

# 坡面泥石流暴发的自组织临界特性及其预测预报

彭涛, 徐刚, 夏大庆

(西南大学 地理科学学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 北碚 400715)

**摘要:** 坡面泥石流是山区常见的一种自然灾害。以重庆市北碚区为例, 分析了坡面泥石流暴发的松散堆积物自组织临界特性, 以及地貌和降雨量临界特性。从自组织临界的观点来看, 坡面泥石流形成区各个子系统之间存在着非线性作用, 使系统自然地朝着临界状态演化, 在暴雨激发下, 最终导致坡面泥石流的暴发。泥石流规模和频率存在着幂律关系, 这是泥石流自组织临界状态的行为标志, 并可对坡面泥石流的活动规律进行预测、预报。

**关键词:** 坡面泥石流; 自组织临界性; 预测预报

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)03-0104-05

中图分类号: P642.23

## Occurrence of Slope Debris Flow as Self-organization Criticality and Its Prediction and Forecast

PENG Tao, XU Gang, XIA Da-qing

(Key Laboratory of Ec-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest China University, Beibei 400715, Chongqing, China)

**Abstract:** Slope debris flow is a natural hazard constantly observed in the mountain area. Taking the Beibei of Chongqing City as an example, the paper analyzes the self-organization criticality of solid loose materials, and the criticality of geomorphology and rainfall while slope debris flow occurs. From viewpoint of self-organization criticality, non-linear interaction exists between different subsystems in the formation of slope debris flow, and causes the system to develop naturally to a state of self-organization criticality. Under triggering by storm, slope debris flow occurs eventually. There exists a power correlation between its magnitude and frequency, which is a behavioral sign of debris flow as self-organization. In addition, occurrence law of slope debris flow can be predicted and forecasted through the power correlation.

**Keywords:** slope debris flow; self-organization criticality; prediction and forecast

坡面泥石流通常发育在坡度陡峻、坡面较长且较为平整的自然山坡上, 坡积层较薄 (< 3 m), 下伏基岩透水性较差, 形成区的中、上部有一定汇水条件的凹型坡面<sup>[1]</sup>, 一般规模较小, 长仅数百米, 流域面积在 0.5 km<sup>2</sup> 以下, 没有明显的流通区。坡面泥石流具有规模小, 暴发突然, 破坏力强, 预测困难, 分布广泛等特征。

丰富的松散固体物质、陡峻的地形和一定强度的降水是形成坡面泥石流的必要条件。坡面泥石流的形成区是一个开放的、远离平衡的物质和能量流动的耗散系统, 由于组成系统的各个单元, 即子系统之间的相互作用, 使系统自然地朝着临界状态演化<sup>[2]</sup>。在这种状态下, 外部以一定强度的降水流入这个系统的能量, 按各子系统内在规律相互作用被系统吸收和

耗散, 在各种内外触变液化因子的共同作用下, 最终导致坡面泥石流的暴发<sup>[3]</sup>。这与自组织临界性的沙堆模型具有相同的机理。本文以重庆市北碚区为例, 分析了坡面泥石流暴发的松散堆积物自组织临界特性和地貌、降雨量临界特性。

## 1 自组织临界特性

1987 年巴克 (Bak) 等提出了“自组织临界性” (self-organized criticality) 概念, 用以解释广延耗散动力学系统的组织原则。自组织临界系统具有一些共同的特点<sup>[4-6]</sup>。

(1) 长程时空关联与连通性及时空分形结构。

(2) 系统是耗散的, 包含大量发生短程相互作用的组元, 这些大量组元间存在的作用, 使系统自然地

收稿日期: 2005-04-20

资助项目: 重庆市自然科学基金 (2004BB7085); 西南大学自然地理学博士点开放基金 (411408)

作者简介: 彭涛 (1973—), 男 (土家族), 湖南省保靖县人, 硕士研究生, 主要从事山地灾害与区域可持续发展研究。

通讯作者: 徐刚, E-mail xuliumin@swu.edu.cn.

朝着临界状态演化,一个小的事件会引发大小不等的一系列连锁反应,并且是大事件少,小事件多。

(3) 系统在自组织临界状态中的行为是由一组临界指数来确定,幂律规律是自组织临界状态的行为标志。

(4) 自组织临界性涌现于混沌边缘,并具有最大的复杂性、演化性和创新性。

(5) 处于临界状态的系统会出现各种大小的雪崩事件,在空间上表现出分形结构,在时间上出现  $1/f$  噪声,即出现时空幂律分布。

## 2 坡面泥石流暴发的松散堆积物自组织临界特性

研究区地处四川盆地东部平行岭谷区,它位于华蓥山复式背斜的中段,重庆弧的北端,褶皱变形强烈,境内相间分布着3个背斜和3个向斜,褶皱变形强烈,断层、节理十分发育;岩性以灰岩、页岩、砂岩和泥岩为主,泥岩、页岩与砂岩互层;崩塌、滑坡以及沟岸坍塌等不良地质现象活动频繁,坡面松散堆积物十分丰富,为坡面泥石流的暴发提供了充足的固体松散物质来源。

充足的松散固体物质是泥石流形成的必要条件之一。在风化、侵蚀、搬运等外营力作用下,坡面和沟谷中的松散堆积物不断增多,坡面松散堆积体系统经过不断的演化,系统会达到较长时间内行为相对稳定的状态,即系统存在一种崩塌事件的负幂律关系,系统不断发生崩塌事件,而崩塌事件的发生是大事件多,小事件少。同时,坡面松散堆积体的空间形态在一定空间范围内缺乏一定的标度性,即呈现出空间上的分形结构。坡面松散堆积体的行为在时间上表现出幂律规则、在空间上呈现出分形结构,正好说明了坡面松散堆积体的演化具有与沙堆模型相同的自组织临界特性。

坡面泥石流源地松散堆积物的稳定性主要受控于土体的自重力和抗剪强度<sup>[3]</sup>。当土体在干燥时,碎屑土的天然休止角(或称临界角)接近或稍大于碎屑土的内摩擦角。随着坡面上的固体松散物质聚集增多,斜坡上的堆积体之间相互作用,在这个复杂的离散系统中呈现出长程相关性,即堆积体中局部小的扰动都将会引起整个坡面上大多数堆积体的崩塌失稳事件。此时,斜坡上的土体已经演化到自组织临界状态。有关实验资料表明,以岩屑残余矿物为主的砾石土的临界角为  $35^\circ \sim 45^\circ$ ,砂土的临界角为  $25^\circ \sim$

$40^\circ$ <sup>[7]</sup>,与坡面泥石流形成区山坡的平均坡度相似,这也表明坡面泥石流形成区坡面松散堆积物都处于应力的自组织临界状态。

处于自组织临界状态下的斜坡稳定松散堆积物,一旦遇到降水,斜坡土体强度降低,极易失稳。大量实验表明,坡面土体的临界角(天然休止角)在一定范围内随土体含水量的增加而增加,反之,其临界角随着含水量的增加反而缓慢地减小<sup>[8]</sup>。

另外,坡面土体的含水量还影响土体的抗剪强度,当土体的含水量达到饱和时,抗剪强度迅速下降。一次泥石流排泄掉的松散堆积物只占总重的小部分,分布、聚集这些松散堆积物的坡面坡度变化又不大,则松散堆积物的堆积仍保持在休止角附近。只要松散堆积物供应充分,就会孕育下次泥石流的暴发,整个松散堆积物被锁定在自组织临界状态<sup>[2]</sup>。

## 3 坡面泥石流暴发的地貌临界特性

自苏姆(Schumm)于20世纪70年代首次将临界规律引入到地貌系统的研究之中以来,经过一些学者的不断努力,逐步形成了所谓的“地貌临界论”。研究区自然条件均一,构造典型,坡面泥石流十分发育,成群成带分布。

本文作者对北碚区的坡面泥石流做了详细的野外实地考察,并在1:2500地形图上对坡面泥石流的地貌要素进行了量算和统计(表1),得到研究区40条典型坡面泥石流的原始数据,以探讨坡面泥石流暴发的地貌临界特性。

### 3.1 山坡坡度

山坡坡度对于坡面泥石流的形成具有关键作用,影响着坡面松散物质的分布和聚集。山坡坡度主要通过改变坡面土壤颗粒的稳定条件和地面水流动力条件,影响径流的冲刷和搬运能力<sup>[9]</sup>。随着坡度的增加土壤侵蚀的方式从面蚀向沟蚀、滑坡、崩塌方向发展,形成丰富的堆积物,这必然有利于坡面泥石流的形成。但坡度的增加与坡面侵蚀量并不是呈简单的线形关系,而具有一个临界坡度,在此坡度下侵蚀堆积量达到最大。

统计结果表明,该区坡面泥石流形成区的山坡坡度大多在  $25^\circ \sim 38^\circ$  之间。统计资料显示,成昆铁路沿线与铁路直交的坡面泥石流共有60处,坡面坡度在  $23.8^\circ \sim 45.6^\circ$  之间,其中97%的坡面坡度在  $28.8^\circ \sim 60^\circ$  之间,而  $> 45.0^\circ$  的陡坡上松散堆积物却极少,仅残留有薄土层<sup>[10]</sup>。

表 1 重庆市北碚区 40 条坡面泥石流地貌要素一览表

泥石流名称	山坡坡度/ (°)	沟床比降/ ‰	流域面积/ hm <sup>2</sup>	坡面长度/ m	泥石流名称	山坡坡度/ (°)	沟床比降/ ‰	流域面积/ hm <sup>2</sup>	坡面长度/ m
秤砣沟 1	28.4	571.0	0.8	133.8	凤凰寺 7	31.5	729.7	0.7	140.0
秤砣沟 2	31.7	588.6	1.6	230.0	凤凰寺 8	36.5	665.6	0.6	233.8
秤砣沟 3	31.4	605.5	1.4	250.0	凤凰寺 9	29.0	645.0	1.1	337.8
秤砣沟 4	31.2	561.1	1.2	280.0	凤凰寺 10	30.4	685.9	0.5	116.3
秤砣沟 5	32.1	534.1	3.7	261.3	凤凰寺 11	29.5	505.0	2.5	300.0
秤砣沟 6	33.1	686.4	1.8	247.5	飞蛾山 1	36.1	682.4	1.8	186.3
秤砣沟 7	31.0	800.9	1.5	147.5	飞蛾山 2	24.4	520.0	3.1	233.8
秤砣沟 8	33.5	659.5	1.9	211.3	飞蛾山 3	33.3	584.8	4.2	326.3
秤砣沟 9	31.4	531.3	2.4	283.8	飞蛾山 4	34.4	737.9	0.9	205.0
秤砣沟 10	29.5	500.0	1.4	248.8	飞 1	32.0	550.3	1.0	153.8
秤砣沟 11	32.2	562.3	1.7	191.3	飞 2	31.9	454.4	2.7	266.3
秤砣沟 12	32.7	691.1	1.8	171.3	飞 3	30.3	488.5	0.8	213.8
秤砣沟前 1	36.9	754.5	1.4	241.3	九龙寨 1	34.6	755.9	2.1	160.0
秤砣沟前 2	36.8	647.4	0.9	156.3	九龙寨 2	34.0	754.9	2.6	161.3
凤凰寺 1	27.0	538.6	3.2	444.0	国家山 1	31.1	468.0	2.2	332.5
凤凰寺 2	27.0	587.1	1.6	277.5	国家山 2	30.4	557.5	2.3	277.5
凤凰寺 3	29.8	600.9	0.9	242.3	水泥厂 1	25.5	481.1	1.7	335.0
凤凰寺 4	33.7	715.9	0.6	220.0	水泥厂 2	25.7	508.6	1.9	365.0
凤凰寺 5	31.8	694.8	0.7	158.8	木鱼山	21.7	525.4	3.6	205.0
凤凰寺 6	30.6	613.8	0.9	240.0	中门洞	30.1	570.5	1.9	283.8

### 3.2 沟床比降

沟床比降与坡面泥石流的形成关系十分密切。对坡面松散物质来说,沟床比降为它提供一定位能,比降越大,松散固体物质越不稳定,坡面泥石流重力作用越大,下泻速度越快。但沟床比降过大,坡面物质难以积累,也不会形成泥石流。若沟床比降过小,水动力作用也不能充分发挥,水与松散固体物质不易充分作用而形成泥石流,形成泥石流后运动条件也会受到很大限制而易于停积<sup>[10]</sup>。因而形成泥石流的沟床比降必然存在一个上、下界限值和适应范围,其下限取泥石流的自然休止角,上限取松散物质的休止角,它因固体物质的性质不同而异,最大者为紧实砾石(39°~46°),最小者为黏土(15°),最利于泥石流形成的沟床比降应在松散物质的休止角附近,饱水休止角也是随着固体松散物质性质而异<sup>[11]</sup>。统计显示,该区坡面泥石流的沟床比降大多在 480‰~760‰之间,平均值为 607.1‰,这种沟床比降既有利于坡面泥石流运动,又有利于松散固体物质在坡面上的堆积积累。

### 3.3 坡面长度

坡长与坡度共同对坡面侵蚀产生影响。一般而言,坡面径流量、径流速度随着坡长的增加而增加,坡面长度越短,显然越不利于松散物质的储存,但有利于碎屑物的启动,一旦水力条件具备,即利于坡面泥

石流的形成。研究区坡面泥石流的坡面长度大多在 400 m 以下,主沟多属于小流域中的 2、3 级,甚至 4 级支沟。一般来说,沟道级别越低,沟道总长度就越短,而正是这些次一级支沟因沟道较短、比降较大,往往最有利于坡面泥石流的启动。

### 3.4 流域面积

已有的研究表明,随着流域面积的增大,流域的不均匀性增加,流域内沙源分散,沟谷宽度增加,比降减小,当流域面积达到某一临界值时,泥石流就为一般山洪所代替<sup>[11]</sup>。一般认为,坡面泥石流的流域面积大多在 0.50 km<sup>2</sup> 以下,具有汇水快,径流时间短的特点。统计表明研究区 40 条坡面泥石流流域面积;平均值为 1.74 hm<sup>2</sup>,标准差是 0.922 6,大多在 4 hm<sup>2</sup> 以下。较小的流域面积,只需出现局部暴雨的情况下就能使整个小流域内迅速汇聚充足的水源,如果存在丰富的松散固体物质,则会激发坡面泥石流。流域面积过大,则难以同时满足坡面泥石流形成的水动力条件和松散固体物质条件。

## 4 坡面泥石流暴发的降雨量临界特性

降雨特别是高强度的降雨是坡面泥石流暴发最重要的激发因素。坡面松散堆积物质充足,地形条件具备,但没有足够的降水这个外界条件是不可能转化为坡面泥石流的。只有当降雨(强度、雨量)达到一个

临界点时,松散堆积物才能在暴雨激发下转化为坡面泥石流。一般认为暴雨泥石流的发生,存在一个最低的激发雨量,这个降雨量,称为泥石流的临界雨量。在泥石流观测研究中发现,其临界雨量并非是一个严格确定不变的分界值,而是在某一个范围内有变化幅

度的区间值<sup>[12]</sup>。不同泥石流沟和不同区域泥石流发生的临界雨量相差很大,并随着区域划分范围的扩大其差异性越大。根据对重庆北碚区泥石流暴发历史资料的调查分析(表 2),当日雨量和 1 h 雨强分别达到 150, 40 mm 才有可能激发坡面泥石流。

表 2 北碚区泥石流暴发的相关雨量资料

暴发时间	前期降雨	当日降雨量	1 h 雨强	暴发时间	前期降雨	当日降雨量	1 h 雨强
19620705	8.0	229.6	52.5	19890710	66.3	203.6	49.5
19720625	76.1	216.0	51.2	19930801	82.5	156.8	40.2
19780529	76.1	196.9	40.9	20030719	13.0	200.0	44.1
19870720	27.3	192.2	42.5	20050624	6.3	163.0	48.7

注:前期降雨 =  $P_1 K^1 + P_2 K^2 + \dots + P_n K^n$ , 其中  $P_1, P_2 \dots P_n$  为泥石流暴发前 1, 2, ... n d 的降雨量,  $K$  为衰减系数。

大量研究表明,泥石流启动的临界雨量,主要取决于前期降雨量、短历时雨强等因素。一般来说,前期降雨越大,坡面碎屑土体就越接近饱和,坡面泥石流形成所需要的短历时雨强就越小(表 2)。研究区多年平均降水量为 1 078 mm,降雨季节分配不均,多集中在 5—9 月,占全年的 70% 左右,其中雨季各月的差异又比较大,在 1951—1980 年间,7 月份降雨最多,平均为 174.5 mm,9 月份仅为 136.2 mm。因此,各月的土体含水量情况以及坡面泥石流暴发的最低激发雨强也不一样。随着雨季的开始,坡面松散土体含水量逐渐增大,激发坡面泥石流的短历时雨强呈减小趋势。

在降雨之前,坡面松散碎屑物比较干燥,处于非饱和状态。一场降雨之后,土体的吸水率很大,雨水沿着土体孔隙向下渗流,随着降雨的继续,坡面堆积物中的孔隙被充满,表层土体达到饱和,导致排水不畅,其孔隙流体的体积变大,自重增加,土体的抗剪强度降低,改变了土体的稳定状态<sup>[13]</sup>。如再有高强度的短历时降雨,当降雨强度大于渗流强度时,坡面开始积水、产流并最终产生坡面汇流。此时,当降雨进一步汇成暴雨径流作用于临界状态下的松散堆积物,使其崩塌运动,并导致连锁反应,形成坡面泥石流。

### 5 坡面泥石流的预测、预报

处于自组织临界状态的系统中,功率谱曲线具有  $1/f$  噪声的性质,即规模与频率间满足幂律关系。Johnson 等人的研究表明,泥石流规模和频率存在着幂律关系。即频率高则规模小,频率低则规模大。在临界状态时,斜坡松散固体物质触变液化系统的能量耗散会有很大涨落,导致泥石流活动频率和规模发生变化。王裕宜等<sup>[3]</sup>根据对云南东川蒋家沟泥石流暴发频率  $N$  与规模  $Q$  之间的关系进行拟合,证明泥石

流暴发规模和频率间存在着幂律关系,即

$$N \propto Q^{-b} \quad (1)$$

这证明泥石流暴发的功率谱曲线具有  $1/f$  噪声的性质。

自组织临界系统是弱混沌系统,系统的不确定性随时间按幂律规律增长,系统在混浊边缘上的进化不存在时间标度,可以对该系统进行估算、预测。泥石流活动的动态特征,可能是由表征系统处于自组织临界状态的不稳定结构产生的。然而识别动态系统不稳定性是当前非线性问题预报中的难题。即使将泥石流暴发视为自组织临界现象,迄今还不能建立具体地表征泥石流活动性的非线性方程。不过却可根据泥石流观测的时间序列数据,用功率谱分析方法,反演孕育泥石流暴发的动力特征。

经过一段时段  $t$  后,就可记录到某地泥石流暴发的时间序列。若在  $(n) t$  次泥石流中,最大的一次泥石流流量记作  $Q_{\max}$ , 则有<sup>[2]</sup>

$$Q_{\max} \propto (n) t^{1/(b-1)} \quad (2)$$

即通过对泥石流暴发频率的记载,可推算出某一时段内的泥石流可能暴发的最大规模。因此定义为<sup>[2]</sup>

$$J(t) = [(n) t / t] (Q) (t) \quad (3)$$

式中:  $J(t)$  ——单位时间内的泥石流暴发规模;  $(n) t$  ——时段  $t$  内的暴发次数;  $Q(t)$  ——时段  $t$  内的泥石流平均规模。由式(2)(3)可得:

$$Q_{\max} \propto t \quad (4)$$

式(4)表明:泥石流暴发规模与暴发此等规模泥石流的间隔时段  $t$  成正比,即规模与频率成反比。由已知的高频  $(1/t_1)$  小规模泥石流  $Q_1$ , 可以推断低频  $(1/t_2)$  大规模泥石流  $Q_2$  的暴发规律<sup>[2]</sup>:

$$t_1 / t_2 = Q_1 / Q_2 \quad (5)$$

实际的山坡坡体范围总是有限的,泥石流规模受

坡体松散堆积物产生量的影响,存在因有限尺度引起的截至范围,(4),(5)式只能在一定尺度范围内成立。

近 20 a,研究区在 1989 年和 2003 年分别暴发了规模较大的坡面泥石流,且成群成带发生,而规模不大的坡面泥石流活动比较频繁。因此,通过一定时间尺度的观测分析,对泥石流暴发的规模、频率以及周期等自组织临界性进行研究,可以对泥石流的活动规律进行预测、预报。

## 6 结 语

(1) 斜坡大量松散堆积物间存在长程相关的非线性作用,具有与沙堆模型相同的自组织临界特性,在各种内外触发变化因子的共同作用下,最终导致坡面泥石流的暴发。

(2) 坡面泥石流暴发的地貌、降雨量临界特性分析表明,研究区小流域山坡坡度在  $25^{\circ} \sim 37^{\circ}$ 、沟床比降在 480‰~760‰之间、流域面积小于  $4 \text{ km}^2$  和坡面长度小于 400 m,且当日雨量和 1 h 雨强分别不低于 150, 40 mm 时,最有利于坡面泥石流的发生。

(3) 泥石流暴发的自组织临界性,暴发规模和频率间的幂律关系,可对泥石流活动规律进行预测。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王士革. 山坡型泥石流的危害与防治[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1999, 10(3): 45—50.
- [2] 罗德军, 艾南山, 李后强. 泥石流暴发的自组织临界现象

[J]. 山地研究, 1995, 13(4): 213—218.

- [3] 王裕宜, 詹钱登, 陈晓清, 等. 泥石流体的应力应变自组织临界特性[J]. 科学通报, 2003, 48(3): 976—980.
- [4] Bak P, Tang C, Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of  $1/f$  noise [J]. Physical Review Letters, 1987, 59(3): 381—384.
- [5] 梅可玉. 论自组织临界性与复杂系统的演化行为[J]. 自然辩证法研究, 2004, 20(7): 6—9.
- [6] 於崇文. 固体地球系统的复杂性与自组织临界性[J]. 地学前缘, 1998, 5(3): 159—182.
- [7] 张成恭, 编. 工程地质学(上册)[M]. 北京: 地质出版社, 1979. 52.
- [8] 王裕宜, 张军, 严壁玉. 泥石流侵蚀过程中应力特征的分析研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(2): 12—19.
- [9] 陆中臣, 贾绍风, 黄克新, 等. 流域地貌系统[M]. 大连: 大连出版社, 1991. 33—35.
- [10] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所编著. 泥石流研究与防治[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989. 61—74.
- [11] 崔鹏. 泥石流地貌要素的统计分析. 第二届全国泥石流学术会议论文集[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 296—302.
- [12] 谭万沛, 王成华, 等. 暴雨泥石流和区域预测与预报[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1994. 220—221.
- [13] 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.

(上接第 99 页)

将不同时期获得的 DEM 纳入到统一的坐标系, 是探测多时相 DEM 表面变形的前提。本文在 M—LZD 算法基础上, 采用分块表面区域匹配 (MSPM) 算法, 提高了 M—LZD 算法探测表面变形的能力。试验结果表明: 新方法更能适合泥石流灾害地区大面积变形的 DEM 表面匹配和变形探测, 匹配精度和探测出的地表变化量精度均比转刺控制点方法和 M—LZD 算法的结果更高。

本文提出的方法在其它如滑坡、火山等自然灾害引起的地表变化研究中也有一定的应用前景。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Oka N. Application of photogrammetry to the field observation of failed slopes [J]. Engineering Geology, 1998, 50: 85—100.
- [2] Kääb A. Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: New techniques and applications [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology,

Oceans and Atmosphere, 2000, 25(9): 765—770.

- [3] Kääb A. Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air and spaceborne optical data: Examples using digital aerial imagery and aster data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, 57(1-2): 39—52.
- [4] Kaufmann V, R. Ladstätter. Documentation of the retreat of a small debris-covered cirque glacier (Gössnitzkees, Austrian ALPS) by means of terrestrial photogrammetry [A]. in Proceedings of the 4th ICA Mountain Cartography Workshop [C]. 2004. Vall de Núria, Catalonia, Spain.
- [5] Pilgrim L J. Robust estimation applied to surface matching [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 51: 243—257.
- [6] Pilgrim L J. Surface matching and difference detection without the aid of control points [J]. Survey Review, 1996, 33(259): 291—304.
- [7] 周江文, 黄幼才, 杨元喜, 等. 抗差最小二乘法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1995. 104—158.