



铁路泥石流非线性研究 与防治新技术

TIELU NISHILIU

FEIXIANXING YANJIU

YU FANGZHI XINJISHU

蒋忠信 姚令侃 艾南山 崔之久 著



四川科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

铁路泥石流非线性研究与防治新技术/蒋忠信等编著.
成都:四川科学技术出版社,1999.9
ISBN 7-5364-4314-5

I.铁… II.蒋… III.①铁路路基-泥石流-研究②铁路路基-泥石流-防治 IV.U216.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 43297 号

内容简介

本书是铁路泥石流两项研究成果专著,其内容紧密结合泥石流非线性特征和铁路泥石流防治工程,论述山区铁路泥石流的评判、预测、选线与防治。全书共分六章,分别论述泥石流流域的嫡、暴雨泥石流沟的判别、泥石流趋势预测、段家河泥石流及其防治、泥石流的非线性机制和泥石流区铁路选线系统。著述突出了理论上的创新性和技术上的先进性,具有理论与实践相结合的特色。

本书由具有较高理论水平和较丰富实践经验的专家、学者研著。其内容对山区泥石流有普适性,可供铁路勘测设计与运营部门人员、泥石流研究与防治工作者、政府有关部门公务员和有关高等院校师生参阅。

前 言

泥石流是我国山区的主要自然灾害之一,全国已纳入数据库的泥石流即达 5641 条。铁路是串联系统,又多沿河行进,泥石流成灾率高,影响面广,灾害深重。全国铁路沿线纳入数据库的泥石流沟达 1509 条,建国后发生较大泥石流灾害 291 起,一般泥石流灾害 1173 起。泥石流活动具有明显的非线性特征,铁路泥石流防治具有自身的特点。泥石流的研究和防治成为山区铁路勘测设计和通车运营的主要防灾减灾任务之一。

铁路泥石流减灾工作体现在选线、设计、施工、运营的全过程,并各有侧重。在铁路选线阶段,以区域性泥石流危险度区划为基础。初测和初步设计阶段,重在进行单沟泥石流判别以优化线路方案。定测和技术(施工)设计阶段,根据泥石流严重程度和趋势预测拟订相应的防治工程方案。铁路施工阶段,采取措施预防弃碴泥石流的产生。通车运营阶段,一方面保护自然环境,预防人为泥石流的形成;另一方面对泥石流沟进行预警和预报,防灾于未然。

近十年来,随着南昆铁路、内昆铁路的兴建,承担西南山区铁路勘测设计工作的铁道部第二勘测设计院在铁道部的支持和兄弟单位的协助下,基于非线性理论和勘测设计新技术,开展了西南山区暴雨泥石流的单沟判别、趋势预测、铁路选线和工程防治的研究,并用以指导勘测设计实践。泥石流区新线铁路勘测设计的首要问题是泥石流沟的判别和泥石流趋势预测。据此,1990 年铁二院立题、蒋忠信主持于 1992 年完成了“新建铁路泥石流灾害预测”研究。该课题基于泥石流流域系统的信息熵和超熵的研究,建立了西南山区暴雨泥石流沟的简易判别方法,并基于泥石流形成因素的灰色性和人为活动的影响,提出了新建铁路泥石流发展趋势的预测模式。该成果于 1993 年 4 月通过中国铁路工程总公司的鉴定,认为“在研究的深度和广度上处于国内领先地位,其中泥石流流域稳定性熵判据的研究达到国际先进水平”。在判别和预测之后,泥石流区铁路勘测设计的重要问题是查明泥石流的环境与灾害特征,优化铁路选线和防治工程设计。因此,结合在建南昆铁路典型泥石流区段家河流域及其泥石流支沟冷水沟,1991 年由铁道部立题、于 1993 年完成了“南昆线段家河泥石流灾害研究与防灾对策”的研究。该课题由铁二院(蒋忠信)主持,铁道科学院西南分院、西南师范大学地理系、北京大学地理系及四川大学物理系协作完成。在系统研究泥石流活动非线性机制和综合应用铁路泥石流勘察新技术的基础上,该课题系统研究了段家河泥石流灾害及其环境特征,进而拟订了段家河泥石流灾害防治规划。同时,基于风险分析和经济评估,研制了泥石流区铁路选线和优化设计的计算机辅助决策系统。该成果于 1994 年 12 月通过铁道部鉴定,认为“该项成果总体上达到国内领先水平”。

两项研究成果的部分内容虽已由各参加单位撰写成若干文章予以发表,还缺乏系统性和完整性,许多资料和数据也未得以刊布。为了全面展示这些研究成果,并考虑到两项成果之间具有有机联系,因此将这两项研究成果合编为本书,冠名为《铁路泥石流非线性研究与防治新技术》。本书在两项研究成果报告的基础上,根据最新成果对相关章节进行了补充修改,以保持内容的新颖性。全书共分六章,前三章为“新建铁路泥石流灾害预测”成果内容,分别论述泥石流流域稳定性的熵判据、西南山区暴雨泥石流沟的判别和泥石流趋势的预测,由蒋忠信撰

写,其中补充了对泥石流流域地貌演化非线性研究问题探讨和内昆铁路泥石流沟简易判别两节。后三章为“南昆线段家河泥石流灾害研究与防灾对策”的成果内容,其中第四章论述段家河泥石流灾害与防治对策,原研究报告由铁二院蒋忠信、陈光曦教授级高工、严璧玉高工、袁林义、徐晓琴工程师和陶然硕士,西南师大唐晓春、罗鉴银教授,西南交通大学姚令侃教授(原铁科院西南分院博士),北京大学崔之久、谢又予教授、伍永秋博士,四川大学张一云教授等分别撰写。其中由崔之久等所撰《冷水沟泥石流沉积特征》编为本书第四章第四节,第四章其余各节在原研究报告的基础上,由蒋忠信补充修改定稿。第五章泥石流活动的非线性机制,除第二节之三“段家河流域水系的分维”由伍永秋撰写外,其余部分均由四川大学艾南山、李后强、苟兴华和侯文贵撰写。第六章铁路选线辅助决策系统,由姚令侃撰写,其中第四节为近年铁二院立题、蒋忠信主持的“铁路地质灾害防治的经济评估与风险分析”中姚令侃完成的子课题“铁路泥石流防治工程的风险分析与经济评估”之部分成果内容。全书由蒋忠信统稿。恳请专家、读者对本书内容进行批评、指正。

本书的出版得到了铁道部第二勘测设计院岩土工程公司的大力支持和经费资助,在此深表谢意。

蒋忠信

1999年2月

目 录

第一章 泥石流流域稳定性的熵判据	(1)
第一节 泥石流沟谷纵剖面形态与流域地貌信息熵	(1)
一 泥石流沟谷纵剖面形态特征	(1)
二 泥石流流域地貌信息熵	(3)
三 成昆铁路北段实例	(5)
第二节 泥石流流域系统的超熵	(9)
一 N 值表达的流域系统超熵	(9)
二 泥石流流域系统的超熵	(11)
三 成昆铁路北段沙湾至泸沽段实例	(12)
第三节 泥石流流域地貌演化非线性研究有关问题探讨	(18)
一 流域地貌系统的熵	(18)
二 流域水系的分维	(20)
三 熵与分维的结合	(22)
第二章 西南山区暴雨泥石流沟的判别	(25)
第一节 西南山区暴雨泥石流沟简易判别方案	(25)
一 判别指标的优选	(25)
二 判别方案的设计	(28)
三 判别阈值的厘定	(29)
第二节 西南山区暴雨泥石流沟简易判别方案的应用	(37)
一 成昆北泥石流沟灾害严重性评判	(37)
二 内昆铁路安边至彝良段泥石流沟之简易判别	(39)
第三节 南昆铁路罗善村至永丰营区间沟谷泥石流及其评判	(49)
一 区域地质地理特征	(49)
二 沟谷泥石流基本特征	(51)
三 区域泥石流发育条件分析	(53)
四 泥石流沟的评判	(55)
第三章 泥石流趋势预测	(58)
第一节 降雨的时空变化与暴雨的灾变预测	(59)
一 降雨的周期变化——气候序列的最优分割(以上海为例)	(59)
二 降水随高度的变化规律	(65)
三 暴雨泥石流灾变预测(以宜良为例)	(65)
第二节 沟谷纵剖面形态指数 N 的不等时距灰色预测与推算预测	(68)
一 N 值的不等时距灰色预测方法	(68)
二 实例: 利子依达沟	(70)
三 问题的讨论	(71)
四 N 值的推算预测	(72)
第三节 松散固体物质动储量变化的预测	(72)
一 松散固体物质动储量的 GM(1,3) 预测模型	(73)

二	GM(1,3)预测算例	(74)
三	人为活动对预测结果的影响	(76)
四	泥石流形成中人为作用的定量分析	(78)
第四节	林地率 P 的马尔科夫预测	(79)
第四章	段家河泥石流灾害及其防治对策	(83)
第一节	流域灾害环境特征	(83)
一	向斜构造特征与次成河谷地貌	(84)
二	碳酸盐岩分布与岩溶地貌形态	(85)
三	煤系地层分布与人类经济活动	(86)
四	植被覆盖状况与坡地侵蚀分区	(87)
五	节理断裂统计与坡地重力地貌	(88)
六	区域气候条件与流域汇流特征	(92)
七	流域灾害环境系统分析	(94)
第二节	流域泥石流特征	(95)
一	流域泥石流的发育条件	(95)
二	流域泥石流沟的评判	(100)
三	泥石流沟的基本特征	(100)
四	流域泥石流的发展趋势	(102)
第三节	冷水沟泥石流特征研究	(106)
一	泥石流发育的地面条件	(106)
二	1957 年泥石流特征	(108)
三	^{210}Pb 测试与泥石流重现期	(111)
四	泥石流发展趋势与危害	(112)
第四节	冷水沟泥石流沉积特征	(113)
一	堆积地貌	(113)
二	剖面特征	(114)
三	结构特征	(115)
四	构造特征与沉积类型	(119)
五	粘土矿物分析	(121)
第五节	段家河淤积特征研究	(122)
一	^{137}Cs 测试与泥沙来源	(122)
二	洪水特征	(124)
三	下游坝区淤积特征	(127)
四	人工河道淤涨规律	(129)
五	河道淤涨的危害	(131)
第六节	泥石流与河道淤涨的防治研究	(132)
一	改善线路方案的意见	(132)
二	灾害防治原则	(133)
三	泥石流防治工程规划	(134)
四	煤矿弃碴、水土流失治理规划	(137)
五	人工河槽的改造方案	(141)
六	流域减灾工程规划的实施意见	(146)

第五章 泥石流活动的非线性机制	(149)
第一节 泥石流沟流域演化的非线性方程	(149)
一 数学模型的引出	(149)
二 段家河流域地貌的信息熵	(151)
三 激波和湍流在流域演化中的作用	(152)
第二节 泥石流流域和沟谷地貌的非线性特征	(154)
一 分形的基本概念	(154)
二 流域地貌分形研究回顾	(155)
三 段家河流域水系的分维	(159)
四 泥石流沟形态计量的非线性关系	(161)
第三节 泥石流发育的渗流模型	(169)
一 泥石流暴发的渗流机制	(169)
二 临界状态的定量描述	(173)
三 广义 Fibonacci 渗透	(174)
第四节 泥石流是一种自组织临界现象	(176)
一 自组织临界状态的沙堆模型	(176)
二 泥石流的自组织临界性	(178)
三 泥石流的预测、预报	(178)
第六章 泥石流地区铁路选线辅助决策系统	(185)
第一节 泥石流地区铁路选线辅助决策系统简介	(185)
第二节 泥石流地区铁路线路系统可靠性评估	(186)
一 泥石流地区铁路线路系统可靠性定义	(186)
二 泥石流地区线路系统可靠性计算方法	(187)
第三节 泥石流防治工程中的风险分析	(190)
一 风险分析的基本概念与内容	(191)
二 泥石流防治工程的风险识别	(192)
三 铁路泥石流个体工程方案比选的期望工程费法	(194)
四 铁路泥石流工程局部方案近似寻优方法	(196)
第四节 泥石流防治工程优化设计方法初探	(199)
一 泥石流防治工程优化设计模型及求解方法	(199)
二 工程设计实例	(200)
第五节 铁路泥石流二次灾害风险的预测	(206)
第六节 泥石流地区定线主要因素关系分析及阶段性系统可靠性评估	(208)
一 泥石流地区定线主要因素关系分析	(208)
二 马尔可夫模型在泥石流区铁路线路系统阶段性可靠性状态评估中的应用	(213)

第一章 泥石流流域稳定性的熵判据

“熵”的希腊文意思是发展演化。熵概念是德国物理学家克劳修斯于 1865 年在对热机的物理化学过程的研究中引入的,这一概念对自然科学产生了持久而深远的影响。著名的熵公式 $S = k \ln W$ 是波尔兹曼给出的。广义的熵是能给系统的不确定程度以某种整体度量的量,出现了熵的多种定义,如柯尔莫哥洛夫熵、申农信息熵($S = -K \sum p_i \ln p_i$)。

泥石流流域是一个开放系统,泥石流的暴发表现为系统的物质和能量的输出。泥石流的发育与流域地貌系统的稳定性相关,这种稳定性应该可以用地貌系统的熵来描述,艾南山等业已对流域系统的信息熵进行了研究^[1],对探讨泥石流流域稳定性打下了基础。本章据此研究泥石流流域稳定性的熵判据,包括信息熵和超熵,作为评判泥石流的地貌依据。

第一节 泥石流沟谷纵剖面形态与流域地貌信息熵

实践经验表明,泥石流的流域面积、相对高差、山坡坡度、沟谷纵剖面形态和主沟平均坡降等流域形态因子对泥石流的形成、发育均有明显影响^[2]。这些形态因子众多,影响各异,使泥石流的评判尤其是现场调查工作量甚大,也带来某种不确定性。所以,探寻富含流域稳定性信息的形态指标,以提高评价、预测泥石流灾害的效率与信度,是十分必要的。

流域沟谷纵剖面形态指数、流域地貌信息熵近年来已开始用以评价流域系统的稳定性。我们曾探讨过大流域的河谷纵剖面形态和矩形流域地貌信息熵。由于泥石流流域的规模、形态和动力的特殊性,其沟谷纵剖面形态特征、流域地貌信息熵有其特点,值得进一步探讨。本节以成昆铁路北段沟谷为例,探讨条件均一、形态典型的泥石流流域之沟谷纵剖面形态特征与演化规律,进而研究这种小流域的面积-高程曲线、斯特拉勒积分和地貌信息熵的数学表达式,推荐用沟谷纵剖面形态指数 N 评价泥石流流域的稳定性和演化动态,作为评判泥石流的一项主要指标。

一、泥石流沟谷纵剖面形态特征

我们曾用以河口为原点的抛物线方程描述河谷纵剖面形态,即 $h = h_0(l/L)^N$ ^[3]。前提是河流的流量与河长成比例,适用于常见的长宽比较大的矩形流域。而泥石流流域是小流域,长宽比一般不大,具有狭窄的流通区和膨大的形成区,因而典型的平面形态是以出山口为顶点的扇形或菱形。

如图 1-1A 所示,一个扇形泥石流流域,由于面积小,流域内气候、植被条件较均一,岩性、构造简单,水分布匀称,支沟基本与扇径平行,近似于产水产沙条件均匀的理想流域。常见的降水随高度的变化可忽略不计。据此,流域内沟谷径流量 Q 应与相应的汇水面积 a 成正比,即 $Q = ma$, m 为径流模数。

以沟头为原点,距沟头的沟长 l 与全长 L 之比为横坐标,过主沟上点 x 的汇水面积 a 为以 x 为半径、 α 为圆心角(弧度计)的扇形,因 $a = (\alpha/2)x^2$,故过点 x 的流量 $q = ma$ 。

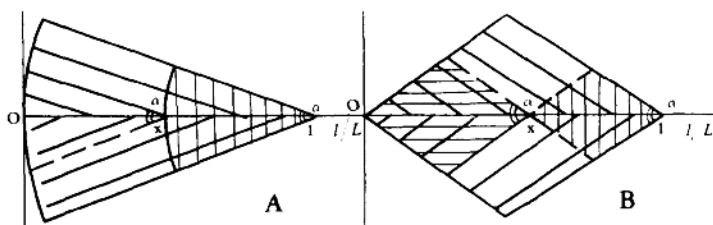


图 1-1 扇形(A)、菱形(B)小流域之理想形状

据经验,河流纵比降 J 与造床流量 Q 有如下关系: $J = K/Q^n$ ($n < 1$), 且 J 又为河段落差 Δh 与河段长 Δx 之比。这也适用于泥石流沟谷:

$$J = -\frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{K}{Q^n}$$

代入 $Q = m \frac{\alpha}{2} x^2$, 当 $\Delta x \rightarrow 0$ 时, 则有

$$-dh = Km^{-n} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^{-n} x^{-2n} dx$$

沟谷纵剖面即为 h 之沿程变化。故对上式积分:

$$-h = \frac{K}{1-2n} m^{-n} \left(\frac{\alpha}{2} \right)^{-n} x^{1-2n}$$

对定流域, α 为定值, m 为常数, 故可设系数 $c = (K/1-2n) m^{-n} (\alpha/2)^{-n}$, $N' = 1-2n$, 则

$$h = -cx^{N'}$$

沟头处, $x=0$, 故 $h=0$; 沟口处, $x=1$, 故 $h=-c$ 。因此, 流域高差 $h_0=c$ 。得扇形流域沟谷纵剖面形态方程为:

$$h = -h_0 x^{N'} \quad (1-1a)$$

或

$$\frac{h}{h_0} = -\left(\frac{l}{L} \right)^{N'} \quad (1-1b)$$

这是以沟头为原点的抛物线方程。 $N' < 1$ 时上凸; $N' = 1$ 时直线; $N' > 1$ 时下凹。

变换为以沟口为原点时, x 在新坐标系中变为 $(1-x)$; α 变为 $\alpha/2(1-x)^2$ 。故以沟口为原点的扇形流域沟谷纵剖面方程为:

$$h = -h_0(1-x)^{N'}$$

或

$$\frac{h}{h_0} = -\left(1 - \frac{l}{L} \right)^{N'} \quad (1-2)$$

(1-1)式的推导基于侵蚀基准相对稳定的条件, 忽略了基准下降时侵蚀下切由沟口向沟头的传递过程, 以及沟谷各段接受侵蚀的历时长短、侵蚀量积累之差异。事实上, 基准下降与侵蚀共生, 纵比降从沟口向沟头的全面变缓要比(1-1)式快, 纵剖面与(1-1)式有所偏离, 更近似于以沟口为原点的抛物线(图 1-2):

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{l}{L} \right)^N \quad (1-3)$$

可见,在主河下切继以稳定的条件下,均一泥石流流域的沟谷纵剖面形态与一般河流一样,为以沟口为原点的抛物线。 $N < 1$, 上凸形; $N = 1$, 直线形; $N > 1$, 下凹形。

对于菱形流域(图 1-1), 设过主沟上点 x 的流域形状也为菱形, 对角线长为 l 与 $l \operatorname{tg}(\alpha/2)$, 相应流域面积 $a = (1/2) l^2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2)$ (α 以度计)。因此, 沟谷纵剖面方程为:

$$-h = \frac{K}{2(1-2n)} m^{-n} \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right)^{-n} x^{1-2n}$$

设 $c = K/2(1-2n) m^{-n} (\operatorname{tg}(\alpha/2))^{-n}$, $N' = 1-2n$, 且 $h_0 = c$, 仍有 $h/h_0 = -(l/L)^{N'}$ 。所以, 扇形流域的结果对泥石流流域具有普遍意义。

(1-1)、(1-3)式也反映了泥石流流域的演化动态。由于泥石流动力作用特别强, 其沟谷纵剖面的演化速率远比一般河谷快, 但演化顺序与一般河流相似。

泥石流多发生于山区次级小流域。作为相对侵蚀基准的主河由于构造抬升, 处于不断的下切侵蚀中, 致使其谷坡变陡、支沟坡降增大, 坡面侵蚀加剧, 泥石流频发, 大量固体物质进入河床。当达到冲淤动态平衡, 或水流搬运能力不能适应时, 即转入侧蚀或加积阶段。这时, 主河的稳定反过来又影响谷坡和支沟的剥蚀, 形成一个有自我调节能力的反馈控制系统。

主河这种下降继以稳定的周期性, 使泥石流沟谷纵剖面和流域地貌, 理论上应与在地壳抬升继以长期稳定条件下河流纵剖面具有类似的演化规律。

主河下切期, 支沟由于水动力较弱, 跟不上主河的下切, 再加支沟下切又有从沟口向沟头传递和积累的过程, 沟谷纵剖面因而形成上凸抛物线形, 流域地貌趋向复杂化, 处于深切侵蚀期。此时纵剖面形态指数 $N' > 1$ ($0 < N < 1$), 即 $n < 0$, 有纵比降 $J \propto Q^n$ 。这是一种不稳定关系, 流量 Q 较大处需有较小坡降与之适应, 才能寻得能量平衡, 因而必然产生下切侵蚀。主河停止下切后, 沟谷向坡降与水动力相适应的均衡方向发展, 纵剖面呈下凹抛物线形, 流域地形趋向和缓, 处于均衡调整期。此时, $0 < N' < 1$ ($N > 1$), 即 $1/2 > n > 0$, 有 $J \propto 1/Q^n$, 坡降与流量趋向适应。深切侵蚀向均衡调整之过渡阶段, $N' \approx 1$ ($N \approx 1$), 即 $n \approx 0$, J 为定值, 纵剖面近于直线形。

但是, 泥石流有不同于一般河流的若干特点, 纵剖面演化也有与上述不同的特点:

(1) 泥石流下切力远水动力强。在主河下切期, 一旦沟谷侵蚀导致泥石流暴发后, 沟床就急剧下切, 最大的一次下切深度可达 10 多米, 从而迅速向凹形纵剖面发展。

(2) 泥石流侵蚀下切主要在中下游段流通区, 更加剧了纵剖面向凹形转化。

(3) 由冲淤平衡导致的主河相对稳定期不长, 泥石流沟谷向均衡剖面发展将中途夭折, 纵剖面下凹不会太甚, 准平原难以形成。

因此, 泥石流流域的侵蚀循环为: 沟谷纵剖面随形态指数 N 由小变大而由上凸形经直线形向下凹形抛物线形发展, 但上凸阶段短暂。在与主河下切期相应的深切蚀后半期, 沟谷纵剖面即可具有凹形, 仅均衡调整期纵剖面的凹度更大。而且, 这种侵蚀循环极不完整, 难以形成均衡剖面, 纵剖面凹度存在一个限度范围。

二、泥石流流域地貌信息熵

对条件均一的矩形流域, 我们曾推导出^[4]:

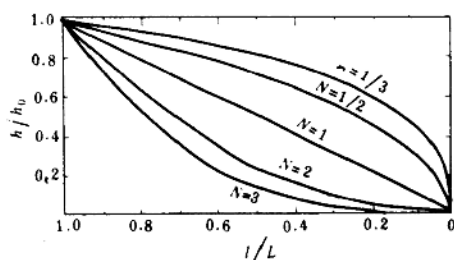


图 1-2 小流域沟谷纵剖面的理想形态

$$\text{流域面积-高程曲线} \quad \frac{h}{h_0} = \left(\frac{l}{L}\right)^N \quad (1-4a)$$

$$\text{斯特拉勒积分} \quad S = \frac{1}{N+1} \quad (1-4b)$$

$$\text{地貌信息熵} \quad P = \ln(N+1) - \frac{N}{N+1} \quad (1-4c)$$

矩形流域的河长 l 与流域面积 a 成正比, 扇形、菱形流域则不符合这一条件, 故泥石流流域地貌信息熵也应与矩形流域相异。

以扇形流域为例(图 1-1A), 过主沟上点 x 的等高线所围流域面积 $a = \alpha/2x^2$ (圆心角 α 以弧度计)。对全流域($x=1$), $A = \alpha/2$ 。因此, $a/A = x^2$ 。又因 $h/h_0 = (l/L)^N$, 而 $a/A = x^2 = (l/L)^2$, 故斯特拉勒流域面积-高程曲线为:

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{a}{A}\right)^{\frac{N}{2}} \quad (1-5a)$$

式中, a/A 、 h/h_0 均在 $[0, 1]$ 取值。对此式积分, 得斯特拉勒积分值为:

$$S = \int_0^1 \left(\frac{a}{A}\right)^{\frac{N}{2}} d\left(\frac{a}{A}\right)$$

$$\text{即} \quad S = \frac{2}{N+2} \quad (1-5b)$$

S 值富有地貌动态信息, 曾用以表征戴维斯的地貌发育期, 在 $[1, 0]$ 取值。

根据艾南山^[1]构造的密度函数 $g(x) = f(x)/\int_0^1 f(x)dx = f(x)/S$, 对扇形流域

$$\text{有} \quad g(x) = \frac{N+2}{2} \left(\frac{a}{A}\right)^{\frac{N}{2}}$$

因为 $g(x) \geq 0$, 又 $\int_{-\infty}^{\infty} g(x)dx = 1$, 故 $g(x)$ 是一个密度函数。

根据申农信息熵的表达式 ($S = -K \sum P_i \ln P_i$), 侵蚀流域的信息熵被定义为^[1]

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \ln g(x) dx$$

$$\text{且有} \quad P = S - 1 - \ln S$$

对扇形流域:

$$P = \int_0^1 \frac{N+2}{2} \left(\frac{a}{A}\right)^{\frac{N}{2}} \ln \left(\frac{N+2}{2} \left(\frac{a}{A}\right)^{\frac{N}{2}} \right) d\left(\frac{a}{A}\right)$$

$$\text{得} \quad P = \ln \frac{N+2}{2} - \frac{N}{N+2} \quad (1-5c)$$

对比(1-4)、(1-5)两式, 可见矩形流域与扇形流域的信息熵表达式有差异。但它们的共同点在于, 斯特拉勒积分 S 、地貌信息熵 P 都是纵剖面形态指数 N 的函数, N 值富涵流域演化与稳定性的信息。

对菱形流域(图 1-1), 以沟口为原点, 过主沟上点 x 所围流域面积 $a = (1/2)x^2 \tan \frac{\alpha}{2}$, (α 以度计)。故 $a/A = x^2$, 与扇形流域相同; 且菱形流域沟谷纵剖面方程也与扇形流域相同。因此, 菱形流域地貌信息熵应与扇形流域具有相同的表达式, 扇形流域的结论能覆盖各种形态的泥石流流域。

泥石流沟谷纵剖面形态指数 N 、斯特拉勒积分值 S 、流域地貌信息熵 P 具有以下地貌信息涵义:

1. 流域地貌形态的信息

N 值代表泥石流沟谷纵剖面形态。 $N < 1$, 为上凸抛物线形; $N \approx 1$, 为直线形; $N > 1$, 为下凹抛物线形。

N 值还能反映流域内地形坡度。由于泥石流上游形成区面积大, 而凹形纵剖面时上游段的坡降大, 因此 N 值大, 流域平均坡度也大。

2. 流域地貌演化的信息

在相对侵蚀基准下降继以稳定的条件下, 泥石流流域类似封闭地貌系统。其侵蚀循环进程是, N 、 P 值由近于 0 逐渐增大, 沟谷纵剖面由凸向凹演化, 流域地貌由深切侵蚀向均衡调整发展, 地貌形态由“幼年”, 经“壮年”, 向“老年”进化。

对一般河流, 斯特拉勒曲线形态和 S 值可表征侵蚀循环期。曲线上凸 ($S > 0.60$), 流域地貌处于幼年期; 近于直线形 ($S = 0.60 \sim 0.35$), 处于壮年期; 曲线下凹 ($S < 0.35$), 进入老年期^[5]。对泥石流流域, 分期指标值则与之有异。我们以与斯特拉勒曲线为直线形 ($S = 0.50$) 对应的 N 值 ($N = 2.0$) 为界限, 将 $N < 2$ 划为深切侵蚀期; $N > 2$ 划为均衡调整期; $N \approx 2$ 为其间过渡期(图 1-3)。

3. 流域地貌稳定性的信息

泥石流流域事实上是开放的地貌系统, 其 N 、 P 值反映内、外营力对抗的规律。在 $N < 2$ ($P < 0.193$) 的深切侵蚀期, 流域地貌趋向复杂, 谷坡剥蚀加剧, 流域稳定性变差, 导致泥石流等灾害暴发。其中, 当 N 值小于与幼年期 S 值对应的 1.33 时, 为泥石流发育期; 当 N 值较大时 ($1.33 \leq N \leq 2$), 占流域面积大部分的形区之地形坡度变陡, 有利于暴雨径流的迅速集中, 也有利于作为泥石流固体物质来源的崩塌、滑坡的形成, 故为泥石流旺盛期。 N 值更大后 ($N > 2$), 进入均衡调整期, 流域地貌渐趋和缓, 谷坡剥蚀减轻, 沟谷中、下游纵比降甚缓, 流域稳定性增强, 为泥石流衰退期。

上述表明, 沟谷纵剖面形态指数 N 、流域地貌信息熵 P , 在戴维斯模型代表的封闭的流域系统中表示流域地貌演化的阶段, 在内外营力同时作用的开放流域系统中表示内外营力对抗作用的强度。而 P 又是 N 的函数, 因此可望将 N 值作为评判泥石流灾害的一种有前途的地形指标。尽管这是以斯特拉勒曲线作为推导信息熵的基础, 而斯特拉勒曲线是表示流域系统在内外营力作用大致相等时处于瞬时平衡的形态特征, 与实际情况有所差异, 但仍不失为流域系统真实情况的一种近似^[6], 结果仍是可以应用的。

三、成昆铁路北段实例

成昆铁路沿线泥石流沟谷密集, 灾害频发。我们在沙湾至甘洛段选择出 6 条形状典型、纵剖面类型齐全的小流域作为实例, 来检验本文的沟谷纵剖面形态模式和流域地貌信息熵表达式。6 条流域除干溪沟 2 号外, 均为泥石流流域。

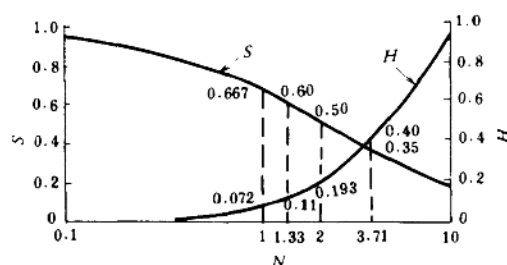


图 1-3 泥石流流域的 N 、 S 、 P 值之对应关系图

表 1-1 成昆铁路北段 6 条小流域的形态计量数据

沟 名 (里程)	流域形状与 面积(km^2)	主沟长度(km) 与高程(m)	流 域 数 据											
干溪沟 2 号 (K245+650)	扇形 5.98	5.18 560~1600	h/h_0	0.135	0.327	0.527	0.615	0.712	0.828	0.904	1.0			
			l/l_0	0.058	0.116	0.193	0.282	0.375	0.456	0.730	1.0			
			a/A	0.023	0.034	0.088	0.123	0.172	0.253	0.410	1.0			
大火夹沟 (K247+099)	菱形 8.73	5.46 550~1800	h/h_0	0.120	0.280	0.440	0.600	0.760	0.840	0.920	1.0			
			l/l_0	0.165	0.348	0.485	0.604	0.736	0.846	0.938	1.0			
			a/A	0.037	0.112	0.270	0.449	0.666	0.764	0.892	1.0			
新寨子沟 (K280+259)	菱形 3.03	2.72 650~2250	h/h_0	0.094	0.219	0.375	0.531	0.656	0.844	1.0				
			l/l_0	0.127	0.276	0.423	0.614	0.710	0.875	1.0				
			a/A	0.152	0.333	0.455	0.636	0.818	1.0					
利子依达沟 (K282+996)	菱形 24.49	7.72 640~2400	h/h_0	0.091	0.176	0.290	0.403	0.517	0.631	0.767	1.0			
			l/l_0	0.168	0.324	0.486	0.602	0.709	0.786	0.890	1.0			
			a/A	0.019	0.045	0.124	0.220	0.346	0.517	0.770	1.0			
窄板沟 (K306+333)	扇形 10.0	3.97 940~2000	h/h_0	0.104	0.292	0.396	0.528	0.623	0.717	0.811	1.0			
			l/l_0	0.101	0.264	0.390	0.544	0.632	0.738	0.849	1.0			
			a/A	0.178	0.315	0.452	0.589	0.726	0.897	1.0				
内侧沟 (K315+802)	扇形 13.50	5.30 980~2240	h/h_0	0.023	0.090	0.182	0.318	0.624	0.824	1.0				
			a/A	0.095	0.175	0.254	0.413	0.571	0.730	1.0				
			l/l_0	0.147	0.308	0.421	0.602	0.715	0.830	1.0				
			a/A	0.017		0.093	0.206	0.386	0.609	1.0				

各流域形态量测数据经规格化后汇总于表 1-1。其中曲线拟合所采用的沟谷长度、流域面积未包含近沟头段沟谷不明显那部分。流域平面形态以利子依达沟和窄板沟为例(见图 1-4、1-5)。

用过沟口、沟头的幂函数曲线拟合沟谷纵断面和流域面积-高程曲线,最佳拟合式及据此算出的斯特拉勒积分值 S 、地貌信息熵 P 列于表 1-2。其中计算 N 值的步长为 0.01。

表 1-2 所列斯特拉勒曲线形态指数 α ($\alpha = N/2$)、 P 的值与据 N 值按(1-5)式算得的 $(N/2)$ 、 P 值对比于表 1-3。表明(1-5)式计算结果与实际还是有一些偏差。斯特拉勒曲线形态指数的相对偏差为 44% ~ -21%, 平均为 22.7%; 信息熵 P 的

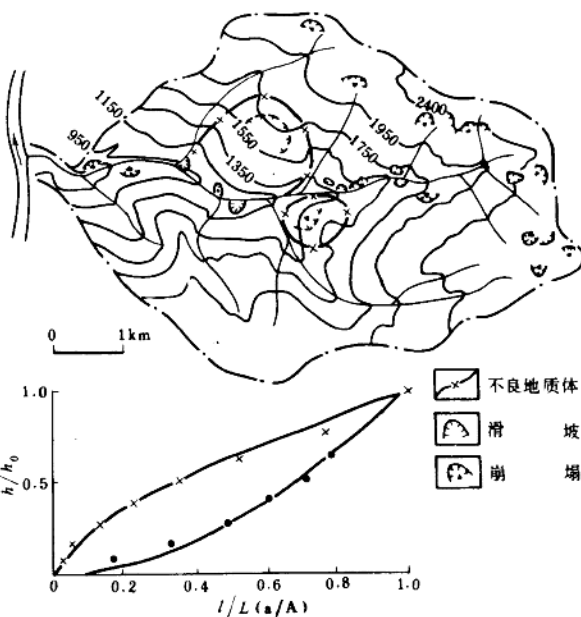


图 1-4 利子依达沟的菱形流域形态、沟谷纵剖面(下)、流域面积-高程曲线(上)

表 1-2 成昆北 6 个小流域的沟谷纵剖面方程、斯特拉勒曲线方程及相应 S 、 P 值

沟 名	沟 谷 纵 剖 面		斯 特 拉 勒 曲 线		S	P
	方 程	$R^{\text{①}}$	方 程	$R^{\text{①}}$		
干溪沟 2 号	$h/h_0 = (l/L)^{0.43}$	0.961	$h/h_0 = (\alpha/A)^{0.27}$	0.917	0.787	0.026
窄板沟	$h/h_0 = (l/L)^{1.0}$	0.997	$h/h_0 = (\alpha/A)^{0.48}$	0.995	0.671	0.070
内 侧 沟	$h/h_0 = (l/L)^{1.61}$	0.997	$h/h_0 = (\alpha/A)^{0.58}$	0.999	0.633	0.090
大火夹沟	$h/h_0 = (l/L)^{1.0}$	0.993	$h/h_0 = (\alpha/A)^{0.63}$	0.999	0.614	0.102
新寨子沟	$h/h_0 = (l/L)^{1.20}$	0.999	$h/h_0 = (\alpha/A)^{0.65}$	0.991	0.606	0.107
利子依达沟	$h/h_0 = (l/L)^{1.78}$	0.994	$h/h_0 = (\alpha/A)^{0.62}$	0.993	0.617	0.100

① R 为曲线相关系数。

表 1-3 成昆北 6 小流域 α 、 P 的实测值与计算值之对比

沟 名	N	斯特拉勒曲线指数 α		信息熵 P	
		实测 α (与 N 之比)	计算 $\frac{N}{2}$ (偏差)	实 测	计算 (偏差)
干溪沟 2 号	0.43	0.27(0.63)	0.215(-20%)	0.026	0.018(-31%)
窄板沟	1.0	0.48(0.48)	0.50(4%)	0.070	0.072(3%)
内 侧 沟	1.61	0.58(0.36)	0.805(39%)	0.090	0.145(61%)
大火夹沟	1.0	0.63(0.63)	0.50(-21%)	0.102	0.072(-29%)
新寨子沟	1.20	0.65(0.54)	0.60(-8%)	0.107	0.095(-11%)
利子依达沟	1.78	0.62(0.35)	0.89(44%)	0.100	0.166(66%)

相对偏差为 66% ~ -31%，平均 33.5%。主要原因是流域形状、支沟格局与假设尚不尽吻合，以致过主沟某点的汇水面积、围闭流域面积与假设的标准扇形、菱形尚存差异。

尽管如此，表 1-2 各式相关系数甚高，说明抛物线型的沟谷纵剖面方程和斯特拉勒曲线式较符合实际。证实小流域内地地质理条件确较均一，与理想流域相近。同时，表 1-3 中 α 、 P 计算值的偏差正负对称。6 条沟平均， α 为 $0.498N$ ，与理论值 $(0.5N)$ 一致，平均代数偏差 6.3%。 P 的平均代数偏差为 9.8%。表明本文的模式在典型条件下是适合的，在样本较多时是可行的。

此外，各泥石流沟的 N 值与流域地形中值坡度也有正增长关系（表 1-4）。中值坡度的大小顺序与 N 值的顺序是一致的，定性说明 N 值能表征流域地形坡度。

沟谷纵剖面受侵蚀基准和水动力条件的控制。其它条件相似时，基准变动可用主河段纵比降代表，水动力则与流域面积正相关。表 1-4 显示，流域面积相近时，主河纵比降大者（如窄板沟）因基准下降快，纵剖面 N 值（比内则沟）较小。主河纵比降相近时，流域面积大者因水动力强，纵剖面 N 值较大。如大火夹沟 N 值比相邻的干溪沟大，利子依达沟 N 值比相邻的新寨子沟大。说明本文对沟谷纵剖面形成机理的认识基本符合实际。

表 1-4 成昆北 6 小流域几种形态指标之对比

沟 名	N 值	流域地形中值坡度(°)	流域面积(km ²)	主河段及其纵比降(‰)
大火夹沟	1.0	28.99	8.73	大渡河 2.60
新寨子沟	1.20	37.72	3.09	大渡河 2.63
利子依达沟	1.78	39.10	24.49	大渡河 2.63
窄板沟	1.0	15.44	10.0	牛日河 10.0
内则沟	1.61	38.28	13.50	牛日河 6.67
干溪沟 2 号	0.43		5.98	大渡河 2.60

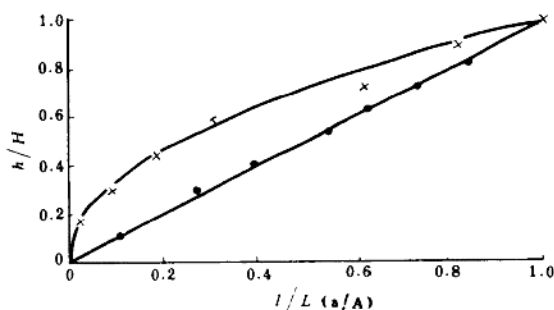
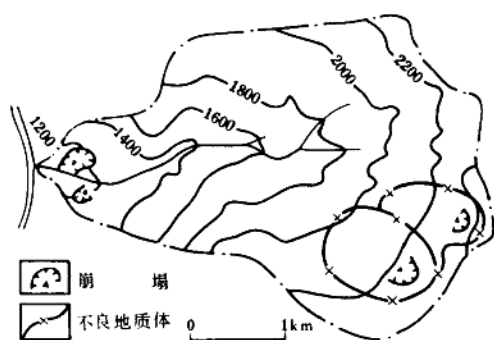


图 1-5 窄板沟的扇形流域形态、沟谷纵剖面(下)、流域面积-高程曲线(上)

各流域泥石流灾害情况与纵剖面形态指数 N 的对应关系如表 1-5。可定性看出，处于

泥石流旺盛期($N=1.33\sim 2.0$)的利子依达沟,不良地质体最多,单位面积内固体物质动储量最大,有记录的泥石流暴发次数最多,灾情最重,尤其是1981年7月泥石流冲毁桥梁、颠覆客车的惨重灾害记忆犹新。

表1-5 成昆北6小流域 N 值与泥石流灾害之对照

沟 名	N	不良地质体		泥石流灾害	
		个数	单位面积动储量 ($10^4\text{m}^3/\text{km}^2$)	记录次数	灾 害 情 况
干溪沟2号	0.43				无
大火夹沟	1.0	8	4.12		严重的古泥石流沟
窄板沟	1.0	4	5.67	2	严重的沟谷型泥石流。1979、1984年两次暴发
新寨子沟	1.20	4	1.92	2	没有完全复活的中等程度泥石流沟
内则沟	1.61	8	6.45		松散物质丰富,矿渣遍布,沟谷型稀性中等程度泥石流沟
利子依达沟	1.78	34	19.24	5	发育旺盛的严重泥石流沟,灾害频发,灾情巨大

处于泥石流发育期但接近泥石流旺盛期的3条沟($N=1.0\sim 1.2$),也为较严重的泥石流沟,尤以窄板沟近年曾两次暴发。处于泥石流发育期初始阶段的干溪沟2号($N=0.43$),中上游形成区地势和缓,流域地貌较稳定,尚未发育成为泥石流沟。

综上,沟谷纵剖面形态指数 N 可作为表征小流域稳定性和泥石流灾害的地形指标。但是,由于泥石流流域系统是远离平衡态的耗散结构, N 、 P 值表征流域稳定性还是近似的,加之影响泥石流发育还有地形之外的诸多因素,因而还有必要进一步探讨流域系统的非线性、非平衡态熵,作为评判泥石流的重要指标。

第二节 泥石流流域系统的超熵

作为信息熵基础的斯特拉勒流域面积-高程曲线,是流域系统内外营力作用大致相等时处于瞬时平衡的形态特征,因而这种信息熵是一种线性平衡态熵。在一般情况下,流域系统是远离平衡的耗散结构,需要将非线性、非平衡态熵引入流域系统研究。为此,岳天祥、艾南山等^[7]引进了超熵的概念,并应用于流域稳定性的评判中。

本节据此提出以沟谷纵剖面形态指数 N 表达的超熵数学式,并进而应用于泥石流沟的判别与泥石流活动性评价中,将泥石流沟的地貌发育过程划分为2个时期和5个阶段。以成昆铁路沙湾至泸沽段和南昆铁路宜良段的沟谷为例,证实超熵 $\delta_N P$ 和相应的 N 值是判别、评价泥石流沟及其活动性的主要指标之一。

一、 N 值表达的流域系统超熵

对于一个特定的流域系统,超熵的一般表达式为^[7]: