

大山深处的 潜在威胁

文图 / 铁永波 龚凌枫



> 千嶂如屏 视觉中国 / 供



第一作者简介 铁永波，正高级工程师，博士研究生导师，地质灾害工程首席专家，自然资源部汛期地质灾害防御四川省专家组组长，长期从事地质灾害研究与科普工作。入选“自然资源部高层次科技创新领军人才”“中国地质调查局杰出地质人才”，等等。主持国家级及省部级项目 18 项，发表学术论文 120 余篇、出版专著 3 部、参与编著行业规范 4 部。创作国内首部地质灾害科普绘本《大山里的长尾龙》系列丛书，在《中国国家地理》《百科知识》等期刊上发表科普文章，受邀在 CCTV-10“十分科学”、CDTV-6“你好科学”等栏目开展地质灾害科普，在四川省自然资源党校培训班、平武县委党校及云南省曲靖市委党校、绥江县委党校等开展地质灾害防治知识培训近 100 场。

泥石流、滑坡和崩塌等地质灾害，本质上是大自然用特殊方式提醒我们：每一次人类在山区开展的活动，稍有不慎就会引发连锁反应。近年来，我国在地质灾害防治方面取得了显著成效，许多重大地质灾害隐患得到有效治理，人民群众生命财产安全得到保障。需要警惕的是，一些潜藏在深山中的地质灾害隐患，往往会在人们毫无防备的情况下突然暴发，对下游较远地区的人员和基础设施造成严重威胁。2024 年 7 月 20 日，四川省汉源县的一场大暴雨，诱发了严重山洪，造成巨大的生命和财产损失。2024 年 8 月 3 日，四川省康定市日地沟流域大暴雨引发的山洪泥石流冲毁了桥梁，高速公路上的车坠入溪流，导致重大人员伤亡。

每年 5 月到 10 月，是我国主汛期，也是暴雨频发、诱发地质灾害的时期。地质灾害对人类生命财产造成损失、对环境造成破坏，其形成既受制于自然环境，又与人类活动有关，往往是人类与自然界相互作用的结果。最为常见的地质灾害类型主要有泥石流、滑坡和崩塌三种。

泥石流

泥石流是指在暴雨等水动力条件作用下，由大量泥土、块石及漂木等固体物质组成的一种特殊流体，它通常从山涧溪流里冲出。泥石流运动时携带的大型石块在高速运动中发生碰撞，会发出震耳欲聋的声音，并伴随地面震动，在沟道里快速流动，民间很形象地称之为“走龙”“出蛟”。试想，泥石流携带巨石，以 10 米每秒的速度快速冲出，撞到房屋上，其破坏力是何等强大。最典型的案例就是 2010 年 8 月发生在甘肃省舟曲县的泥石流，这场灾害导致 1 700 多人遇难或失踪，是我国历史上史无前例的特大泥石流灾害。这场泥石流总体积 750 万立方米，平均厚度 5 米，把面积相当于 50 个标准足球场大小的流经区域完全掩埋。而引爆这场灾难的，竟是一场仅持续 45 分钟的暴雨，短



> 2024 年，日地沟泥石流冲击摧毁房屋



> 2024 年，日地沟泥石流淤埋沟口房屋



> 2010 年，舟曲县城泥石流冲入白龙江 王高峰 / 供

短时间，降水量达 97 毫米，这种大暴雨几十年都难得一见。最让人痛心的是，人们完全意识不到远处的深山里藏着如此巨大的危险，很多人还没反应过来，泥石流早已像一列失控的火车，几分钟便冲至县城，灾难就此降临。

泥石流的形成条件

泥石流的形成需要三个必要条件。一是陡峭的地形，这类地形通常为呈“V”形剖面的沟谷，坡度较大，相当于天然的“加速滑道”，既能让雨水快速汇聚到沟道形成洪流，又能借助高差赋予泥石流强大的冲击力，正如从高坡滚落的雪球会越滚越快，陡峭的地形也能让泥石流在短时间内获得巨大动能。二是水动力，水源是启动泥石流的“能量开关”，最常见的是短时强降雨，例如，1 小时降雨量突破 100 毫米的特大暴雨，在新疆、西藏等高寒地区，春季的冰雪融水则会扮演这个角色，每年 3—4 月，融化的冰雪形成特殊类型的泥石流，常导致公路中断，甚至形成堰塞湖阻断河流。三是松散物质，沟道内必须堆积足够量的破碎岩石、风化土层或人工堆积物，这些松散物质被水流浸透后，就会形成黏稠的泥石混合物。当这三个条件同时满足时，泥石流往往会在数十分钟内形成并造成破坏。值得注意的是，山区暴雨期间，那些呈喇叭口状、坡度陡峭且堆积碎石的山沟，其危险系数会成倍增加。这提醒我们：在山区活动时，不仅要关注眼前的天气变化，更要留意周边地形特征，提前做好防范准备。

泥石流的成灾类型

常见的泥石流一般水多土少，该类型称为稀性泥石流，还有一种类型土多水也多，其含砂量比例较高，这种叫作黏性泥石流。泥石流造成的破坏一般有三种，其一是冲击破坏，即泥石流直接冲垮房

屋，比如 2010 年的舟曲泥石流灾害，很多五六层楼高的房屋梁柱完全被冲垮砸断。其二是淤埋破坏，即泥石流发生后，大量泥浆将人和建筑等掩埋，而人一旦被埋在流体状的泥石流中，短短几分钟便会失去生命体征。其三是链式破坏，大规模的泥石流会堵住河流，导致水位上涨，进而淹没上游村庄，例如，2020 年发生在四川省丹巴县的梅龙沟泥石流，将小金川河堵住后，河水上涨，淹没了上游一个村庄和一个电站。

如何监测泥石流

人类在自然灾害面前非常渺小，那么，能否预判这些地质灾害，成为人们关心的话题。我国 1999 年开始系统防治地质灾害，通过诸多案例证明泥石流是可防可控的。

监测泥石流，需结合它的形成特征。其中一个常用的核心监测参数是暴雨，据统计，我国 90% 以上的泥石流由暴雨诱发。气象部门布设的气象雷达或雨量站会把异常的降雨预测值或实测降雨值提供给相关政府部门，政府部门可以将其作为制定预案的依据之一。另一个监测方向是水位变化，因为泥石流发生后，往往会在沟道里形成较高水位。一般采用泥位计来监测厘米级水位变化，将其安装在沟道水流上方，通过探头向水面发射并返回激光进行水位测算，一旦判定上涨水位可能会对生命财产安全产生威胁，就可马上展开应对措施。

泥石流的灾害防控

如何预防和减少泥石流灾害呢？前文提到，泥石流的形成有三个必要条件，我们无法改变自然形成的陡峭地形，也很难人为控制降雨，所以，唯有通过减少或控制流域物源，从而防控泥石流灾害。

首先，尽量减少在泥石流沟道中的开采挖掘活动，



＞ 2016 年，卧龙大熊猫保护区泥石流掩埋景区房屋



＞ 2019 年，高家沟泥石流挤压河道



＞ 2024 年，汉源县马烈乡暴雨山洪灾害

比如，山区很多公路在修路时会开挖两侧山坡，挖开后的弃渣就地堆在沟谷里，一旦暴雨来临，便为泥石流的形成提供物质条件，所以在工程建设时，对自然扰动形成的松散土体，应尽量外运，或建造固坡工程，将其稳固在原地。其次，发动当地居民参与环境保护，从事农业生产的当地居民在泥石流易发区域内开荒种地，也对生态环境和地质环境造成扰动，所以我国实行的退耕还林政策，实际上是为减少土壤侵蚀的一种手段。再次，安排住家户搬离危险区。有些老乡祖祖辈辈住在沟口，觉得“住了几十年都没事”，可气候变暖后暴雨来势愈加凶猛，从前的经验或许已不适用，政府规划要提前“排雷”，借助卫星影像标注出全域的“危险沟口”。

滑坡和崩塌

常见的滑坡和崩塌是两类相似的地质灾害，当然也有不同之处。滑坡是在降雨、地震、重力或工程扰动作用下，山上的岩体、土体沿山坡向下滑动的过程，也被形象地称为“垮山”。一些高位远程滑坡，速度可达一百到两百多千米每小时。研究表明，世界上最快的滑坡速度达到近三百千米每小时，相当于高铁时速。崩塌则是山坡上的岩体、土体突然脱离母体而崩落、滚动或堆积在沟谷。



＞ 2025 年，筠连滑坡三维实景影像

崩塌与滑坡最典型的相似之处在于：未发生之前，人们无法判断灾害类型是滑坡还是崩塌，造成的破坏也极为类似。但它们的运动过程存在很大差异，如果把滑坡比喻成具有一定水平运动距离的“滑滑梯”，那崩塌则像存在更大高差的“蹦极”，只有在一些极端条件下，高速远程的崩塌碎屑流才能产生八九千米的水平运动距离。

滑坡和崩塌的诱发因素

从诱发因素上讲，滑坡和崩塌有很多相似之处。最为常见就是降雨，一次强降雨过程可能会同时诱发滑坡和崩塌。第二个典型诱发因素是地震，比如汶川 8.0 级大地震发生后，一次性诱发了近五万处崩塌滑坡点。第三个是人类工程活动，修建房屋、公路、铁路、水电站都要开山切坡，这是诱发滑坡和崩塌的一种重要外动力因素。

滑坡和崩塌的危害

滑坡和崩塌造成的直接危害是损毁房屋和人员伤亡。如果滑坡崩塌发生在高山峡谷区域的河谷里，可能形成坝体堵住河流，进而造成次生灾害，如河道淤积、上游回水淹没等，当蓄水增多，坝体无法承受水压便会溃决，之

后暴发的洪水会对下游造成毁灭性冲击。例如，2018 年发生在西藏境内金沙江右岸的白格滑坡，堵住了金沙江，几十亿立方米的水蓄积在滑坡坝后面，上游许多村庄被淹。坝后蓄水溢流又冲毁了下游四川、云南境内沿途的很多桥梁、公路、村庄，造成直接损失达 70 多亿元。

滑坡和崩塌造成的危害影响范围广，破坏力强，不容小觑。例如，发生在云南的水库滑坡，云南境内的滑坡滑下来以后，进入水库形成涌浪，涌浪甚至运动到对岸四川省雷波县，浪头将一些停靠在水库边的小船打翻，造成人员伤亡，船毁人亡处距离滑坡几千米远，仍然受到了影响。所以，不管是遇到滑坡、崩塌还是泥石流，都不要围观，应尽早尽快远离。

滑坡和崩塌发生的征兆

滑坡破坏力非常强，而其发生之前，会出现一些征兆。比如，滑坡在发生前，地面出现方向一致、平行的多条裂缝，就说明这个坡体已开始滑动；再如，滑坡临启动之前，坡脚前部地面会泛出浑水，这说明滑面已经贯通，滑坡即将发生。

崩塌的能量转化过程非常快，在发生前也同样有预兆。最典型的是在崩塌大规模发生前，会出现岩石零星掉落的情况。很多人驾车行驶在山间公路上，发现上方掉石头，心存侥幸想快速开车通过，而这种想法往往是错误的。小石头零星掉落是崩塌即将发生的明



＞ 蒲溪海子（形成于 1933 年的叠溪地震滑坡）



＞ 2024 年，岷江流域震后残留滑坡与公路切坡形成坡面泥石流共存

显征兆，大规模的崩塌可能即将发生，快速后退、远远离开、阻止他人靠近才是正确选择。

如何监测滑坡和崩塌

在地表变形和抵抗变形过程中所表现出的特征，可用于滑坡监测，包括滑坡地表变形和地下水位等。例如，滑坡发生时整体运动，可在滑坡体表面部署多个卫星导航系统（GNSS）监测边坡位移，这种设备精度很高，滑坡滑动几毫米都能探测并记录下来。针对滑坡形成的地表裂缝，可在裂缝两侧安装裂缝计，当裂缝扩大时，就能测到数据，其精度也可精确到毫米

级。另外，针对滑坡内部变化情况，通过钻孔等方式在滑坡体安装地下水位探测仪、深部测斜仪等设备监测滑坡变形情况。综合地面和内部的系统监测，就可以系统把控滑坡总体变形情况，实现精准预警。

较之滑坡监测，崩塌监测和预警难度更大，因为崩塌速度快，难以即时反应。然而，也有可用于监测崩塌的设备，如倾角加速度计，它能够感应岩体倾斜变化速率，只需将其两个角固定在岩体上，岩体发生变形时，如果监测数据展现出匀速变形，可以认为岩体在持续稳定变形，崩塌可能不会瞬时发生。但如果监测变形速率快速增加，监测曲线及预



> 2018 年，金沙江白格滑坡

警信息会立刻发送至监测人员，提醒人员撤离。

在无人居住区，很难通过早期征兆来发现滑坡预兆信息，又该如何进行监测呢？如今可以选择运用卫星监测技术，在空中给大地拍一系列照片，提供

给专家判断。根据滑坡的形态和特征，专家可以分辨出滑坡可能发生的地点及其威胁范围。另一种技术叫合成孔径雷达干涉测量（InSAR）探测，通过卫星上合成孔径雷达或机载雷达系统两次或多次对同一区域的雷达观测，利用回波信号的相位差生成干涉图，反演地表形变，观察地表是否持续或加速变形。

滑坡和崩塌的灾害防控

滑坡和崩塌发生同样有陡坡、软弱岩体、触发因素三个必要条件。地质构造无法人为控制和改变，但护住坡脚、减少扰动，便可主动对滑坡和崩塌进行灾害防控。第一，避免在山腰“掏心窝”。有些房屋建造时，为贪图良好视野，把山坡削成“悬崖”，稍微来场大雨整个坡都会垮塌。福建一



> 2020 年，梅龙沟泥石流冲刷形成的滑坡

村庄有三户人家切坡建房后，暴雨直接导致山体滑坡。如今规定削坡高度超5米必须做护坡墙，给山体“系上腰带”。第二，给危岩戴“安全帽”。对于那些摇摇欲坠的危岩体用锚杆像“发卡”一样固定住巨石，坡脚砌挡土墙当“靠山”，再在坡面挂钢丝网防碎石掉落。重庆一个公路段的危岩，经这套“组合拳”治理后，十年来都没再塌方。第三，给山坡定期“体检”。地质灾害监测人员是山体的“家庭医生”，他们用裂缝计、雨量计等“听诊器”，24小时观测坡体变化。云南有一个村庄，依据裂缝扩大后的警报，提前三天转移了78人，成功躲过山体崩塌灾害。第四，避让才是大智慧。对于治理成本过高的危险斜坡，最经济有效的方式便是“惹不起躲得起”。贵州的一座县城将新开发区整体后撤300米，多花了拆迁费，却避开了千年古滑坡体。所以，无论是滑坡还是崩塌，防控的核心都是“顺天时、量地利”，用科学规划和监测技术，在自然力量面前找寻安全生存之道。

当大自然显露出它的真实力量时，那些轰鸣的泥石流和坍塌的山体，其实是地球“新陈代谢”



＞ 2022年，汶川飞沙关滑坡

的自然表现。与其说我们在对抗自然，不如说是在寻找与地球脉搏共振的智慧——就像给危崖装上“心电图”（位移监测仪），用卫星给山脉做“全身扫描”（遥感监测），再用天然植被给大地“敷面膜”（生态修复）。随着人工智能技术的发展，现在基本上能通过智能预警系统搭建“安全结界”，如在滑坡体上安装的传感器，精度能达到感知针尖粗细的位移，能够用于捕捉滑坡的微小变形。同时，人类正在充分发挥才智，通过工程手段重新找回人与自然之间缺失的平衡，比如用锚索给山体“系安全带”、通过种植深根植物构建“生态护甲”，等等。

这些努力背后有个温暖的真相：防灾不是要征服自然，而是像老友相处那样，既懂得山川的脾气，又掌握化解危机的方法。当我们学会用无人机的“眼睛”读懂山体变化，用生态工法恢复土地元气，就是在书写新时代的“山水情书”。

第一作者单位 / 中国地质调查局成都地质调查中心

（西南地质科技创新中心）

（本文编辑：何陈临秋）