

从空间 Poisson 过程看蒋家沟泥石流

李 泳^{1,2} 苏鹏程^{1,2,3} 苏凤环^{1,2}

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 云南东川蒋家沟泥石流频率高, 变化多。每场泥石流包含几十到几百个阵流, 各阵流具有不同的密度、流体性质和运动形态, 流量涨落达 3 个数量级。这些特征意味着泥石流具有很强的随机性。根据蒋家沟的演化分区和野外观测, 可以发现泥石流形成于特殊的源地分支。土体活动(包括滑坡、崩塌和局部的土体流动等) 随机发生在那些分支流域, 如果认为各源地的土体活动是独立的, 而且活动强度正比于源地的面积, 那么泥石流的形成和汇流就是一个空间 Poisson 过程。其结果是阵流流量服从指数分布, 这很好地符合蒋家沟的泥石观测数据。从蒋家沟泥石流的随机性可见, 泥石流依赖于流域的特定源区及其分布, 而不是笼统地取决于全流域的地貌或几何因子。

关键词: 流域演化分区; 泥石流; Poisson 过程; 流量分布; 蒋家沟

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

山区流域泥石流既是流域演化的结果, 也是流域演化的方式。即使在相同的大环境下, 不同流域也表现出不同的泥石流活动特点。即使在同一流域, 不同分支也有不同的泥石流活动。这说明泥石流依赖于流域的小尺度空间差异, 而不取决于全流域的特征。例如在云南东川蒋家沟, 泥石流主要来源于北支沟(门前沟), 其分支结构、物质分布和物质组成, 都有利于泥石流的形成; 而南支沟(多照沟) 则不具备那么充分的条件。

另一方面, 泥石流, 特别是蒋家沟那样的粘性泥石流, 不是洪水携带泥沙的结果, 而是土体在重力作用下主动运动的结果, 水只是参与流体结构, 起一定的激发作用, 水分含量在流体组成中也不超过 40%。因此, 泥石流是土体的“主动”活动。从具体过程看, 泥石流涉及坡面过程和沟谷过程, 这些过程的随机性和间歇性, 直接导致泥石流阵流的间歇。从流域结构来看, 泥石流的很多特征可以归结为流域系统的行为特征, 例如汇流路径、汇流时间及其同

步性。所以, 泥石流是流域系统的一种整体行为 (Boccaletti, et al., 2006) [1]。

阵流是粘性泥石流的普遍运动形式, 世界很多地方都有观测记录(如 Sharp and Nobles, 1953; Pierson, 1980, 1986; Segerstrom, 1950; Young et al., 1999; Takahashi, 1991) [2-7]。阵流的运动形式取决于流体的特性, 是一般重力流所共有的; 而泥石流阵流序列却是流域行为。我们分析过阵流序列的时空特征, 如分布、衰减和间歇等(李泳等, 2009; Liu et al., 2009) [8-10]。本文以蒋家沟及其泥石流为对象, 具体考察阵流形成的随机过程, 从而解释观测数据所呈现的流量分布规律。

1 蒋家沟的流域特征与泥石流活动

1.1 蒋家沟流域的演化特征

前文(李泳等, 2009) [11] 对蒋家沟进行了演化分区。根据各分支小流域(如 1 级、2 级支沟) 的未侵

收稿日期(Received date): 2011-02-30; 改回日期(Accepted): 2011-07-20。

基金项目(Foundation item): 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q03-5-2), 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 项目(2011CB409902)。[This research is supported by the Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KZCX2-YWQ03-5-2) and the National Program on Key Basic Research Project (973 Program) (2011CB409902).]

作者简介(Biography): 李泳(1967-) 主要从事泥石流和地貌过程的理论研究。[Li Yong, Prof. of IMHE, CAS, current research is focused on the system dynamics of debris flow.]E-mail: ylie@imde.ac.cn

蚀物质的比例 将分支分为 4 个类型: ≤ 0.45 (A), $(0.45, 0.55]$ (B), $(0.55, 0.65]$ (C), > 0.65 (D)。

相邻同类型分支合并,即得到分区图。据多年观测,泥石流主要来自圆圈的区域,即 C 类分支,其侵蚀量在 35% 到 45% 之间,处于各分支流域演化的青壮年时期。因此,泥石流最可能发生在物质总量在 60% 左右的“青壮年”小流域。

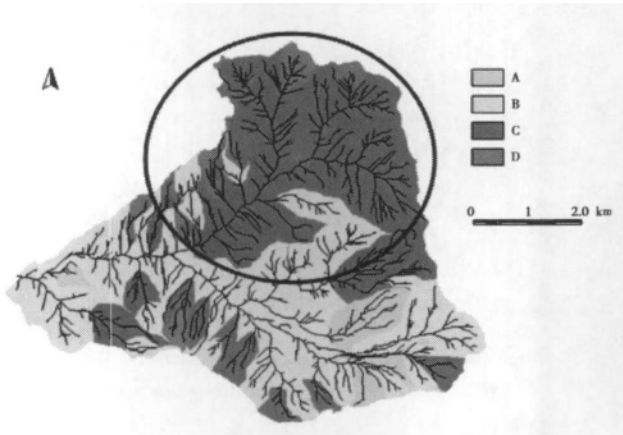


图1 蒋家沟流域演化分区

Fig. 1 Evolutionary division of JJG

演化分区定量确定了小分支的物质总量,也就决定了潜在泥石流的活动规模和频率。分区还揭示了流域演化的不均匀性。如浅色的南支沟主要是 B 类小分支,其侵蚀比例超过了 50%,演化阶段老于 C 类的北支沟。可以推测,南支沟的泥石流活跃期已基本结束,但它曾经有过泥石流活动,现在的多照台地就是不同历史时期泥石流的堆积形成的。

C 类分支成片聚集,沟谷形成很好的连通网络,有利于泥石流从源地向下游的扩张。蒋家沟泥石流的多发,显然与沟谷的这种结构有关。换句话说,流域分支的结构也是泥石流形成和发生的重要因素。以往的研究似乎忽略了这一点。

1.2 泥石流形成的特征

蒋家沟泥石流的形成包含三个阶段:坡面活动→支沟流→汇流。坡面活动取决于坡度和土体结构,支沟泥石流包含液化的坡面土体和启动的沟谷物质,汇流则取决于分支的结构和分支泥石流的同步。这些过程具有如下特征:

1. 自发性。与泥石流有关的坡面活动,如滑坡、崩塌等,虽然与水作用有关(如含水量、孔隙水压),但土体活动仍然是自发性的,而不同于一般由流水启动的土壤侵蚀。

2. 随机性。坡面不稳定活动涉及不同尺度的垮塌(滑坡、崩塌等),这是随机的,发生的位置和时间也是随机的。

3. 整体性。不同分支的形成的局部泥石流,沿一定的路线汇流,形成整个流域的泥石流,不仅取决于局部的分支活动,也取决于流域的分支结构和沟道路径。因为发生时间不同步,路径长短不同,所以汇流结果不同,出现阵流的间歇和规模的涨落。分离而涨落的阵流,恰好是泥石流活动具有流域整体性的表现。

这些特征说明,泥石流活动主要取决于土体活动和流域结构。水当然是泥石流活动不可缺少的,也是基本的物质组成,但它主要影响泥石流作为流体的动力学,而不影响泥石流作为流域过程的特征,如阵流的时空特征。一个有趣的现象是,典型的高重度泥石流阵流(重度 $> 19.6 \text{ kN/m}^3$) 之间往往出现高含沙洪水(重度 $< 15.7 \text{ kN/m}^3$) ,假如泥石流是水激发的产物,这些洪水也应该携带更多固体物质而成为泥石流——事实是,泥石流活动与水流活动是分离的,因而泥石流是“自发的”,而不是被动的。

2 泥石流的概率过程

前文提出了泥石流活动的多级系统框架^[11],从系统活动的角度,定性解释了泥石流的系统特征,如规模频率关系。现在我们具体考察概率过程。根据流域观察和分区,可以做几点假设:

1. 坡面土体不稳定活动(小规模的滑坡和崩塌等)均匀分布在可能的源地分支,其发生概率仅与分支大小成正比;
2. 各分支泥石流的形成是相互独立的;
3. 将分支的坡面活动与沟谷活动的结果看做一个分支泥石流。

根据这几个特点,泥石流可以认为是满足一定概率分布的空间随机过程;如果假定分支流域的泥石流活动满足 Poisson 分布,那么泥石流从源地经汇流向下游的发展过程就可以看作空间 Poisson 过程 (Karlin and Taylor, 2009)^[12]。于是,在面积为 S 的某源地出现 k 个分支的概率为

$$Pr(k) = e^{-\lambda S} (\lambda S)^k / k! \quad (1)$$

其中 λ 为过程的强度参数,可以随不同分支而变化。这个概率分布也可以看作泥石流来源在流域源地的空间分布。

自然状态下的源地泥石流不可能进行单个的观测 实际看到的都是多个源地泥石流汇合的结果。假定分支流 x 在汇流点 p 的有效强度为 $f(p, x, \rho)$,它可理解为分支流对汇流流量的贡献。那么, 各源地的分支流在汇流点 p 的总强度为

$$Y(p, S) = \sum f(p, x, \rho) \quad (2)$$

其中求和遍及所有形成分支流的源地,其数量和空间位置都是随机的。正因为这些随机性,同一个流域才会在相同或相似条件下出现不同性质和规模的泥石流。从这儿可以看到,通过环境因子的组合来判断流域的泥石流活动,只有区域性的意义,而不可能确定具体事件。

$Y(p, S)$ 代表了观测点的汇流流量,其分布由密度函数 f 和分支面积决定。虽然不能确定 f 的形式,但 Y 的分布一般满足指数形式,指数通常由 f 的积分确定^[12]。因此,汇流的强度应满足如下形式的指数分布(其中 $F(f)$ 为 f 决定的函数)

$$P(Y) \sim \exp(-F(f)) \quad (3)$$

以上讨论没有考虑时间因素。阵流的时间性涉及多个因素,如坡面过程的时间间隔,分支流经过汇流路径的时间,沟道的长度,等等。这些因子本身也都是随机变量;如果只考虑综合结果,可将其归入过程本身的随机。如果仅考虑流量的分布,可以不考虑时间因素;但是如果考察阵流在不同时间段的分布,问题就不同了,需要单独考虑间歇时间^[9]。

3 阵流流量分布

蒋家沟泥石流的基本特征是间歇性的阵流。每场泥石流由数十至数百个阵流组成。不论在同一事件还是不同事件之间,阵流流量的涨落都显著而随机。阵流之间的时间间歇大约为 10 ~ 100 s 量级,而其流量涨落可达 3 个数量级。中国科学院蒋家沟泥石流观测研究站在蒋家沟进行了 50 a 的持续观测,获得了较为完备的泥石流阵流系列数据,为系统考察泥石流的形成过程和时空特征提供了条件(部分数据已经整理并公开)。图 2 是 3 场泥石流的阵流流量随阵次的变化。这些特征显然不能用流域的特征和降雨过程来解释,而只能归结为每个阵流的具体形成过程,特别是它们的随机性。阵流时间的间歇性恰好说明其形成在空间的独立性,即不同阵流可能源于不同的源地,即使同一个源地,对不同阵流的贡献肯定也不会相同。实际上,间歇时间可以

认为为新阵流形成的等待时间。^[9]

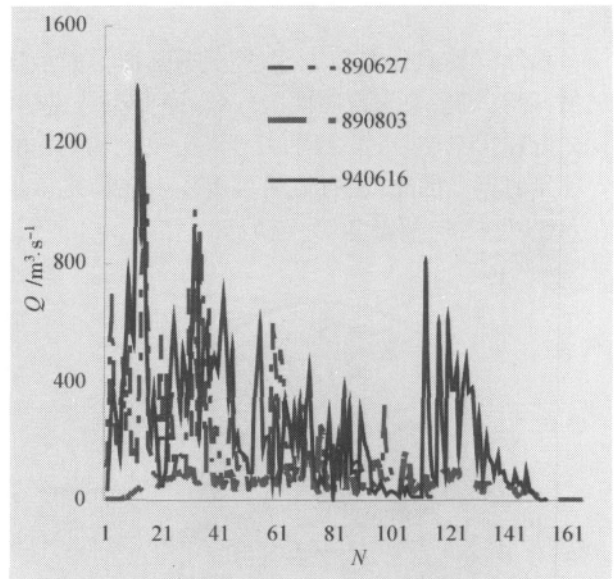


图 2 蒋家沟泥石流阵流流量涨落
Fig. 2 Discharge fluctuation of debris flow surge

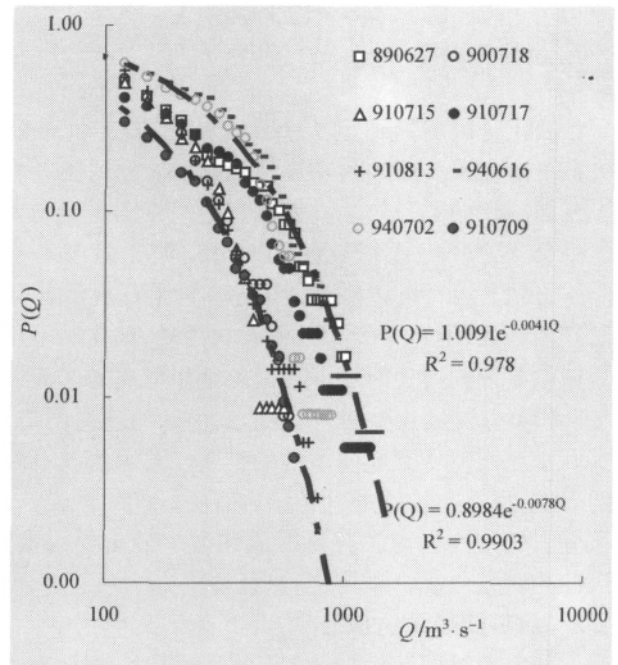


图 3 泥石流阵流流量分布
Fig. 3 Discharge distribution of debris flow surges

根据蒋家沟观测资料的统计,阵流流量呈指数分布

$$P(Q) \sim \exp(-kQ) \quad (4)$$

这正好满足 Poisson 过程的结果 (3)。图 3 是随机选择的几场泥石流的阵流流量分布,其中两条虚线

是拟合的指数曲线。因此,从随机过程的观点,可以很好解释阵流的形成、间歇和流量分布。

指数分布自然导出一个特征流量,定义为 $Q_c = 1/k$,若以它为单位重新标度流量,则不同序列的流量分布落在几乎同一条指数曲线上(图 4)。这进一步证明指数拟合对每个泥石流事件都是适用的,否则不会再新标度的图中达到如此一致的程度。

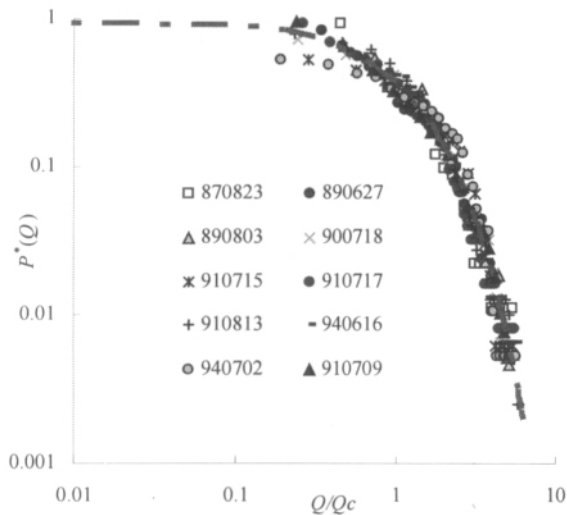


图 4 以最大流量标度的阵流流量分布

Fig.4 Exponential distribution of the rescaled discharges of the surge sequence

另一方面,我们发现每场泥石流的阵流流量分布指数与当场的最大流量有关,而且呈良好的负幂关系(图 5),即

$$k \sim Q^{-\beta} \quad (5)$$

注意到指数 $\beta = 0.99 \sim 1$,所以特征流量实际上就是阵流序列的最大流量^[9,10]。这意味着,最大流量在一个序列中的主导作用。我们认为,这意味着在泥石流阵流的随机过程背后,还存在一定的动力学。^[11]指数分布正是动力系统被随机扰动的表现。

4 结论与讨论

根据蒋家沟泥石流的形成过程,可以将其看作空间的 Poisson 过程,由此可导出阵流流量的指数分布,完全符合蒋家沟泥石流的观测数据。

从随机观点看泥石流,不仅是为了解释其流量分布的产生,更重要的是为了揭示其形成过程的局域性和随机性。泥石流的源地活动仅发生在一定的分支小流域,而且这些分支过程是间歇性的,其形式

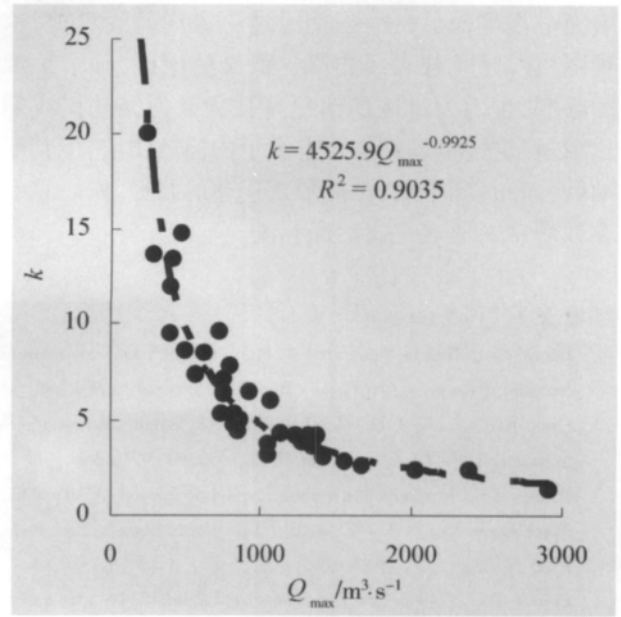


图 5 指数与最大流量的关系

Fig.5 Relationship between exponent and peak discharge

和规模都不断变化。正是这些特征,决定了阵流的间歇和涨落。具体说来,泥石流的形成应该强调如下几点:

1. 泥石流发源于流域的若干局部,而不是整个流域;
2. 源地过程有不同的时间和空间分布,而不是与降雨同步发生;
3. 不同的泥石流(或阵流)来自不同的源地;
4. 同一个源地(分支)可能发源多个阵流,但阵流之间的活动是相互独立的。

因此,泥石流不是流域宏观性质决定的,而是局部活动的随机“集合”。这样看来,根据流域的整体性质,如流域面积、沟长、比降、相对高差等参数来评估泥石流的活动性,不能反应真实的活动情况,更不能说明泥石流在相同流域和相同条件下的变化。

从演化分区看,蒋家沟的泥石流是多源的,而且源地集中分布,形成连通的一片,所以不同源地的活动容易汇合,即使零星的源地活动也可能形成泥石流。这正是蒋家沟泥石流多发而多变的主要原因。当然,泥石流能否发生,还依赖于松散固体物质和降雨条件。即使流域物质很多,泥石流的活动也依赖于物质在流域的分布情况。

随机的观点同样适用于某些低频的泥石流流域(特别是土力类泥石流)。从这个观点看,即使单独一场泥石流(一个阵流),也是随机的结果,只是没

有充分表现而已——正是通过蒋家沟的泥石流,这种随机性才充分表现出来。低频的原因,除了物源的限制,也因为流域的演化特征和几何结构。我们比较过一些流域,它们也有大量的松散物质,但其活动的分布是零星的,不能形成连通的路径,所以只有少数活动能形成主流的泥石流。

参考文献(References)

- [1] Boccaletti S, Latora V, Moreno Y, et al. Complex networks: Structure and dynamics [J]. *Physics Reports* 2006 424: 175 - 308
- [2] Sharp R P, Nobles L H. Mudflow of 1941 at Wrightwood, southern California [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1953 64: 547 - 560
- [3] Pierson T C. Erosion and deposition by debris flows at Mt. Thomas, North Canterbury, New Zealand [J]. *Earth Surface Processes*, 1980 5: 227 - 247
- [4] Pierson T C. Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington [G]//A D Abrahams Ed. *Hillslope Processes (The Binghamton Symposia in Geomorphology: International Series, No. 16)*, Allen and Unwin, Inc., 1986 269 - 296
- [5] Segerstrom K. Erosion studies at Paricutin, State of Michoacan, Mexico [J]. *U. S. Geol. Survey Bull.*, 1950 965A: 164
- [6] Young Kwan Sohn, Chul Woo Rhee, Bok Chul Kim. Debris flow and hyperconcentrated flood-flow deposits in an alluvial fan, Northwestern Part of the Cretaceous Yongdong Basin, Central Korea [J]. *The Journal of Geology*, 1999 (107): 111 - 132
- [7] Takahashi T. Debris flow [M]. *IAHR/AIRH Monography Series*, A. A. Balkeman, Rotterdam, 1991: 2
- [8] Li Yong, Liu Jingjing, Su Fenghuan, et al. Integrity of debris flow surge sequence [J]. *Frontier of Earth Sciences*, 16(4): 381 - 388 [李泳, 刘晶晶, 苏凤环, 等. 泥石流阵流序列的整体性 [J]. *地学前缘*, 16(4): 381 - 388]
- [9] Liu Jingjing, Li Yong, Su Pengcheng, et al. Temporal variation of intermittent surges of debris flow [J]. *Journal of Hydrology* 2008, 365(3-4): 322 - 328
- [10] Liu J J, Li Y, Su P C, et al. Magnitude-frequency relations in debris flows [J]. *Environ. Geol* 2008 55: 1345 - 1354
- [11] Li Yong, Hu Kaiheng, Su Fenghuan, et al. Debris flow viewed from valley evolution—a case study of Jiangjia Gully, Yunnan [J]. *Journal of Mountain Science* 2009 27(4): 449 - 456 [李泳, 胡凯衡, 苏凤环, 等. 流域演化与泥石流的系统性——以云南东川蒋家沟为例 [J]. *山地学报* 2009 24(3): 320 - 326]
- [12] Karlin S, Taylor H. *A second course in stochastic Processes* [M]. Singapore, Elsevier 2009

Debris Flow as a Spatial Poisson Process

LI Yong^{1,2}, SU Pengcheng^{1,2,3}, SU Fenghuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

3. Graduate University of CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Debris flows in Jiangjia Gully present a variety of appearances and cover a wide spectrum of motion regime. Each event consists of surges of various viscosities, densities, velocities and discharges. The surges are temporally separated and fluctuate reasonably, with discharge ranging between orders of magnitude of $10 \sim 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$. These appearances can be attributed to the origins of debris flows from a special group of tributaries associated with specific evolution features. Field observations indicate that slope and channel processes are randomly distributed over the source areas and conform to the category of spatial Poisson process, meaning that the processes are independent of one another and the intensity is proportional to the area of the local source. Then a debris flow surge is actually a pooled process and the resulted intensity, i. e. the discharge in the circumstance, satisfies the exponential distribution. This agrees well with the observation in Jiangjia Gully. From the stochastic viewpoint, debris flow depends primarily on the spatial heterogeneity of valley and the local processes in tributaries, but not so much on the full-valley parameters.

Key words: valley evolution and division; spatial Poisson process; debris flow; discharge distribution; Jiangjia Gully