地灾害与环境研究所知识创新领域前沿项目资助。

主要参考文献

- 1 崔鹏,刘世建,谭万沛.中国泥石流检测预报研究现状与展望[J].自然灾害学报,2000,9(2):10-15.
- 2 韦方强,崔鹏,钟敦伦.泥石流预报分类及其研究现状和发展方向[J].自然灾害学报,2004,13(5):10-15.
- 3 岩元贤,原田民司郎,平野宗夫.确定泥石流灾害

警戒避难的基准雨量[J].水土保持通报,1993,13(3):60-63.

- 4 D'Ambrosio D, Gregorio S D *et al.* First simulations of the Sarno debris flows through Cellular Automata modelling[J]. Geomorphology, 2003,54:97-117.
- 5 韦方强,胡凯衡, Lopez J L 等.泥石流危险性动量分区方法与应用.科学通报,2003,48(3):298-301.
- 6 Aleotti P. A warning system for rainfall-induced shallow failures[J]. Engineering Geology,2004,73:247-265.
- 7 王礼先,于志民.山洪及泥石流灾害预报[M].北京:中国林业大学出版社,2001.
- 8 谭万沛,韩庆云.四川省泥石流预报的区域临界雨量指标研究[J].灾害学,1992,7(2):37-42.

The Forecasting of Debris Flow

Cui Peng Gao Ke-chang Wei Fang-Qiang

(Institute of Mountain Hazards and Environment,CAS, 610041 Chengdu)

The Debris-flow is a kind of common natural phenomenon. Debris-flow forecasting, as a very important countermeasure for disasters mitigation, becomes a focus field of debris-flow research at home and abroad. This paper introduces the background knowledge of debris-flow forecast including its definition, type and forecasting level. A view to the international developing situation has been given. The main research results in this field in the recent years are introduced in China. Finally, some suggestions on the further development of debris-flow forecasting theories and technique are proposed.

Keywords debris-flow, forecast, research developing

崔鹏 中科院/水利部成都山地灾害与环境研究所研究员,博士生导师。1957年9月出生于陕西省长安县。1982年毕业于西北大学地理系。1985年在中科院成都地理研究所获自然地理学硕士学位,1990年在北京林业大学水土保持系获农学博士学位。曾分别于1992、1994和1995赴日本建设省土木研究所、美国伊利诺伊大学地理系和英国伦敦大学 King's College 地理系从事研究工作。1997年回国并入选“百人计划”,继续在成都山地灾害与环境研究所进行泥石流等山地灾害研究,2000年获国家杰出青年科学基金资助,主持国家自然科学基金重点项目、“973”和中科院知识创新工程方向项目。现任东川泥石流观测研究站站长、*Journal of Mountain Science* 主编。