

蒋家沟泥石流沟道年际冲淤变化特征分析

魏 丽^{1a,1b,2}, 胡凯衡^{1a,1b}, 黎晓宇^{1a,1b}, 颜春达³

(1.中国科学院 a.山地灾害与地表过程重点实验室; b.水利部成都山地灾害与环境研究所,成都 610041;
2.中国科学院大学,北京 100049;3.云南省昆明市东川区地质灾害防治中心,昆明 654100)

摘 要:为了分析泥石流对沟道冲淤的累积影响效应,根据蒋家沟 1999—2014 年泥石流沟道断面测量数据对沟道年际冲淤变化特征及影响因素进行了分析。结果表明:蒋家沟泥石流沟道断面形态变化主要表现为断面展宽、断面淤积抬高或冲刷降低;沟道宽度变化主要发生于 1999—2009 年,2009 年后沟道宽度相对稳定,沟道冲淤速率逐渐减缓;沟道整体纵剖面曲线呈现下凹型,下凹度不断减小,2009 年后下凹度在 1.1 左右波动,纵剖面整体比降不断增大,2009 年后比降增加速率减缓;泥石流输沙规模减小、泥深及流速减小、支沟泥石流汇入、沟道下游排导工程是影响蒋家沟泥石流沟道冲淤的主要因素。研究成果可为泥石流流通及堆积区的防治提供参考。

关键词:蒋家沟泥石流;沟道年际冲淤;下凹度;比降;冲淤速率

中图分类号:P642 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-5485(2017)09-0057-06

1 研究背景

泥石流是山区常见的一种自然灾害,是一种饱含泥沙石块和巨砾的固液两相流体。泥石流固体物质含量高,流速大,对沟道侵蚀能力强,能迅速改变沟谷形态,严重制约土地资源开发与生态环境保护。如 1984 年 7 月 18 日,四川省九寨沟县关庙沟暴发泥石流,流速高达 9.2 m/s,泥石流强烈淘蚀沟床,使沟床刷深 2.0~3.0 m,沟道展宽 3.0~5.0 m,并将大量的固体物质输移出沟口,造成了重大经济损失^[1]。

目前对于泥石流沟道侵蚀的研究主要集中于侵蚀量及其影响因素的研究^[2-4],对于沟道年际整体冲淤变化研究相对较少。由于长序列的泥石流沟道断面测量数据的缺乏,对于泥石流沟道的变化研究主要基于单次泥石流,如 Cenderelli^[5] 根据美国 North Fork Mountain 的 DEM 地图分析了大型泥石流对沟道地形的影响。Berger 等^[6-7],Schürch 等^[8] 利用压力传感器测量了位于瑞士东南部 Illgraben 流域 2007—2009 年间所暴发的单场泥石流流经的沟道断面的冲淤深度,探讨了影响泥石流断面冲淤的主要因素。

云南东川蒋家沟是一条典型的泥石流沟,位于称为“天然泥石流博物馆”的小江流域。中国科学

院东川泥石流观测研究站(以下简称东川站)自 1961 年开始对蒋家沟泥石流进行定位观测,近 17 a 来对泥石流沟道断面进行了系统测量,积累了长序列的观测资料。本文利用蒋家沟 1999—2014 年共 16 a 断面测量数据对泥石流沟道年际冲淤变化及其影响因素进行分析探讨。

2 研究区概况

蒋家沟流域位于 26°13'N—26°17'N,103°6'E—103°13'E,处于川滇地轴东缘的小江深大断裂带内,是金沙江上游小江流域内活动频率最高的一条泥石流沟。其泥石流暴发历史长、规模大、种类齐全,是天然泥石流原型观测研究的理想基地。蒋家沟流域面积 48.52 km²,具有 200 多条支沟,46 条冲沟。流域内地震活动强烈、岩层破碎、地形陡峻、植被稀疏,地表形态十分复杂,滑坡和崩塌活动强烈,一到雨季,泥石流频繁暴发。蒋家沟流域概况及主要测量断面见图 1,流域主要支沟包括门前沟、多照沟、查菁沟,门前沟与多照沟汇口以上为泥石流形成区,汇口以下为泥石流流通及堆积区,测量断面均位于汇口以下流通及堆积段^[9]。

在断面测量过程中,由于泥石流改道等因素,D17、D19、P3、P2、P1 断面未进行持续测量,无连续

收稿日期:2016-05-26;修回日期:2016-06-27
基金项目:国家自然科学基金面上项目(41371039);国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452704);中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室自主支持项目(Y3L1340340)
作者简介:魏 丽(1986-),女,四川广元人,博士研究生,主要从事泥石流运动机理研究,(电话)13348824765(电子信箱)weili@imde.ac.cn。

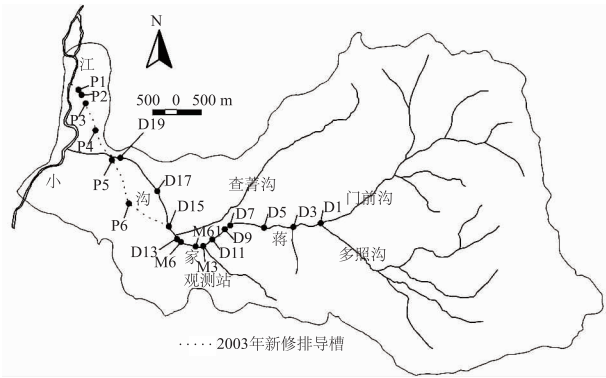


图 1 蒋家沟流域概况及观测断面分布
Fig.1 Map of Jiangjia Gully and distribution of
observed cross-sections

测量数据,其余 D1,D3,D5,D7,D9,D11,M3,M61,D13,D15 断面具有 1999—2014 年 16 a 完整观测资料,P6,P5,P4 断面具有 2004—2014 年 11 a 完整测量资料。本文所采用的断面数据测量时间在每年雨季最后一场泥石流结束后,不考虑年内单场泥石流对沟道的冲淤影响,仅考虑泥石流沟道年际变化,仅根据具有连续观测资料的断面进行分析探讨。

3 断面冲淤变化

断面测量时间序列较长,本文以 5 a 为时间间隔,选取 1999,2004,2009,2014 年测量数据作为对比,各断面形态变化见图 2。

由图 2 可知,各沟道断面宽度及高程在近年发生了明显的变化,宽度及高程变化统计见图 3。除 P5,P4 断面外,其它断面均有不同程度的扩宽。断面展宽主要发生于 1999—2009 年,2009—2014 年仅 D1,P4 断面宽度增加。1999—2004 年断面展宽主要集中于上、中游断面,其中 D7,D9,D11 断面宽度增加超过 150 m,年均分别增加 37,46,34 m;2004—2009 年断面展宽主要集中于中下游断面,其中 M3,M61,P6 断面宽度增加超过 100 m,年均分别增加 38,24,21 m;2010—2014 年仅 D1,P6 断面分别增加 6,47 m。总体上,1999—2004 年、2004—2009 年、2009—2014 年断面宽度随时间段推移变化幅度逐渐减小,宽度平均累计扩展分别为 85.6,41.9,4.0 m,2009 年后仅 P6 断面展宽 47 m,沟道其余断面已经相对稳定,无特别明显的展宽。

各断面高程表现为淤积抬高与冲刷降低 2 种变化模式,冲刷降低发生于沟道末端的 P5,P4 两断面,其它断面均表现为淤积抬高。1999—2004 年除无测量数据的末端 P6—P4 断面外,沟道其余断面全面淤积,其中上游沟段淤积高度较为相似,中游沟段各断

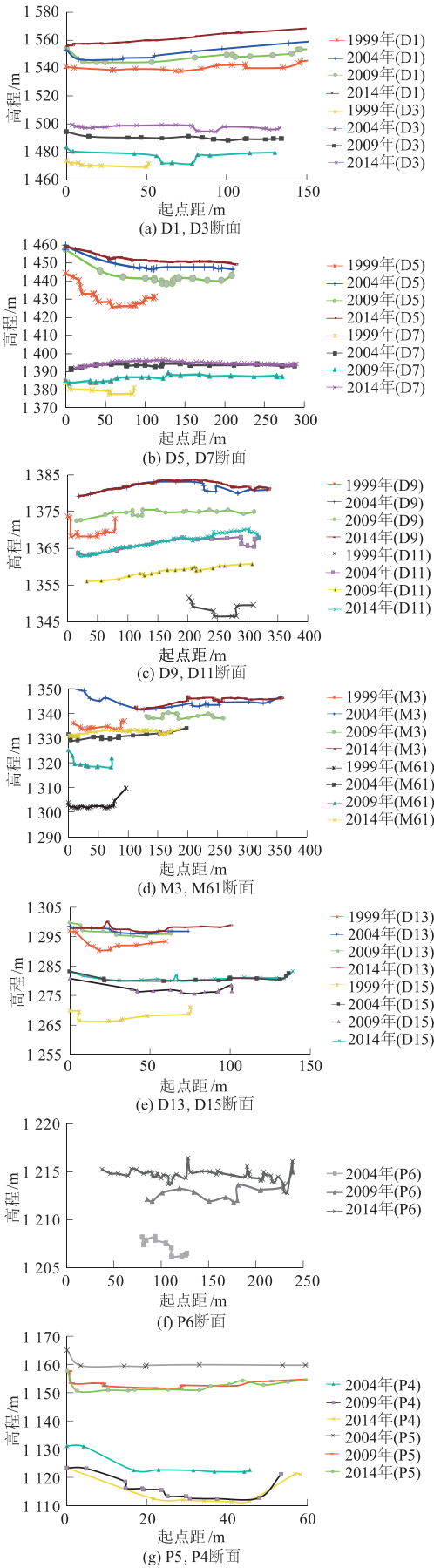


图 2 各断面形态变化
Fig.2 Changes in the morphology of cross-sections

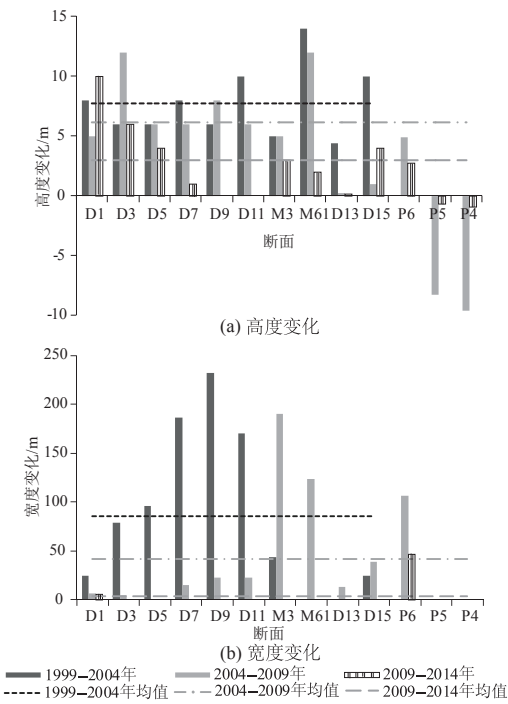


图 3 各断面高度及宽度变化

Fig.3 Variations of width and height of cross sections

面淤积高度波动较大,如 M61 断面淤积高度为相邻断面 D13 淤积高度的3.5倍,分别为14.0、4.3 m,年均淤积分别为2.8、0.9 m,为全断面中淤积高度最大与最小的两断面;2004—2009 年 D1—M61 沟道仍全面淤积,D13—D15 断面淤积高度变化较小,P6 断面累计淤高 5 m,相邻 P5,P4 断面却发生冲刷降低,其中 D3,M61 断面为全断面中淤积最强烈的断面,累计淤高达12 m,年均淤高2.4 m,P5,P4 断面分别累计冲刷达8.2、9.6 m,年均累计冲刷达 1.6、1.9 m;2009—2014 年沟道冲淤幅度相对较小,仅部分沟段发生淤积,上游沟段 D1—D7 断面淤积幅度呈现递减趋势,最大淤积断面为 D1 断面,累计淤高 10 m,小于前两时段断面最大淤积值,如 D7,D9,D13 断面高程无变化,P5,P4 断面冲刷幅度较小,仅累计冲刷降低约 1 m,较 2004—2009 年冲刷程度大幅降低。总体上,1999—2004 年、2004—2009 年、2009—2014 年断面淤高幅度逐渐减小,平均累计淤高分别为7.7、6.1、3.0 m,沟道断面淤高速度逐渐减缓。

4 沟道纵剖面变化

蒋家沟观测沟道纵剖面见图 4。

沟道纵剖面比降及凹度是纵剖面形态的重要特征参数,与泥石流能量耗材密切相关。芦田和男等^[10](1979)通过研究日本泥石流灾害提出泥石流堆积上限比降为26.79%,下限为6.99%。采用最小

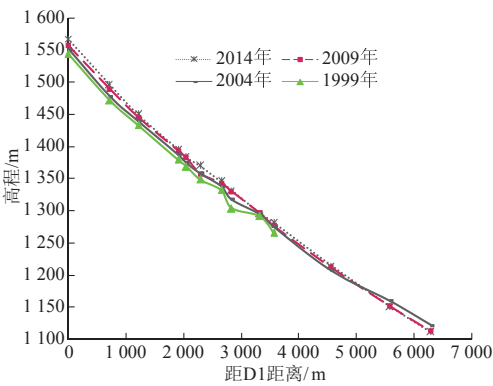


图 4 沟道纵剖面高程

Fig.4 Longitudinal profile of channel

二乘法计算沟道比降以反映纵剖面比降沿程变化,用纵剖面向下凹的程度,即用沟道纵剖面曲线抛物线方程指数 n 下凹度定量地描述纵剖面形态,当 $n > 1$ 时,纵剖面为凹型,表明比降沿着向沟口的方向增加; $n < 1$ 为凸型,表明比降沿着向沟口的方向减小; $n = 1$ 则纵剖面为直线型^[11]。蒋家沟观测沟道比降及下凹度见图 5。

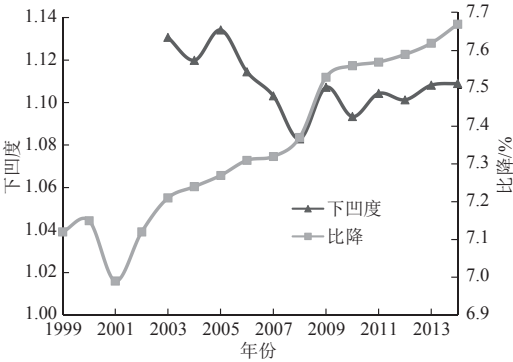


图 5 沟道比降及下凹度变化

Fig.5 Changes of gradient and convex index of the channel

沟道比降在1999—2001 年呈现波状变化的特点,比降最小值为6.99%,与芦田和男提出的堆积下限相等,2001 年后比降不断增大,2009 年后比降增加速率变缓,说明沟道冲淤幅度相对变小。2003—2008 年沟道下凹度不断减小,说明沟道不断淤积,2009—2014 年下凹度在 1.1 左右波动,无明显增大或减小趋势,也证明沟道冲淤幅度较小。

5 沟道冲淤影响因素分析

泥石流沟道冲淤主要受泥石流性质、流型、规模、运动参数、侵蚀基准面等因素影响,蒋家沟泥石流为典型的黏性阵性泥石流,历年重度及流型变化相对较小。本文主要就泥石流输沙规模、泥深及流速、支沟泥石流及排导工程 3 方面因素对沟道冲淤影响进行探讨。

5.1 泥石流输沙量

东川站观测泥石流的沟段约为 D9—M3 段沟道,若泥石流未达到观测断面,则该次泥石流输沙量未记录在内。陈杰等^[12]根据蒋家沟 1999—2003 年观测资料发现沟道单次泥石流冲淤变化与泥石流输沙量有关,一般当单场泥石流输沙量<50 万 m³时,沟道整体发生淤积;当输沙量>50 万 m³,沟道整体发生冲刷。1965—2014 年泥石流输沙量观测值见图 6,泥石流多年平均每年输沙量为 182 万 m³。1965—2001 年泥石流输沙量呈现波状起伏的特点,泥石流最大输沙量>600 万 m³,分别发生在 1991 年、1997 年;泥石流最小输沙量<30 万 m³,分别发生在 1988 年、1993 年;1999—2001 年泥石流年输沙量仍在平均值左右波动,2001 年之后泥石流输沙量迅速减少,远小于历年输沙平均值,2005 年后到达观测断面泥石流输沙量平均值仅 20 万 m³。根据泥石流观测记录,1999—2014 年共暴发泥石流 98 场,平均每场泥石流输沙量为 10 万 m³,单场输沙量>50 万 m³仅 5 场,占比仅为 5.1%,单场输沙量<10 万 m³,占比高达 76%。2004 年后蒋家沟泥石流暴发规模不断减小,2004—2014 年共暴发泥石流 49 场,仅 2 场输沙量>10 万 m³,大部分泥石流淤积在上游断面,造成 D1—D7 断面淤高强烈,中下游断面变化相对较小。

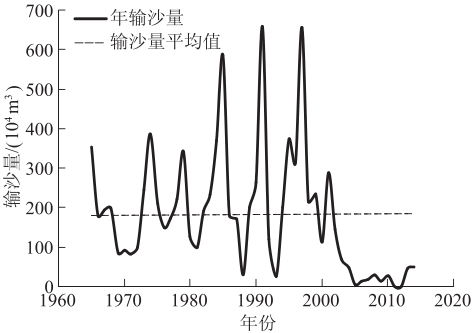


图 6 1965—2014 年泥石流输沙量
Fig.6 Sediment discharge of debris flow from 1965 to 2014

沟道上游 D1—D7 相邻观测断面沟段比降见图 7。1999—2008 年各段比降变化相对较大,2009 年后各段比降逐渐趋向稳定,且比降由上到下逐渐减小,各段淤积高度也沿程减小(见图 4),呈现出类似河道沿程淤积的特点。D1 断面位于形成区门前沟与多照沟汇口,近年来 D1 断面不断抬高,1999—2014 年累计淤高 23 m,在汇口形成天然的泥石流拦砂坝,减缓了蒋家沟泥石流形成区沟道比降,不利于泥石流向下游主沟道输移,部分泥石流淤积在 D1 断面以上形成区沟道进一步造成输移至下游观测沟段泥石流规模不断减小。

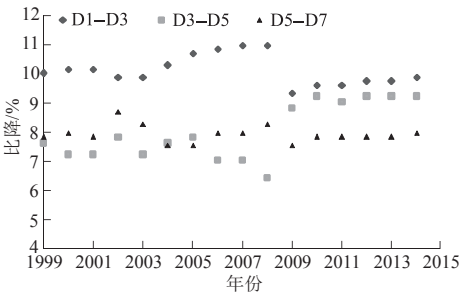


图 7 D1—D7 相邻观测断面沟段比降
Fig.7 Gradients of adjacent sections from D1 to D7

5.2 泥石流泥深及流速

泥石流泥深及流速是影响泥石流侵蚀能力的重要参数,泥石流沿程侵蚀与流体类型与边界条件有关^[13]。东川站自 1961 年进行蒋家沟泥石流观测起,泥石流沟床呈箱型或复式箱型,沟槽宽度最大可达 100 m,沟道深度达数十米,箱型沟槽限制了泥石流向两侧漫流,泥深及泥石流流速较大,有利于泥石流向下游输移,减少了泥石流沿程淤积。当沟槽因泥石流淤积导致宽度、深度减小时,泥石流流动过程中不断向两侧漫流,泥深减小,泥石流在上游沟道不能克服沟床阻力,能量不足以使泥石流流体向下游流动,沿程不断淤积,泥石流累积淤积进一步导致沟槽形态变化,不利于泥石流向下游运动。根据实地观测,1985 年蒋家沟箱型沟槽深度达 15~20 m,1991 年 8 月沟槽深度约为 15 m,之后沟槽不断淤积抬高。1999,2004,2014 年 M3 断面附近沟道宽度、深度对比见图 8。



图 8 1999 年、2004 年、2014 年蒋家沟 M3 断面附近沟道对比
Fig.8 Channels near section M3 in 1999, 2004, and 2014

1999 年,沟道呈现明显的箱型形态,泥石流沿深槽运动;2004 年沟槽逐渐淤积,沟槽深度减小,深槽形态已不太明显;2014 年时已无深槽形态,泥石

流在宽阔的沟道输移,不断向两侧漫流。另 2000 年前后蒋家沟沟槽常流水在 D7 断面被当地村民截断,使得泥石流暴发后 D7 断面以下沟槽堆积的未固结的泥石流不再受到沟道原有的高含沙水流的冲刷切割,加速了沟槽淤积抬高。沟槽形态影响泥石流泥深与流速。1999—2014 年蒋家沟泥石流历年平均每阵泥深及流速见表 1。泥深及流速变化趋势相似,1999—2002 年泥深及流速呈现波状起伏的特点,2002—2014 年泥深及流速整体不断减小。泥深的减小一方面受泥石流整体规模的影响,一方面也受到沟道形态约束。2002 年后原有的泥石流箱型沟槽逐渐淤满,泥石流运动无两侧边界约束,泥深及流速减小,能量不足以向下游输移,沿程逐渐淤积,泥石流输沙量不断减小,大大减小了泥石流对沟道的侵蚀能力,造成强烈的沟道淤积抬升。

表 1 1999—2014 年蒋家沟泥石流历年
平均每阵泥深及流速

Table 1 Average depth and velocity of debris flow of each array from 1999 to 2014					
年份	泥深/m	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	年份	泥深/m	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1999	0.77	6.68	2006	0.72	5.69
2000	0.57	5.95	2007	0.40	4.30
2001	0.68	6.59	2008	0.69	5.22
2002	0.93	7.21	2009	0.64	3.37
2003	0.87	6.36	2010	0.70	5.92
2004	0.81	6.06	2013	0.56	4.95
2005	0.76	5.68	2014	0.63	4.84

注:2011 年和 2012 年由于泥石流未冲到中下游,仅在汇口附近,因此无法进行观测记录

5.3 支沟泥石流及下游排导工程

泥石流运动受平面形态如岩咀与支沟堆积扇的影响,泥石流冲淤在 M61 处受到查菁沟泥石流堆积扇的影响,流路增长,弯曲度亦不断增加,主流线不断向左迁移,查菁沟堆积扇犹如拦砂坝使泥石流顺畅输移受阻,形成局部顶托回淤,造成 M61 及相邻 M3 断面淤积强烈^[9]。

蒋家沟泥石流在 D15 至小江汇口段沟道内的输移路径曾发生多次变化,1999—2014 年泥石流改道情况见图 9。

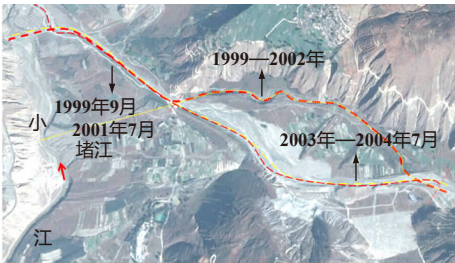


图 9 1999—2014 年泥石流改道示意图
Fig.9 Change of transport route of debris flow

1999—2002 年,泥石流沿 D15—D17—D19 段深槽下泄,以约 45°夹角与小江交汇,期间 1999 年 9 月及 2001 年 7 月份蒋家沟 2 场泥石流在 P5 断面处冲毁原有导流堤,以接近 90°与小江交汇并堵塞小江^[14-15]。为了防止泥石流再次堵江造成灾害,2003 年加固延长了导流堤至 D15 断面处(见图 1),导流堤完工之后,泥石流在 D15 断面受到导流堤拦挡作用导致该断面强烈淤积且在 D15 以下断面改道,2003 年至 2004 年 7 月份前泥石流路径变化为 D15—P6—P5—P1,再次以约 45°与小江交汇,泥石流输移沟道由改道前 D15—P6 段的窄深式箱型沟槽变为 D15—D17 段宽浅沟道,沟道比降减小,泥石流沟床两侧无约束,造成该断面逐渐淤积。2004 年 7 月泥石流又在 P4 位置改道,与小江交汇位置逐渐向小江下游移动,汇口高程即侵蚀基准降低,造成下游 P5,P4 断面冲刷,2004—2009 年 6 a 间,P5,P4 断面累积冲刷分别达 8.29,9.61 m。

6 结 论

本文根据蒋家沟 1999—2014 年间 16 个沟道断面观测数据,分析了泥石流沟道年际冲淤变化及其影响因素,得出结论如下:

(1) 蒋家沟泥石流沟道断面除末端两断面冲刷降低之外,其余断面均不断展宽及淤积抬高,断面展宽主要发生于 1999—2004 年,2009—2014 年除末端 P6 断面外,其余沟道断面宽度已经相对稳定不再发生扩展;断面冲刷降低主要发生于 2004—2009 年,断面平均累计淤积高度随时间段推移不断减小,2009—2014 年累计淤积高度减小至 3 m。

(2) 沟道纵剖面整体呈下凹曲线,下凹度不断减小;2009 年后下凹度稳定在 1.1 左右,沟道整体比降不断增大,2009 年比降增大速率减缓。

(3) 蒋家沟泥石流输沙规律减小,泥石流泥深及流速减小、支沟泥石流汇入、泥石流排导工程及汇口侵蚀基准面降低是影响沟道冲淤的主要因素。本文可为在泥石流流通及堆积区的防治提供参考。

致谢:感谢中国科学院东川泥石流观测研究站提供良好的工作条件和相关观测数据!

参考文献:

[1] 唐邦兴,柳素清.四川省阿坝藏族羌族自治州泥石流及其防治[M].成都:成都科技大学出版社,1993:116-124.
[2] CAINE N.The Influence of Snow and Increased Snowfall

on Contemporary Geomorphic Processes in Alpine Areas [G]. STEINOFF H W, IVES J D. Ecological Impacts of Snowpack Augmentation in the San Juan Mountains. Springfield: Fort Collins, 1976:145–200.

[3] DIETRICH W E, DUNNE T. Sediment Budget for a Small Catchment in Mountainous Terrain [J]. Zeitschrift Fur Geomorphologie Supplement, 1978, 29:191–206.

[4] BENDA L. The Influence of Debris Flows on Channels and Valley Floors in the Oregon Coast Range, USA [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(5):457–466.

[5] CENDERELLI D A, KITE J S. Geomorphic Effects of Large Debris Flows on Channel Morphology at North Fork Mountain, Eastern West Virginia, USA [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(1):1–19.

[6] BERGER C, MCARDELL B W, FRITSCHI B, *et al.* A Novel Method for Measuring the Timing of Bed Erosion during Debris Flows and Floods [J]. Water Resources Research, 2010, 46(2):228–236.

[7] BERGER C, MCARDELL B W, SCHLUNEGGE F. Direct Measurement of Channel Erosion by Debris Flows, Illgraben, Switzerland [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(F1):93–104.

[8] SCHUERCH P, DENSMOREA L, ROSSERN J, *et al.* Dynamic Controls on Erosion and Deposition on Debris-flow Fans [J]. Geology, 2011, 39(9):827–830.

[9] 王裕宜, 詹钱登, 严璧玉. 泥石流流体的流变特性及其运移特性 [M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2014.

[10] 芦田和男, 高桥保. 道上正规. 河流泥沙灾害以及防治 [M]. 冯金亭, 焦恩泽, 译. 北京: 水利电力出版社, 1987:14–16.

[11] 陆中臣, 周金星, 陈浩. 黄河下游河床纵剖面形态及地文学意义 [J]. 地理研究, 2003, 22(1):30–38.

[12] CHEN J, HE Y P, WEI F Q. Debris Flow Erosion and Deposition in Jiangjia Gully, Yunnan, China [J]. Environmental Geology, 2005, 48:771–777.

[13] 田连权, 吴积善, 康志成, 等. 泥石流侵蚀搬运与堆积 [M]. 成都: 成都地图出版社, 1993.

[14] 游勇, 吴积善, 程尊兰. 蒋家沟下游泥石流导流堤冲决原因及防治对策 [J]. 灾害学, 2001, 16(2):14–17.

[15] 韦方强, 胡凯衡, 崔鹏, 等. 蒋家沟泥石流堵江成因与特征 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(6):71–75.

(编辑: 陈敏)

Inter-annual Variation of the Morphology of Debris Flow Channel in Jiangjia Gully

WEI Li^{1,2,3}, HU Kai-heng^{1,2}, LI Xiao-yu^{1,2}, YAN Chun-da⁴

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Dongchuan Geological Hazard Prevention and Control Center, Kunming 654100, China)

Abstract: In the aim of investigating the cumulative effect of debris flow on channel morphology, we analyzed the variations and influential factors of erosion and deposition in Jiangjia Gully according to sectional measurements from 1999 to 2014. Results revealed that the channel width increased continuously and the sectional height elevated or decreased depending on the erosion or deposition of channel. The channel width increased mainly from 1999 to 2009, and then remained stable after 2009 when erosion or deposition intensity decreased. Moreover, the curve of longitudinal profile of channel was concave, and the concavity index decreased gradually, fluctuating around 1.1 after 2009. The gradient of channel profile increased gradually, but the increment alleviated after 2009. Decreases in the sediment discharge, depth and velocity of debris flow, and debris flow afflux from tributary, as well as debris flow drainage project in the downstream were dominant factors influencing the channel morphology.

Key words: debris flow in Jiangjia Gully; inter-annual erosion and deposition; concavity index; channel gradient; erosion and deposition rate