

# 小流域暴雨洪水的河槽侵蚀搬运作用

王珍兰 冯清华

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

## 前言

1981年8月陕南暴雨期间,该地区普遍发生了滑坡和泥石流灾害。按其参与泥石流运动的固体物质状态及过程,可分为两类,即山坡物质参与运动和河槽物质参与运动的泥石流过程。前者是纯粹的重力作用,通常称为重力泥石流;后者的形成必须具有一定的水动力条件,称为水动力泥石流。该地区1981年夏季暴雨期间所发生的泥石流,规模较大者均属后一种类型。这种泥石流具有一定的周期,在山地侵蚀和泥石流运动中具有普遍意义,是山地泥砂运动的一种特殊形式。本文主要论述宝鸡至广元铁路沿线这类泥石流的发生过程及其机理。

## 一、自然地理概况

宝鸡到广元这段铁路地处秦岭南坡、嘉陵江上游河谷。由于秦岭山地目前正处于强烈的上升运动,河谷强烈下切,嘉陵江及其两侧支沟流域都是高山峡谷,流域相对高差300—800米。出露地层主要为古生代的碳酸盐岩和碎屑岩,以及不同时期的火山岩,此外,在河谷地带普遍分布有黄土。其岩性基本上可划为二大类:一类以花岗岩为主;另一类以片岩、页岩、板岩、千枚岩以及坡积黄土为主的软弱岩石。坚硬岩石分布的河谷、山坡较完整,泥石流中固体物质来源主要为河流加积物;在软弱岩性分布地区,泥石流的物质主要来源于各种重力侵蚀体。两类不同物质来源的泥石流,其形成过程和流动特征也明显不同。

该地区自然植被大多为人类活动所破坏,退化为次生林或灌丛、草丛以至坡面裸露,林地减少,失去水分涵养,暴雨冲刷、山洪暴发时泥砂石块俱下。

秦岭南坡,海拔1,000—2,000米,为温带亚热带过渡区,属半湿润山地气候。春季干旱,夏季炎热多雨,尤其多阵雨和暴雨。年降雨量600—900毫米,其中7—9月约占年总降水量的50%左右。该地区还具有明显的山地气候特征:降雨随高度递增,多地形雨,降水量的变化趋势是自南向北递减。由于山地地形的影响,暴雨强度的局地变化也很大,山区谷间降雨量及强度差异较大。如1981年暴雨强度的分布以几个山头为中心,向周围递减。

## 二、小流域河槽的侵蚀搬运及河槽结构特征

### 一、侵蚀搬运特征

1981年8月,自秦岭南坡到略阳县境内宝成铁路沿线,各种山地灾害(浅层滑塌、滑坡、泥

石流等)普遍发生,但以水动力作用为主而形成的泥石流,主要发育在黄牛铺—草凉驿区间及略阳附近。这主要与地形地质条件及暴雨分布有关。调查的51条泥石流沟中,流域面积在2平方公里以下者占88%。在泥石流过程中,各流域的沟谷都具有明显的下切侵蚀,下切侵蚀深度一般为1—3米,其中流域面积较大者兼有侧蚀现象,并且逐渐趋近于普遍山洪的侵蚀和搬运。

山区小流域的侵蚀搬运与通常洪水的侵蚀有着本质上的区别。从形态上看,前者不仅比通常洪水搬运具有大得多的泥砂搬运规模,而且基本上不存在水力搬运通常所具有的颗粒分选。

山区稀遇暴雨洪水所引起的小流域沟谷加积物的侵蚀和搬运,一次侵蚀搬运物质总量即达2—5万立方米/平方公里,相当于流域平均侵蚀厚2—5厘米,与同类面积的山地平均剥蚀速率2.5—12.6米/千年相比较,即相当于20—200年平均剥蚀量的总和。小流域一次泥石流侵蚀搬运的规模是相当惊人的,在现代河流各支沟流域的物质运动过程中起着重要作用。山区小流域通常洪水携带固体物质的能力有限,大量的固体物质(主要来源于支沟和沟岸坍塌、滑坡等)遗留在沟槽内成为沟底加积物。这种加积不是由于侵蚀基准面的变化而形成,而主要是由于固体物质和洪水输移能力间的不平衡造成的。加积层的表层由于受到常年洪水的分选,细颗粒被带走,留下粗大颗粒形成河槽铺石层(河槽加固层),山地小流域的洪水与河槽结构特征使泥砂的侵蚀搬运具有某种特殊性。谷底加积物对稀遇洪水的作用呈现出极不稳定状态,灾变的规模取决于洪水的规模(洪水频率、流速、水深等)及固体物质贮备量。固体物质贮备量取决于河槽加积的速度,而加积速度的大小又取决于源头地区重力侵蚀的发育程度。总之,它是流域岩性、植被、水文气象等因素相互作用和制约的结果。

宝成线北段地区,经1981年泥石流后,形成区沟床大多基岩裸露,但是从冲出沟口的固体物质质量来看,规模并不算很大,其侵蚀量远小于成昆线汉罗沟和利子依达沟。这是由于这里谷底加积层较薄(1—3米)的缘故。

## (二) 固体物质来源

山区小流域多发源于山麓带,以水力作用为主而形成的泥石流,其固体物质主要来源于组成河床物质的沉积物,以及少量的重力地质侵蚀物质。

如1981年北星沟,泥石流共冲出固体物质18万立方米。在距沟口1公里处左岸山坡有一较大的原生黄土滑坡,但由于远离沟床,仅使一些房屋建筑遭到破坏,滑坡的固体物质并未参与河槽的泥石流运动。该流域内无其它不良地质现象。因此,18万立方米固体物质均来自河床本身的下切和侧蚀。

位于红花铺车站的庙沟,1981年泥石流掩埋车站三股道,沟口堆积区淤高3.5米左右,约在5—15分钟时间内,冲出固体物质6万立方米。流域内坡积物不厚,不良地质现象少,冲出的固体物质中约80%以上来源于沟槽。

## (三) 河槽结构特征

由于小流域通常暴雨洪水的侵蚀搬运能力有限,因此一般的风化剥蚀在河槽中不断加剧,形成了粗细混杂的河槽加积物。在现场调查中,由1981年泥石流侵蚀后的河槽残留物可以看出,本地区河槽加积层一般厚2—3米,表面铺石层为粗大颗粒,下部为较细的混杂颗粒。

河槽加积物和泥石流沉积物的物质组成,采用野外测量和室内分析的联合方法,大于2厘米的颗粒在野外用线格法则,小于2厘米者取样带回实验室分析,综合成颗粒全分析曲线。由颗粒全分析结果可以看出,河槽泥石流的固体物质颗粒都比较大,粒径达2厘米以上者占70—85%。这是由于在河槽加积过程(滑坡、崩塌、源头沟谷侵蚀等)中受到一定的水流冲刷的结果。

河槽泥石流的粒度组成特征,中值粒径 $d_{50}$ 为6.2—20.0厘米, $d_{90}$ 为39.3—73.0厘米。无论

是 $d_{10}$ 还是 $d_{50}$ ，都较其它各地的泥石流为大。组成物质粒径大，细粒含量少，是河槽泥石流与山坡重力泥石流的显著区别。

### 三、小河槽泥石流形成的暴雨洪水条件

泥石流是小河槽中加积物大规模运动的表现形式，产生这种运动的暴雨洪水条件是：

1、暴雨。1981年7月24日—8月25日，陕西汉中和秦岭山区西段，出现了历史上罕见的连续特大暴雨。仅8月份，降雨量就达年平均雨量的50—82.0%。尤其8月13—24日的暴雨过程，是“81·8”特长连阴雨中降水量最大的时段。这次暴雨过程持续时间10—13天，降雨总量就达300—500毫米，日平均雨量达30—50毫米。从8月14—19日几乎每天有暴雨。“81·8”暴雨的主要特点是连续降雨时间长，因而使这些地区土壤过饱和，江河横溢，又遇21日的一场大面积、高强度、区域性暴雨过程，导致了该地区绝大部分滑坡、泥石流等灾害同时发生于这场暴雨之后。

8月21日的降雨，均达到大暴雨（24小时内降雨量100.1—200毫米）量级，但大部分未达到历史最大值；最大1小时雨量为16.0—33.4毫米，仅个别站点超过历史最大值，并且远小于其它地区同类型泥石流的降雨条件（如四川汉罗沟60毫米/小时，成昆线50毫米/小时，北京密云60毫米/小时）。但总的来说，这次暴雨仍是一场时间长、雨量大、强度也较大的暴雨，由于山地地形的影响，暴雨中心也较多。

这次暴雨的重现期，短历时（10分，60分，24小时）为22—25年一遇；最大7日暴雨的重现期较大，红花铺、黄牛铺、略阳为500年一遇，双石铺为300年一遇，凤州为200年一遇。

根据现场调查和降雨资料的分析对比，发现1981年泥石流普遍暴发的时间，基本在1小时雨量峰值之后。这表明，宝成线北段水动力型泥石流在前期土壤饱和的情况下，其暴发与1小时雨强有关，且泥石流的发育程度和分布也与暴雨强度有密切关系。如宝成线北段泥石流较发育的几个地区（黄牛铺、凤县、略阳），降水量、连续降雨日数、连续降雨总量、短历时降雨强度均较大；反之，在一些远离降雨中心的地区泥石流则不发育，当然地质条件起了很大作用。

综上所述，在暴雨历时长、分布广，土壤前期含水量达饱和的条件，在一定强度（小于其它地区同类泥石流的降雨强度）的降雨激发下，形成了泥石流。

2、洪水。由于长时间的连续暴雨，导致了嘉陵江上游河水泛滥，流量猛增，出现了历史上罕见的特大洪水。从几个水文站点的实测资料可以看出，“81·8”洪水的重现期较长，达250—500年一遇。

小流域河槽泥石流的洪峰流量、流速、水深等水力要素，由现场洪水调查的方法得出。将洪峰模量 $M_m$ 和流域面积 $F$ 的相关点子点在双对数纸上，可见点据具有明显的带状分布，接近直线趋势。洪峰模量随流域面积而递减，因而存在着负相关关系。在水文计算中，一般认为相关系数 $|\gamma| > 0.8$ ，相关分析成果方可用。但对于这种小流域河槽泥石流来讲，泥石流的洪峰流量不仅取决于流域面积的大小，还取决于流域内降雨的强度以及固体物质的贮备量等其它因素，因而泥石流流量与面积的相关关系要比较大流域的洪峰流量和它的面积之间的关系复杂得多。另外在进行相关分析时，我们只粗略地认为该地区1981年的这次泥石流具有相同的重现期，实际上各流域洪峰流量的重现期可能会存在一定差异。由于上述原因，我们认为该相关关系尚可采用。

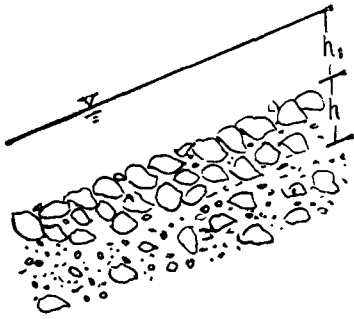
进行大沟和北星沟流域现场调查时，在流域的中下游均可见到老泥石流残余沉积物的天然石堤。据当地老乡说，该地区光绪24年（1898年）曾发生过一次特大洪水。由石块的直径和天然石堤的形态可以判断出，1898年的泥石流规模不会亚于1981年，两次间隔83年。因而可以初步认

为, 1981年该地区泥石流的重现期为80—100年一遇, 上述相关直线的重现期大约为100年一遇。

虽然由测站记录到的短历时暴雨强度并不很大, 但无论大河或小沟所出现的洪水规模都是历史罕见的。据初步分析, 造成这种暴雨与洪水频率不一致的原因大致有以下两方面: 一是由于山区降雨具有明显的垂直地带分异性的特点, 流域内实际最大暴雨与附近台站记录的暴雨往往悬殊很大, 这种暴雨的强度和范围受局部地形影响较大, 强暴雨往往集中发生在山坡上而无记录的流域深处; 二是由于连续降雨近一个月, 土壤均达饱和状态, 河道流量猛增, 这种特殊的前期降雨影响可能是造成这次洪水与短历时暴雨频率相差较大的另一种原因。

#### 四、河槽泥石流的运动机理和水力条件

如上所述, 河槽泥石流中的固体物质绝大部分来自河槽沉积物, 其运动特点是泥砂输送率高, 颗粒粗大而缺乏分选。由于山区河槽的铺石层粒径较大, 与一般洪水的推移不大相同, 因而泥石流能夹带大块的漂砾, 很难用通常的水力搬运来解释。



如图所示, 河槽沉积物上层为铺石层, 其颗粒粗大、互相镶嵌, 因而层移移动或重力移动不可能发生在铺石层内, 而一般则可能发生在内摩擦系数相对较少的下层混合泥砂层内。因此, 铺石层厚度可视为发生泥石流最小厚度。在成昆线与宝成线的泥石流调查中, 该层厚度约1.5—2.3米。

日本学者高桥保在应用拜格诺的分散压力和膨胀体理论的基础上认为, 泥石流是河槽中某一深度(取决于松散层的剪力分布)的沉积层饱水后在自重作用下发生剪切, 随之膨胀并与一定厚度的表层水流结合而形成的。按高桥保公式计算的典型泥石流的临界坡角范围为 $14.9^{\circ}$ — $22.9^{\circ}$ , 而我国大多数典型的河槽泥石流形成区的纵坡均小于此临界值。这说明, 仅靠沉积物重力沿河槽方向的切应力不足以使河槽物质发生剪切运动, 而使之产生运动的另一部分剪力可能来自稀遇洪水, 特别是急流条件下洪水对河槽的拖曳力以及洪水由于固体物质不断增加而增大的重率。根据实际调查的河槽活动层厚度计算出的 $h_1$ 与实际调查值大致相近。即在小流域河槽中, 当纵坡不是很大的情况下, 只要水力条件

$$h_1 \geq \left( \frac{\tan \phi}{\tan \theta} - 1 - \frac{p}{c_s (\sigma - \rho)} \right) \times \frac{c_s (\sigma - \rho) h}{p \left( 1 + \frac{1}{\cos \theta} \right)},$$
 在洪水拖曳力和重力的共同作用下, 泥

砂层间的剪力分配有可能使整个河槽活动层发生成层运动而形成泥石流。泥砂运动的性质大概类似于层移运动或颗粒运动, 这两者在本质上没有区别。

#### 结 语

宝成线北段1981年暴发的泥石流类型俱全, 本文着重论述了小流域以稀遇暴雨洪水为水力条件侵蚀搬运所形成的河槽型泥石流。这种泥石流是在稀遇的暴雨洪水条件下发生的河槽加积物的大规模流动, 其固体物质主要来源于沟床本身的下切侵蚀和少量的侧蚀。近年来, 在一些植被覆盖比较好的地区, 这类泥石流也经常出其不意地暴发, 如1972年四川泸沽、西昌地区, 北京怀柔县中部山区; 1981年成昆铁路利子依达沟及宝成线等; 1982年陇海铁路华山段。因此有必要对这类泥石

# 试论泥石流地区的河道演变

李 鸿 琏

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

泥石流含有比一般洪水多5—50倍的泥沙石块,刹那间将数以千百万立方米计的沙石冲进江河,使汇入段的河道发生突变,其变化之快,非一般山区河流所能比拟。一场泥石流,即可使河道面目全非:或堵塞河道,聚水成湖,城镇、道路浸没于汪洋回水;或推移河道,易槽改道,水流横溢,漫流成灾。而其长期大量的淤积所引起的河道演变,则更严重地威胁着山区的国民经济建设,这在我国西南和西北的某些山区尤其突出。例如,泥石流堆积在金沙江河道中的众多险滩,严重影响航道开发;小江、白龙江、渭河等河道中的泥沙大量淤积,河底上涨,带给工矿、交通、农田和人民生命财产的危害,均日趋严重。另外,泥石流的快速侵蚀、搬运和堆积作用,迅速改变着河谷地貌发育的正常过程,掩盖了新构造运动引起的水流作用、冲淤消涨及谷地发育的真实迹象。由此可见,泥石流地区的河道演变,是河流泥沙工程学和河流地貌学研究的一个新课题。

我们虽从事泥石流研究多年,而于河道演变确属外行。但在甘肃武都城防工程审议中遇到白龙江某段的疏浚问题,又想起上述河道开发中存在的问题,深感与泥石流关系密切。兹据白龙江流域的工作,并引证与此地相似的云南小江等地的资料和前人的分析,试就泥石流最发育区的河道演变作些粗浅分析。

## 一、水沙特征

以白龙江中游和小江中下游为例。那里泥石流分布集中,活动频繁,是我国目前泥石流最活跃的地区之一。这两个流域的上游区,植被条件较好,水土流失轻微。泥石流对于干流河道作用明显,在白龙江流域沿江长约200公里,两岸有泥石流近800处;小江流域长60—70公里,有较大泥石流150多处。为剖析泥石流地区河道的泥沙石块(以下简称泥沙)的来源、水沙平衡和河道

流的发生运动机理进行深入的探讨。

我们根据野外实测资料,得出了洪峰模量与流域面积的相关关系。此结果具有明显的带状分布规律。由于调查资料仅限于1981年,因而只得出重现期大约为100年的相关关系。其它不同重现期的相关关系还有待于进一步工作,这将有助于该地区泥石流的预测。

本文还在拜格诺和高桥保理论的基础上,考虑了稀遇洪水急流条件下对河槽的拖曳力,将静力平衡方程下滑力部分增加一项洪水的拖曳力后,计算所得出的水力条件 $h_1$ 与实测的 $h_1$ 值相差不大。