西藏地区小流域泥石流洪峰流量计算方法与改进

黄 凯[1,2,3], 陈晓清[1,2], 李 强[1,2,3], 杨东旭[1,2,3]

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 在西藏地区泥石流野外调查中发现,泥石流形成区下限下延至流域中游、流通区沟道形态复杂、沟道交汇等现象明显。因此,基于全流域特征参数的雨洪法计算难以得到准确的泥石流设计参数。针对此类泥石流沟道,采用了子流域叠加雨洪法计算的方法。以西藏山南地区某泥石流沟为例,针对支沟面积>25%的沟道进行了计算和讨论。利用三角形概化泥石流流量过程线,计算了交汇后主沟泥石流的洪峰流量。比较了全流域雨洪法和划分子流域雨洪法的计算结果,认为子流域法能更准确地反映支沟泥石流在整个流域内的影响和作用,可为防治工程设计提供参考。

关键词: 泥石流; 洪峰流量; 小流域; 雨洪法

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2012)06-0123-06 **中图分类号**: P642.23

Modified Method for Peak Discharge Calculation of Debris Flows in Southwest Area of Tibet

HUANG Kai[1,2,3], CHEN Xiao-qing[1,2], LI Qiang[1,2,3], YANG Dong-xu[1,2,3]

(1. *CAS Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*;
2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan* 610041, *China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Debris-flow valleys in Southeast Tibet were found distinct in their channel structure. The source area of debris flow usually extends to the middle reaches, with cross and confluence of the channels. The traditional method based on the full-valley parameters is inadequate to provide accurate parameters for engineering designs. We proposed a new method to calculate the peak discharge of debris flow. Based on field survey in Shannan Prefecture of Tibet, a traditional valley was measured. We calculated the hydrograph with the triangle model and concentration time of sub-basins with large areas(>25% of full-valley area), and then obtained the converged hydrograph and corresponding peak discharge, which is amended by the concentration times of two sub-basins. Comparing the results of the full-valley method and the proposed new method, we concluded that the proposed method accurately captured the contribution of dynamic sub-basin discharges and is of greater applicability.

Keywords: debris flow; peak discharge; small basin; flood method

泥石流洪峰流量可以直接反映泥石流的规模,是泥石流特征的重要指标和泥石流危险性评价的主要参数之一。同时,也是决定泥石流防治工程的结构、强度和尺寸的因子。所以,取得泥石流洪峰流量值是防灾减灾研究工作的重要内容之一。康志成、沈寿长、吕儒仁等[1-3]对泥石流洪峰流量的研究和计算进行了总结,泥石流流量计算主要有配方法、形态调查法、综合成因法和数理统计法。形态调查法应用较为广泛,该方法的流量计算主要根据所勘测的过流断面面积乘以流速而得。公式为:

$$Q_c = W_c \cdot V_c \tag{1}$$

式中:Q_c——频率为 P 的泥石流洪峰流量(m^3/s);W_c——实际勘测所得的断面面积;V_c——计算所得的流速。

野外许多泥石流沟地貌复杂,难以取得泥石流沟道参数。对于无法测量过流断面的泥石流沟道,主要

收稿日期:2011-11-14 修回日期:2012-01-10
资助项目:国家重点基础科学(973)研究发展计划项目"中国西部特大山洪泥石流灾害形成机理与风险分析"(2011CB409900);国家自然科学基金项目(41072270)
作者简介:黄凯(1988—),男(汉族),浙江省永嘉县人,硕士研究生,主要从事泥石流防治方面的研究。E-mail:skyhawkkkkk@163.com。
通信作者:陈晓清(1974—),男(汉族),四川省遂宁市人,博士,研究员,主要从事山地灾害防治研究。E-mail:xqchen@imde.ac.cn。

采用配方法，按暴雨洪水流量乘以泥石流修正系数而得。该方法得到了深入地研究和广泛地应用。数理统计法要求有长时间的泥石流观测资料，中国科学院东川蒋家沟泥石流野外观测站有多年观测数据，有学者用小波变换法和统计法对比研究蒋家沟流域的泥石流年均流量[4]，但目前我国在这方面的工作仍然不足。在缺乏基础资料的中小流域，形态调查法和雨洪法是主要手段，同时也是《泥石流灾害防治工程设计规范(DZ/T0239—2004)》的推荐方法。

泥石流沟可分为3部分，即上游形成区、中游流通区和下游堆积区。在西藏地区拉萨河、雅鲁藏布江河谷地区考察发现，流域上游主要为寒冻风化，泥石流物源累积缓慢，储量少，仅仅供应清水动力；流域中游堆积了巨厚沉积物，是泥石流的主要物质来源，最终堆积到下游区域。因此，流域内沟道复杂，常有交汇的现象。针对该类泥石流沟，常用的泥石流洪峰流量计算方法都存在着较大的误差，需要重新考量。线性工程，如公路、铁路、输油管道等，通过泥石流沟内不同的区段，采用不同的防治措施。针对该地区泥石流沟特征，在防治工程设计时考虑更加合理的泥石流洪峰流量计算方法。

1 泥石流洪峰流量计算

1.1 泥石流洪峰流量计算的基本单元

泥石流研究通常以小流域为基本单元。对于小流域的定义，水利上通常指面积小于1 000 km^2的流域，这种划分方法是因为水工工程的特征，充分考虑水资源利用和防洪的需要。泥石流小流域的概念，与水利上的不同。通过西藏、四川地区大量的泥石流沟统计，泥石流沟流域面积一般是0.5～35 km^2[5]。对四川省攀西地区1 437条泥石流沟统计结果表明，流域面积0.4～50 km^2的泥石流沟占总数的90.2%，面积<0.4 km^2的泥石流沟占5.1%，面积>50 km^2的泥石流沟占4.7%[6]。可以得出，泥石流范畴上的小流域面积通常<50 km^2，而频繁活动的泥石流沟通常在3～30 km^2之间。

拉萨河、雅鲁藏布江河谷两岸海拔高差大，支沟泥石流活动强烈。野外观察到的泥石流沟流域形态复杂，常见有多沟道泥石流沟。主要有两类(图1)：A型各条泥石流沟均有独立的沟道，在出山口形成大规模的堆积扇群；B型主沟流域内包含1个或多个小支沟泥石流。A型泥石流流域群，一旦被误判为一个泥石流沟，计算的泥石流洪峰流量结果被严重夸大；B型沟道因有面积较大的支沟存在，对流域内的泥石流洪峰流量结果产生影响。

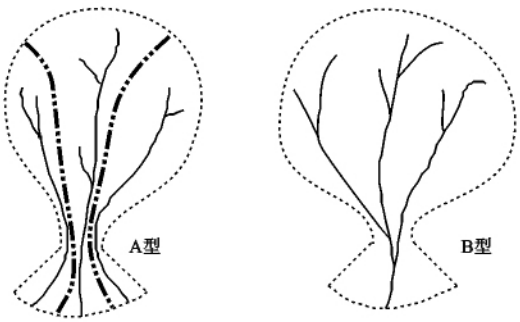


图1 多沟道泥石流沟流域示意图

1.2 雨洪法及其存在的问题

目前各省均编写了适合本地区的水文计算手册。按《四川省中小流域暴雨洪水计算手册》里的水科院推理公式法计算公式推求设计洪水，公式为[7]：

$$Q_B = 0.278\psi i F \tag{2}$$

式中：Q_B——最大流量(m^3/s)；ψ——洪峰径流系数；i——平均暴雨强度(mm/h)；F——流域汇水面积(km^2)。

设计泥石流洪峰流量计算采用配方法。

$$Q_c = (1+\varphi)Q_B D_c \tag{3}$$

式中：Q_c——频率为P的泥石流洪峰流量(m^3/s)；Q_B——频率为P的暴雨洪水设计流量(m^3/s)；φ——泥石流泥沙修正系数；D_c——泥石流堵塞系数。

小流域暴雨洪水最大流量的计算方法大多是用于单沟模型。组成多沟道泥石流沟按单沟模型计算存在几个问题：某些堆积扇是几个泥石流沟共同堆积形成的，而这些泥石流沟是相对独立的流域。由于泥石流沟道的参数各不相同，产流时间和汇流时间也不相同。这样使各条沟道的径流过程存在差异，因而当汇集到一起时存在峰值叠加的现象。采用雨洪法计算设计洪水流量的计算是通过取最长沟道的参数进行计算，忽略了其他沟道的影响。

泥石流运动受冲淤影响沟道不固定，左右游移，特别在堆积扇上游突出，是当泥石流规模较大时，并不一定从已经存在的沟道流出，随时可能堵塞旧沟，改走新道，甚至出现冲切多条小沟道的现象。许多大型堆积扇经过多次泥石流冲淤变化及改道之后常会形成多条岔流，呈散射状归入主流。多沟道泥石流沟的两类沟道形态，并不总是单独出现的，在某些条件下会相互演化。B型沟道则可能在流量的降幅过程中淤积旧沟，而后期洪水则侵蚀出新的沟道。

1.3 泥石流过程概化曲线

在缺乏实测降雨和流量资料的地区，河流的设计洪水过程线多采用概化过程线，常用的有三角形、五

边形和曲线形。暴雨激发泥石流,泥石流过程与暴雨洪水过程类似,因此对泥石流过程进行概化采用暴雨洪水过程概化方法。

假定短历时暴雨形成的洪水形态可以概化为一个三角形,相比之下长历时降雨形成洪水就可概化成多峰三角形洪水过程线。泥石流形成的主体供水是发生降雨,即从泥石流发生当次降雨开始到泥石流发生时刻为止的降雨量;从本次降雨开始到泥石流结束时的降雨称为有效降雨,有效降雨能增大泥石流的规模和历时[8]。在有效降雨段之前的降雨对泥石流流量贡献很小,因此在计算泥石流洪峰流量时不予考虑;在有效降雨之后的降雨为无效降雨。有效降雨期内末段降雨,可能对泥石流过程中的峰后退水段有一定的影响,但影响的泥石流流量很小,且对泥石流洪峰流量无作用,因此,三角形概化曲线符合泥石流流量过程的特征。对于单次洪水,五边形概化适合较大流域($>100\ km^2$),并有较长历时(数十小时至数天)的降雨作用[9-10];曲线形概化则适用于更大流域的复杂洪水。

针对小流域泥石流,采用三角形概化泥石流过程线。其方法为:(1) 坐标原点 O,洪峰点 A,用线段 OA 表示造峰阶段,流域汇流时间 τ 即造峰时间,占洪水历时的 1/3;(2) B 为洪水结束时间,AB 线段表示退水阶段,占洪水历时的 2/3。

两条支沟汇合成一条泥石流沟道,汇口处呈"Y"字形,在交点处取观测断面。面向下游,断面前侧是回合后的沟道,后侧是支沟。支沟和主沟同属于一个流域,泥石流的形成条件十分接近,因此,本研究不考虑泥石流暴发时间的差异。同样,不考虑支沟和主沟的降水差异,并假设支沟和主沟同时开始汇水过程。

用三角形概化两条支沟泥石流抵达断面时的流量状态,进行流量叠加,绘制叠加后的概化过程线。其方法为:(1) 将两条泥石流过程线的初始时刻调整到同一时刻;(2) 假设 $\tau_1<\tau_2$,计算 τ_1,τ_2 和 $3\tau_1$ 这 3 点的流量值;(3) 叠加后的五边形曲线即泥石流概化过程线。洪峰叠加现象影响了交汇后的泥石流洪峰流量,洪峰出现的规模和时间受两条沟的作用,进行叠加计算可得(表 1)。

表 1　泥石流概化过程线叠加计算结果

汇流时间 τ/h	0	τ_1	τ_2	$3\tau_1$	$3\tau_2$
洪水流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	0	$Q_{B1}+\frac{\tau_1}{\tau_2}Q_{B2}$	$\frac{3\tau_1-\tau_2}{2\tau_1}Q_{B1}+Q_{B2}$	$\frac{3(\tau_2-\tau_1)}{2\tau_2}Q_{B2}$	0

注:Q_{B1-2} 为洪水流量。

1.4　泥石流洪峰流量计算方法改进

针对 A 型沟道,流域特征参数有流域面积 F、沟道长度 L 和沟道比降 J。各支沟的沟道参数 L_j 和 J_i,流域面积 F_j。一旦误判为一个流域,得到的结果则严重夸大了泥石流的洪峰流量。各流域条沟道相互之间没有影响,主沟的沟道参数不能代替支沟的沟道参数,故需分别计算各条沟道的参数。

$$Q_{Bj}=0.278\psi_j i F_j \tag{4}$$

单独对各条泥石流沟进行计算,得到 条沟的洪水峰值流量,根据配方法即计算泥石流的峰值流量 Q_c。

对于 B 型沟,在支沟里形成的洪峰沿沟道运动,抵达与其干流汇口处时洪峰会叠加。当某一支流汇水面积占主沟汇水总面积的 1/4 以上时,应考虑错峰计算,以确保计算结果合理,防止出现计算结果偏大。改进方法为:(1) 分别计算支沟和主沟(不包含支沟面积)的泥石流峰值流量和汇流时间,绘制各条沟的泥石流流量过程线,流域内第 j 条支沟计算得到的洪水过程线为 $Q_{cj}\sim t$;(2) 对汇集到一起的沟道泥石流流量过程线进行比较,进行泥石流过程线叠加计算;(3) 提取叠加后的泥石流过程线洪峰流量。

2　计算实例

2.1　流域概况

实例流域位于雅鲁藏布江左岸,乃东县泽当镇泽当大桥下游,沟口位置 91°53′9.3″E,29°17′1.0″N。流域内最高点 5 036 m,最低点至雅鲁藏布江边,海拔 3 544 m,海拔高差 1 492 m。流域位于雅江左岸,总体地势北高南低,沟道朝向为南东向[11-14]。整个区域面积 7.9 km^2,由 4 个独立流域组成,且各流域沟长、面积十分接近,记为流域Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ。其中流域Ⅱ和流域Ⅲ均是由两条支沟汇集而成,其支沟分别记为Ⅱ$_1$,Ⅱ$_2$ 和Ⅲ$_1$,Ⅲ$_2$。堆积物颗粒较粗,黏性物质较少,为过渡性泥石流—稀性泥石流。

2.2　计算结果

2.2.1　*全流域雨洪法*　由于西藏地区水文、气象台(站)有限,且资料不全,故参照《四川省水文手册》以及山南地区气象资料,并结合沿线地质、地貌、气候、植被等条件和前人资料综合确定计算所需参数。对以整个流域为单位进行设计泥石流洪峰流量进行计算(表 2),用三角形概化泥石流过程曲线,以 $P=1\%$ 为例(图 2)。

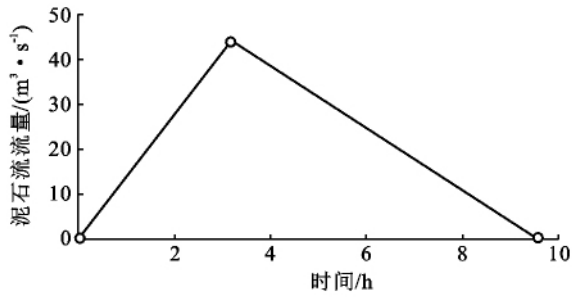


图 2 全流域三角形概化泥石流过程曲线

2.2.2 子流域雨洪法 将流域分为子流域进行计算，结果见表 3—4。Ⅱ全指Ⅱ沟全流域，流域面积包括Ⅱ$_1$沟和Ⅱ$_2$沟，主沟道参数选用Ⅱ$_1$沟沟道参数；Ⅲ全指Ⅲ沟全流域，流域面积包括Ⅲ$_1$沟和Ⅲ$_2$沟，主沟道参数选用Ⅲ$_1$沟沟道参数。分别对Ⅱ$_1$沟和Ⅱ$_2$沟、Ⅲ$_1$沟和Ⅲ$_2$沟进行泥石流流量叠加计算，结果和Ⅱ$_{全}$，Ⅲ$_{全}$对比。Ⅱ号沟、Ⅲ号沟是该流域的子流域，在计算 B 型组合泥石流流量时，划分出了次级子流域，所以认为是全流域计算。值得注意的，现场考察发现该地区泥石流沟，泥石流在流域中游起动，上游仅提供清水动力，最终堆积到堆积扇下部。因此，在对支沟进行叠加计算时，流域面积仅考虑交汇口断面以上部分。

表 2 全流域泥石流峰值流量计算参数及结果

面积 F/ km^2	长度 L/ km	纵比降 I/ ‰	设计洪水洪峰流量频率 P			设计泥石流洪峰流量频率 P		
			0.50%	1%	2%	0.50%	1%	2%
7.016	4.742	206.6	19.059	16.834	14.514	53.020	44.230	35.890

表 3 子流域泥石流流量计算参数及结果

泥石流沟道	面积 F/ km^2	长度 L/ km	纵比降 I/ ‰	设计洪水洪峰流量频率			设计泥石流洪峰流量频率		
				0.50%	1%	2%	0.50%	1%	2%
Ⅰ	1.277	1.763	241.7	5.717	5.068	4.392	15.904	13.316	10.86
Ⅱ$_1$	1.954	3.414	333.2	5.557	4.884	4.182	15.457	12.832	10.341
Ⅱ$_2$	0.682	2.754	370.9	1.629	1.415	1.19	4.531	3.716	2.944
Ⅲ$_1$	0.766	2.446	336.3	2.172	1.899	1.614	6.034	4.990	3.991
Ⅲ$_2$	0.293	1.610	287.6	0.840	0.730	0.615	2.337	1.918	1.522
Ⅳ	0.912	2.633	286.7	2.386	2.083	1.766	6.637	5.473	4.367
Ⅱ$_{全}$	2.636	3.414	333.2	8.462	7.471	6.437	23.539	19.628	15.917
Ⅲ$_{全}$	1.059	2.446	336.3	3.466	3.049	2.613	9.643	8.010	6.461

表 4 泥石流汇流时间

P=0.01	Ⅰ	Ⅱ$_1$	Ⅱ$_2$	Ⅲ$_1$	Ⅲ$_2$	Ⅳ	全流域	Ⅱ$_{全}$	Ⅲ$_{全}$
τ	1.75	2.71	2.74	2.45	2.17	2.66	3.19	1.70	2.27

泥石流对下游的破坏，主要是泥石流洪峰对危害对象的冲击，所以用三角形概化泥石流的过程线。沟道Ⅱ和沟道Ⅲ均是由两条明显的支沟汇合而成的，需进行汇合计算。

将两条支沟的三角形概化图校准到同一时间，对同一时刻的泥石流流量进行汇合叠加（计算公式见表 1）。分别对Ⅱ沟、Ⅲ沟进行计算（以 P=1%为例），结果由图 3 所示。

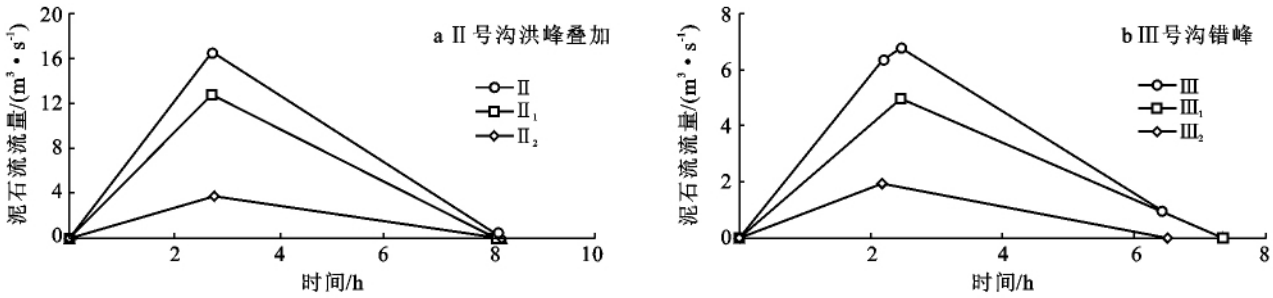


图 3 子流域雨洪法叠加计算

3　结果分析和讨论

3.1　全流域法和子流域法

Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ和Ⅳ这 4 条沟都有自个的沟道,其中最大的支沟的泥石流洪峰流量为 19.628 m^3/s(表 5),远小于以全流域法计算的百年一遇的泥石流洪峰流量结果 44.230 m^3/s。

泥石流对下游工程的危害方式主要包括[15]:淤埋建筑物、构筑物;冲刷磨蚀,撞击等造成工程破坏;泥石流堵塞、挤压主河造成河水水位上涨对工程的破坏;弯道超高与爬高对工程的影响。对于线性工程,如公路、铁路、输电线路等设施,通过泥石流堆积扇时,除淤埋外,泥石流对工程的危害还包括沿沟道高速运动造成破坏。

因此,划分单独流域计算泥石流洪峰流量,可以反映该流域泥石流危害的准确情况。

表 5　全流域雨洪法和子流域雨洪法计算结果

流 域	Ⅰ	Ⅱ全	Ⅲ全	Ⅳ	全流域	Ⅱ	Ⅲ
峰值流量(P=1%,m^3/s)	13.316	19.628	8.010	5.473	44.230	16.507	6.786

比较两种计算方法(图 4),子流域法能更客观地反映支沟泥石流在整个流域中的影响和作用。比较泥石流峰值流量,Ⅱ号沟(16.507 m^3/s)<Ⅱ全(19.628 m^3/s),Ⅲ号沟(6.786 m^3/s)<Ⅲ全(8.01 m^3/s)。$Ⅱ_1$ 沟泥石流规模远大于$Ⅱ_2$ 沟,计算Ⅱ全时选用的是$Ⅱ_1$ 沟沟道参数,所以计算结果值比较大。$Ⅲ_2$ 沟流域面积比 $Ⅲ_1$ 沟小,沟道较短,在全流域法计算中不占主导作用。在分为子流域计算后发现,$Ⅲ_2$ 沟和 $Ⅲ_1$ 沟错峰抵达,削减了洪峰。改进的泥石流洪峰流量叠加计算,采用由汇流时间校正过的图形叠加算法,相对于以整条沟计算的单沟泥石流洪峰流量计算模型,削减了洪峰,更好地反映沟道泥石流实际情况。改进的泥石流洪峰叠加计算中未包含汇口断面以下部分,因此在应用上需要加修正系数。

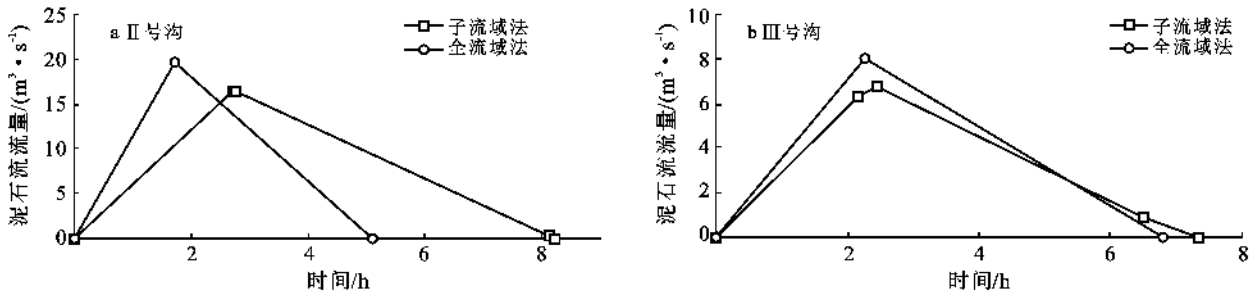


图 4　B 型沟道的两种计算比较

3.2　A 型沟道和 B 型沟道之间的转化

Ⅲ沟该断面顶宽 46 m,底宽 9.5 m,最深 9.5 m,沟道坡面上生长着该地区常见的灌木柠条,高度在 20～30 cm 之间,沟道底部冲刷出的小冲沟没有灌木生长,而堆积扇上生长的植株高度在 50 cm 以上,这表明在近期Ⅲ沟的泥石流活动并不剧烈。泥石流沟道的发展受多种因素制约,如气候变化阻碍了一些老泥石流沟的发展[16]。Ⅱ沟沟道内部底部有堆积物,这些堆积物是沟道侧壁在山洪泥石流的冲刷下剥蚀下来的。Ⅱ沟下切侵蚀剧烈,有些沟段已经侵蚀到基岩。侧壁下部遭到泥石流的冲刷,逐渐被掏空,在重力作用下发生小崩塌。崩塌堆积物同时也是泥石流的物源。Ⅱ沟泥石流规模稳定并可能有增大的趋势。通过现场的测量,$Ⅱ_2$ 沟与 $Ⅲ_1$ 沟道之间的距离较小,沟道侧壁在山洪泥石流的侵蚀下并不稳固。随着 $Ⅱ_1$ 和 $Ⅱ_2$ 沟道对侧壁的侵蚀,当Ⅱ沟爆发大规模泥石流后,泥石流可能堵塞原有的沟道,切穿侧壁,侵占Ⅲ沟的沟道;这时两条沟道从原先的各自独立的关系(A 型)转变为交汇的关系(B 型),此时计算泥石流洪峰流量值参数选取就需要重新考虑。

3.3　结果讨论

根据在西藏地区的考察,讨论了泥石流洪峰计算方法及改进,主要针对泥石流计算中设计洪水的确定。该地区泥石流沟道主要特点是,上游清水动力区范围较大,主要物源来自流域中游的二次物源区,支沟与主沟的交汇口就位于该区域。改进方法不适用于支沟汇口位于泥石流流通段下部或堆积区的情形,此时难以保证支沟泥石流起动和主沟同步;也不适用流域面积较大的泥石流沟,如云南省东川蒋家沟,此类型的泥石流多为阵性流,洪峰流量计算有其他方法。青藏高原东缘小流域发育,数量庞大,其中有支沟发育的十分普遍,受构造上升作用二次物源区成为

泥石流的重要物源区，有更多典型流域可以验证计算方法，并进行改进。胡凯衡等[17]应对汶川地震的影响提出了非线性雨洪修正法，在没有地震影响下，泥石流洪峰流量的特性仍有待研究。

4 结 论

(1) 野外观察到的堆积扇群，若按单沟计算，严重夸大了泥石流洪峰流量，不符合实际情况。分为单独的流域计算，能准确反映泥石流对下游的危害。

(2) 一个流域内有多条沟道，存在支沟交汇的现象，支沟泥石流交汇后会有洪峰的叠加，当流域中某条支沟所占主沟总面积较大时，需要考虑支沟泥石流汇流对主沟泥石流洪峰流量的影响。

(3) 对雨洪法进行改进，分为子流域进行流量计算，可以反映各条沟道在流域爆发泥石流中的影响和作用。因支沟流域和主沟流域至汇口的汇流时间不同，洪峰叠加时有错峰现象，错峰降低了泥石流洪峰流量。这对防治工程设计具有参考意义，可降低工程的设防标准，节约工程经费。

[参 考 文 献]

[1] 康志成. 泥石流洪峰流量的研究与计算[J]. 中国水土保持，1991(2)：15-18.

[2] 沈寿长，谢修齐，项行浦，等. 暴雨泥石流流量计算方法研究[J]. 中国铁道科学，1993，14(2)：80-88.

[3] 吕儒仁. 一场典型的冰雪雨水泥石流过程[J]. 山地研究，1992，10(2)：89-94.

[4] Zhang Jinghong, Wei Fangqiang, Liu Shuzhen, et al. Possible effect of ENSO on annual sediment discharge of debris flows in the Jiangjia Ravine based on Morlet wavelet transforms[J]. International Journal of Sediment Research，2008，23(3)：267-274

[5] 李德基. 泥石流减灾理论与实践[M]. 北京：科学出版社，1997：19-21.

[6] 谭万沛，王成华，姚令侃，等. 暴雨泥石流滑坡的区域预测与预报：以攀西地区为例[M]. 四川 成都：四川科学技术出版社，1994：99-103.

[7] 四川省水利电力厅. 四川省中小流域暴雨洪水计算手册[M]. 四川 成都：四川省水利电力厅，1986：8-15.

[8] 崔鹏，杨坤，陈杰. 前期降雨对泥石流形成的贡献：以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持科学，2003，1(1)：11-15.

[9] 韩井先. 五点概化过程线法在洪水调查分析中的应用[J]. 东北水利水电，2004，22(5)：11-13.

[10] 王志录，孙畅，包红霞，等. 甘肃省舟曲县“8·8”特大山洪泥石流灾害与气象成因分析及其应对建议[J]. 地质灾害与环境保护，2011，22(1)：10-15.

[11] 李吉均. 青藏高原的地貌演化和亚洲季风[M]//李吉均. 青藏高原隆升与亚洲环境演变. 北京：科学出版社，2006：87-98.

[12] 李吉均. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的讨论[M]//李吉均. 青藏高原隆升与亚洲环境演变. 北京：科学出版社，2006：21-31.

[13] 潘保田，高红山，李炳元，等. 青藏高原层状地貌与高原隆升[J]. 第四纪研究，2004，24(1)：50-57.

[14] 李吉均. 青藏高原隆起的三个阶段及夷平面的高度和年龄[M]//李吉均. 青藏高原隆升与亚洲环境演变. 北京：科学出版社，2006：65-70.

[15] 周必凡，李德基. 泥石流防治指南[M]. 北京：科学出版社，1991：8-12，87-89.

[16] Ronald I D. Debris flows from small catchments of the Ma Ha Tuak Range, metropolitan Phoenix, Arizona [J]. Geomorphology, 2010，120(3/4)：339-352.

[17] 胡凯衡，崔鹏，游勇，等. 汶川灾区泥石流峰值流量的非线性雨洪修正法[J]. 四川大学学报：工程科学版，2010，42(5)：52-57.

(上接第 122 页)

[参 考 文 献]

[1] Sieker F. On-site stormwater mangement as an alternative to conventional sewer systems: A new concept spreading in Germany[J]. Water Science and Technology, 1998, 38(10)：65-71.

[2] 李俊奇，车伍，池莲，等. 住区低势绿地设计的关键参数及其影响因素分析[J]. 给水排水，2004，30(9)：41-46.

[3] 任树梅，周纪明，刘红，等. 利用下凹绿地增加雨水蓄渗效果的分析与计算[J]. 中国农业大学学报，2000，5(2)：50-54.

[4] 张光义，聂发辉，宁静，等. 城市下凹式绿地长期运行蓄渗效率的概率分析[J]. 同济大学学报：自然科学版，2009，37(5)：651-655.

[5] 孙慧修，郝以琼，龙腾锐. 排水工程(下)[M]. 北京：中国建筑工业出版社，1999：73.

[6] 程江，徐启新，杨凯，等. 下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素[J]. 给水排水，2007，33(5)：45-49.

[7] 路毅，董艳桐. 城市绿地雨水利用的基本途径[J]. 北方园艺，2008(9)：145-147.

[8] 郑兴，周孝德，计冰昕. 德国的雨水管理及其技术措施[J]. 中国给水排水，2005，21(2)：104-106.