

泥石流灾害系统的协同进化规律 ——以南水北调西线一期工程区为例

吕学军^{1,2,3}, 刘希林¹, 倪化勇^{1,2}

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 滨州学院, 山东 滨州 256600)

摘 要: 以南水北调西线一期工程区为研究对象, 从协同学的观点出发, 探讨了泥石流灾害系统的协同进化规律。研究表明, 工程区泥石流灾害系统是一个远离平衡状态的开放系统; 泥石流的暴发是系统内部各子系统之间经过非线性作用, 在序参量的支配下协同进化的结果。泥石流灾害系统协同进化规律的研究, 对于进一步认识泥石流灾害的形成以及制定防灾减灾措施具有重要的意义。

关键词: 研究区; 自组织系统; 协同进化; 泥石流

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)01-0076-04

The Coevolution Rules of the Debris Flow Hazard System ——Taking the 1st-Stage Project of West-line for Transferring Water from Southern to Northern China as an Example

LU Xue-jun^{1,2,3}, LU Xi-lin¹, NI Hua-yong^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Binzhou College, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: Taking the 1st stage project of west-line for transferring water from southern to northern China as an example, and based on the field survey and analysis of the information for the project region, the coevolution rules of the debris flow hazard system are discussed. Debris flow hazard system is a self-organization system and in far off the equilibrium point. The developing process of debris flow hazard system is evolving from initial chaotic state gradually to function organization under the non-linear effect among subsidiary systems. This research will play an important role for further recognizing the characteristics and debris flow hazard mitigation.

Key words: the 1st stage project of west-line; self-organization system; coevolution; debris flow

1971年, 德国斯图加特大学物理学教授 H. Haken 提出了协同学(Synergetic)理论^[1]。协同学是研究非线性系统演化的协同规律的科学, 该理论认为远离平衡态的开放系统, 在保证外流(与外界之间有物质流或能量流的运动)的条件下, 系统内部各子系统之间能够自发的产生一定有序结构或功能行为。其核心内容是支配原理, 即系统的演化都具有确定的结构, 其演化过程为少数几个变量决定, 这几个变量弛豫时间长, 变化慢, 称为慢变量, 处于支配地位, 也叫序参量; 而其它为数众多的变量弛豫时间短, 变化快, 称为快变量, 对系统演化过程所起的作用不大, 仅仅响应慢变量的变化, 慢变量支配快变量。

泥石流活动是各种因素综合作用的结果, 是地形地貌、地层岩性及其相关发育的崩塌、滑坡等因素产生的松散固体物质与水力条件相互作用转化成泥石流的一种过程。前期研究表明, 泥石流灾害系统是一个开放的耗散系统, 泥石流暴发具有自组织临界特性^[2,3], 泥石流发育过程中形成的沟谷

形态具有一些非线性特征^[4-6]。同时, 有关资料也表明^[7], 泥石流堆积物粒度组成具有分形结构特征。本文以南水北调西线一期工程区为研究对象, 从协同学的观点出发, 进一步揭示泥石流灾害系统形成及其演化规律。

1 泥石流灾害系统特征

1.1 泥石流灾害系统组成

泥石流形成环境因素较多, 主要包括: 地层岩性、地质构造、地形地貌、气象气候、水文特征、植被、土壤和人类活动等, 它们彼此之间形成一个复杂的互相关联的网络, 共同组成了泥石流灾害系统(图1)。该系统具有一定的物质组成、流体性质、流态、搬运特征、沿途冲淤变化、流速、流量和破坏性等运动学和动力学参数。

工程区泥石流灾害系统的环境因素具有自己的特征, 地层主要为巴颜喀拉群的砂岩、板岩及其砂板岩互层, 局部出露有灰岩和岩浆岩岩体, 属中等坚硬—坚硬岩类。地形起伏

较大, 东部地区主要为河流深切峡谷地区, 基本在海拔 3 100 m 以下; 西部地区海拔多在 3 100 m 以上; 区内分布有第三纪构造盆地和第四纪洪积以及冰川堆积盆地。强烈的新构造运动使基岩部分变质、破碎, 使得堆积扇或河流阶地上的第四系松散物质成为泥石流固体物质的补给源地。地震活动比较频繁, 地震可直接破坏山体稳定, 降低岩石强度, 加速滑坡、崩塌和山崩等活动过程, 强震后往往伴着水土流失, 促使泥石流暴发。冬季严寒, 夏季凉爽, 昼夜温差较大, 年温差较小; 干、雨季分明, 5~ 10 月为雨季, 占年降水量的 80% 左右, 年降水量地区分布不均匀, 在海拔 3 500 m 高程以上地区, 年降水量中 20% ~ 30% 以上的降水为降雪。土地覆盖类型丰富, 林地、草甸草地、灌丛地、沼泽地都有分布, 属于由青藏高原片状多年冻土区向岛状季节冻土区过渡的混交地带, 海拔高度在 4 000 m 以上发育有多年冻土。

1.2 泥石流灾害系统是一个开放的耗散系统

泥石流灾害系统位于地球表层巨系统之中, 地球表层各圈层(岩石圈、大气圈、生物圈和水圈)中任何一个因素的变化, 都会引起该系统的波动, 这种作用又通过改变某一子系统而引发整个灾害系统变化。太阳能、雨水、地下水等使下伏

基岩风化, 并伴随有其它块体运动, 加速松散堆积物的移动, 同时降水也作为运动物质随泥石流下泻, 地震等内力作用也给原来的物质输入能量而触发泥石流, 等等。这充分说明整个泥石流灾害系统是受外界环境能量和物质输入而形成的, 是物质和能量达到一定状态的产物, 是一开放耗散系统(图 2)。

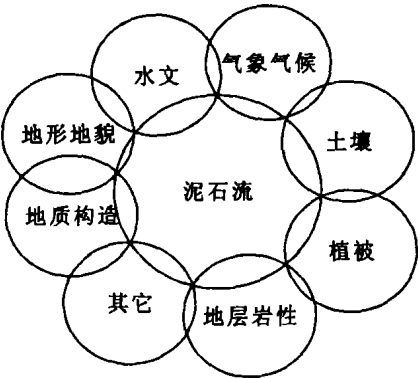


图 1 研究区泥石流灾害系统

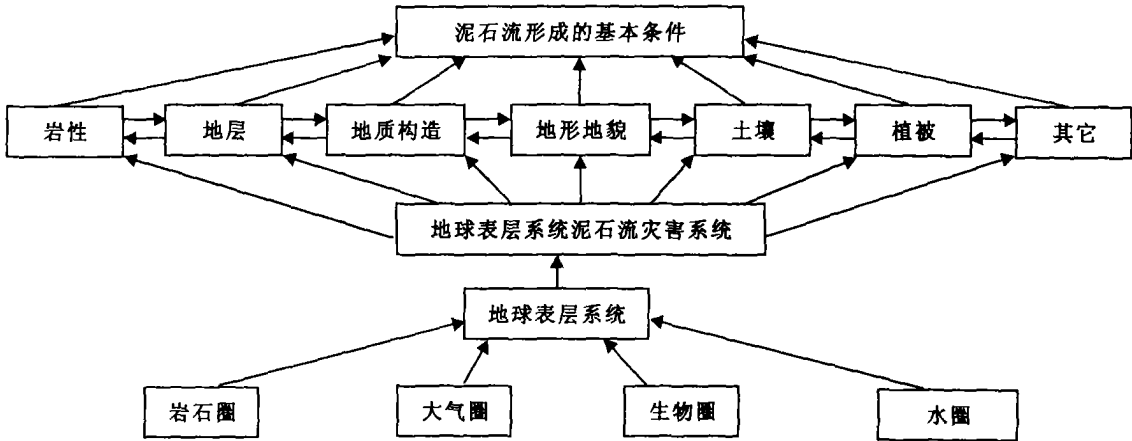


图 2 泥石流灾害系统的开放性

2 泥石流灾害系统自组织临界现象

2.1 研究区泥石流灾害系统的非线性特征

通过室内航片判读和 TM、SPOT 卫星图像解译, 并在两

次野外实地考察、现场灾害填图(1:10 万)和 GPS 定点的基础上, 查明研究区内分布具有一定规模和比较典型的泥石流沟共 103 条。经研究表明, 研究区泥石流沟道数目与泥石流堆积物方量、主沟长度、流域面积和沟床坡降有很好的相关性。

表 1 研究区泥石流沟数目与相应特征值的相关分析

| 流域面积 S/km^2 | > 0.2 | > 0.5 | > 1 | > 1.5 | > 2.0 | > 2.5 | > 3.0 | > 3.5 | > 4.0 | > 4.5 | > 5 | > 10 | > 20 | > 54 |
|-------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| 泥石流沟数目 N /条 | 103 | 95 | 73 | 56 | 48 | 38 | 31 | 29 | 22 | 16 | 13 | 7 | 4 | 1 |
| 相关式 | $lgN = 1.784 - 0.878lgS, r = -0.957$, 分维值 0.878 | | | | | | | | | | | | | |
| 平均沟床比降 $I/\%$ | > 7 | > 10 | > 15 | > 20 | > 25 | > 30 | > 35 | > 40 | > 45 | > 50 | > 55 | > 60 | | |
| 泥石流沟数目 N /条 | 103 | 100 | 87 | 77 | 67 | 49 | 36 | 20 | 13 | 9 | 7 | 2 | | |
| 相关式 | $lgN = 3.258 - 1.182lgS, r = -0.880$, 分维值 1.182 | | | | | | | | | | | | | |
| 主沟长度 L/km | 0.5 | 1.0 | > 1.5 | > 2.0 | > 2.5 | > 3.0 | > 3.5 | > 4.0 | > 5 | > 10 | > 12 | | | |
| 泥石流沟数目 N /条 | 103 | 98 | 84 | 59 | 45 | 35 | 30 | 18 | 12 | 4 | 1 | | | |
| 相关式 | $lgN = 2.032 - 1.415lgL, r = -0.918$, 分维值 1.415 | | | | | | | | | | | | | |
| 堆积物方量 $M/10^3m^3$ | > 0.17 | > 1 | > 10 | > 20 | > 30 | > 40 | > 50 | > 60 | > 80 | > 100 | > 200 | > 700 | | |
| 泥石流沟数目 N /条 | 103 | 88 | 56 | 45 | 33 | 27 | 24 | 18 | 13 | 10 | 4 | 1 | | |
| 相关式 | $lgN = 2.031 - 0.508lgM, r = -0.870$, 分维值 0.508 | | | | | | | | | | | | | |

从泥石流沟道数目与其堆积物方量、流域面积、平均沟床比降和主沟长度的非线性关系来看, 显示出泥石流堆积物方量分维值最小(0.508), 流域面积(0.878)和平均沟床比降(1.182)居中, 主沟长度(1.415)最大的特点。泥石流的上述四个形态要素均具有统计意义上的自相似性, 它们实质上描

述的是这一系统组成的空间结构(即分形结构), 表明泥石流灾害系统是一个自组织系统, 各形态要素分维值的大小, 一方面反映了沟谷及其泥石流演变的自相似性; 另一方面则表明不同形态要素对沟谷及其泥石流演化所起控制作用程度的差异性。分维值越小, 表明该因素对沟谷及其泥石流的形

成、演化所起控制作用越显著。因此从形态要素上看, 尽管流域面积、平均沟床比降和主沟长度都影响着泥石流的发育和形成的规模, 但以泥石流堆积物方量最为显著。

2 2 泥石流堆积物颗粒组成的分形特征

为分析泥石流堆积物特征, 我们对研究区不同类型的典型泥石流堆积物进行了取样分析。在对泥石流堆积物的颗粒级配测试分析的基础上, 根据分形理论对泥石流堆积物的粒

度分维值和相应的相关系数进行了计算(表 2)。

由表 2 分析可知, 研究区泥石流堆积物在粒径和其颗粒累积百分含量的双对数图上有明显的线性关系, 其相关系数 r 都在 0.93 以上, 平均相关系数为 0.976, 这种强相关关系说明堆积物粒度组成具有很好的分形结构特征, 泥石流堆积物密实程度越高, 沉积时间越长, 细颗粒物质含量就相对较高, 堆积物自组织程度就越高, 其分维值就越大。

表 2 泥石流堆积物粒度成分与分维

| 样品名称 | 不同粒径大小 R (mm) 的粒度组成重量百分比 $M(R)/\%$ | | | | | | | 斜率 b | 分维 D | 相关系数 r |
|----------|--------------------------------------|-------------|--------------|-----------------|-------------------|--------------------|-----------|--------|--------|----------|
| | > 20 | $20 \sim 2$ | $2 \sim 0.5$ | $0.5 \sim 0.25$ | $0.25 \sim 0.074$ | $0.074 \sim 0.005$ | < 0.005 | | | |
| 杜柯河新 1 号 | 9.6 | 44.8 | 13.4 | 13 | 6.2 | 9.9 | 3.1 | 0.407 | 2.593 | 0.987 |
| 杜柯河新 2 号 | 30 | 45.5 | 7.6 | 2.7 | 0.8 | 11 | 2.7 | 0.364 | 2.636 | 0.976 |
| 杜柯河新 3 号 | 29 | 34.6 | 8.2 | 9.1 | 6.3 | 10 | 2.8 | 0.383 | 2.617 | 0.979 |
| 杜柯河新 4 号 | 2.8 | 32.8 | 18.7 | 12.5 | 9.3 | 19.9 | 4 | 0.377 | 2.623 | 0.954 |
| 杜柯河新 5 号 | 20 | 33.7 | 13.8 | 10.5 | 7.2 | 11.8 | 3.3 | 0.382 | 2.618 | 0.977 |
| 杜柯河新 6 号 | 28 | 34.4 | 15.7 | 9 | 4.7 | 7 | 0.9 | 0.525 | 2.475 | 0.973 |
| 杜柯河新 7 号 | 31 | 50 | 7.3 | 5.5 | 2.1 | 3 | 0.8 | 0.532 | 2.468 | 0.997 |
| 克柯河新 1 号 | 31 | 56.6 | 4.5 | 2.7 | 1.4 | 3.6 | 0.6 | 0.541 | 2.459 | 0.989 |
| 克柯 1 号 | 37 | 46.6 | 4.6 | 3.3 | 2.1 | 5.7 | 1.2 | 0.451 | 2.549 | 0.987 |
| 达曲新 1 号 | 24 | 44.9 | 12.2 | 8.2 | 2.9 | 6.4 | 1.5 | 0.469 | 2.531 | 0.992 |
| 达曲新 2 号 | 13 | 50.1 | 9.7 | 11.3 | 6.6 | 7.7 | 1.3 | 0.499 | 2.501 | 0.979 |
| 仁达 1 号 | 67 | 8.2 | 6.6 | 7.3 | 5.2 | 5.8 | | 0.300 | 2.700 | 0.933 |
| 亚尔堂 1 号 | 61 | 15.2 | 8.5 | 6.6 | 5.4 | 3.6 | | 0.408 | 2.592 | 0.948 |
| 申达 1 号 | 63 | 28.7 | 3.9 | 1.9 | 1.2 | 1.8 | | 0.543 | 2.457 | 0.997 |
| 平均值 | 31.9 | 37.6 | 9.6 | 7.4 | 4.4 | 7.7 | 1.6 | 0.442 | 2.558 | 0.976 |

从泥石流堆积物粒度组成的分形结构特征来看, 研究区泥石流堆积物粒度分维值比较小, 泥石流堆积物基本为新鲜堆积, 泥石流形成年代较晚, 自组织能力低, 泥石流活动性较强。因此, 分维值的大小, 表征了泥石流堆积物自身的形成演化特征。

2 3 泥石流暴发的自组织临界性

根据对工程区泥石流沟的统计, 泥石流沟流域面积、主沟长度、沟口高程及主沟平均纵坡等特征值具有一定的分布规律(表 3)。

由表 3 可知, 研究区流域面积 0.5~5 km² 的泥石流沟占 79.6%; 主沟长度 1~3 km 的泥石流沟占 61.2% (63 条), 主沟长度 0~5 km 的泥石流沟占 88.3% (91 条); 沟口高程海拔 3 400~3 800 m 的泥石流沟占 84.5% (87 条); 主沟平均纵坡 10~30 的泥石流沟占总数 70.9%。由此可见, 在工程区流域面积<5 km², 主沟长度<3 km 和主沟平均沟床坡度<30 的沟谷, 最利于泥石流的发生。

表 3 工程区泥石流沟特征值统计表

| 流域面积/km ² | 0~1 | 1~2 | 2~3 | 3~4 | 4~5 | 5~10 | >10 |
|----------------------|-------|-------|---------|---------|---------|-------|------|
| 泥石流沟数/条 | 30 | 25 | 17 | 9 | 9 | 6 | 7 |
| 分布频率/% | 29.13 | 24.27 | 16.50 | 8.74 | 8.74 | 5.83 | 6.79 |
| 主沟长度/km | 0~1 | 1~2 | 2~3 | 3~4 | 4~5 | 5~10 | >10 |
| 泥石流沟数/条 | 5 | 39 | 24 | 17 | 6 | 8 | 4 |
| 分布频率/% | 4.85 | 37.86 | 23.30 | 16.51 | 5.83 | 7.77 | 3.88 |
| 沟口高程/km | <3 | 3~3.2 | 3.2~3.4 | 3.4~3.6 | 3.6~3.8 | 3.8~4 | >4 |
| 泥石流沟数/条 | 0 | 1 | 14 | 47 | 40 | 1 | 0 |
| 分布频率/% | 0 | 0.97 | 13.59 | 45.63 | 38.84 | 0.97 | 0 |
| 坡度/° | <10 | 10~20 | 20~30 | 30~40 | 40~50 | | |
| 泥石流沟数/条 | 23 | 45 | 28 | 7 | 0 | | |
| 分布频率/% | 22.33 | 43.69 | 27.18 | 6.80 | 0.00 | | |

泥石流暴发是松散堆积物起动的结果, 松散堆积物的分布与聚集受流域面积、主沟长度、沟床坡度等因素的影响, 特征值的过大或过小都不利于泥石流的发生。例如, 山高坡陡、

岭谷相对高度悬殊、地质条件差等有利于岩石的破碎和松散堆积物的形成、起动, 但沟谷纵坡过陡又不利于松散堆积物的大量聚集, 也不利于泥石流的形成。统计资料表明^[8], 成昆铁路沿线 82% 的泥石流沟流域内坡面坡度为 25~52.1°, 据文献^[9], 以岩屑残余矿物为主的砾石类土的临界角 φ 为 35~45°, 砂类土的临界角为 $\varphi_{28} \sim 40^\circ$ 。研究区 78.6% 的泥石流沟平均沟床坡度 10~40°, 虽然与上述资料临界角有所差异, 但表明该区松散堆积物可能处于临界状态。实际上, 只有少数外力作用十分强烈的泥石流沟, 风化松散堆积物可以充分供应, 而大多数泥石流沟在一场泥石流暴发后, 需要等一段时间后才能满足下一场泥石流松散堆积物的需要。

处于临界状态的松散堆积物, 在降水或坡麓堆积物流失等扰动下, 某些堆积物将开始滑动, 只有到稳定的位置滑动才会停止。如果运动物质碰到极不稳定的松散物, 就会一起下滑。随着这一过程的继续, 运动的松散堆积物有可能停止或继续下滑, 也有可能带动其他的松散堆积物向下运动, 它们汇集于沟底, 而形成规模大小不一的泥石流。泥石流的暴发排泄掉了大量的松散堆积物, 分布聚集这些松散堆积物的坡面、沟床坡度变化不大, 松散堆积物的堆积角保持在临界角附近, 在不良地质因素作用下, 松散堆积物又不断产生, 又蕴育着下一次泥石流的暴发。整个松散堆积物就这样被锁定在自组织临界状态下, 表明泥石流灾害系统具有自组织临界性。

3 泥石流灾害系统进化的协同机制

在一定时期内, 泥石流灾害系统中的子系统之间以及外部诱导因素之间的分布和作用相对稳定的, 随着时间的推移以及各种触发因素如暴雨、地震等的作用, 尤其是这些外界因素使得泥石流灾害系统中各部分之间的“势差不断扩大, 块体之间重新聚集和组合”^[2]。这种过程如果仅在一个不影响各部分结构稳定的幅度下进行叫“微涨落”, 但如果这种涨落改变了系统中块体之间的结构就叫“巨涨落”。从微涨落到巨涨落的演变过程中, 当系统越过一个临界阈值时就对应

着泥石流的产生。

3.1 控制参量和状态参量

设泥石流灾害系统中各子系统之间相互影响的进化模型为

$$\begin{cases} X_1 = M(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)X_1 - d_1X_1 \\ X_2 = N(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)X_2 - d_2X_2 \\ X_3 = P(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)X_3 - d_3X_3 \\ \vdots \\ X_n = Z(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)X_n - d_nX_n \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} M(x_1, \dots, x_n) = r_{10} + r_{11}X_1 + r_{12}X_2 + \dots + r_{1n}X_n \\ N(x_1, \dots, x_n) = r_{20} + r_{21}X_1 + r_{22}X_2 + \dots + r_{2n}X_n \\ P(x_1, \dots, x_n) = r_{30} + r_{31}X_1 + r_{32}X_2 + \dots + r_{3n}X_n \\ \vdots \\ Z(x_1, \dots, x_n) = r_{n0} + r_{n1}X_1 + r_{n2}X_2 + \dots + r_{nn}X_n \end{cases}$$

$r_{10}, r_{20}, \dots, r_{n0}, d_1, d_2, \dots, d_n$ 表示系统外界环境对泥石流灾害系统中各子系统 1, 2, ..., n 的综合影响系数, 又称为控制参量, 如降水强度、降水量、坡度、流域面积等参数; M, N, P, \dots, Z 为函数; x_1, x_2, \dots, x_n 代表泥石流灾害系统的子系统 1, 2, ..., n, 又称状态变量, 如含地形、地貌、岩性特性等。

3.2 协同运动过程

由于泥石流灾害系统包含很多子系统, 难以用微分方程求解, 为方便起见, 考虑两个子系统以及系统外因素对泥石流灾害的影响, 则有

$$\begin{aligned} X_1 &= M(x_1, x_2)X_1 \\ X_2 &= M(x_1, x_2)X_2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $M(x_1, x_2) = r_{10} + r_{11}X_1 + r_{12}X_2, N(x_1, x_2) = r_{20} + r_{21}X_1 + r_{22}X_2$; r_{10}, r_{20} 分别为系统外因素对泥石流灾害系统 1, 2 的综合影响系数。 M, N 为函数, x_1, x_2 为子系统 1, 2。

当 $\partial M / \partial x_2 > 0$ 且 $\partial N / \partial x_1 > 0$ 时, 则表示两个子系统的独立运动或者子系统之间相互关联而造成的一种协同运动, 这时整个系统表现出一种协调运动状态; 当 $\partial M / \partial x_2 < 0$ 且 $\partial N / \partial x_1 > 0$ 时, 或者当 $\partial M / \partial x_2 > 0$ 且 $\partial N / \partial x_1 < 0$ 时, 则表示子系统 1 的运动占主导地位或子系统 2 的运动占主导地位, 即系统中某个子系统占主导地位, 整个系统的有序性增加了; 当 $\partial M / \partial x_2 < 0$ 且 $\partial N / \partial x_1 < 0$ 时, 则表示两个子系统之间各自的独立运动占主导地位, 整个系统趋向于一种无序状态。当 $X_1 = X_2 = 0$ 时的点为奇点, 是方程 (2) 的定态解, 这时则表示两个子系统之间的相互运动出现不稳定性, 可能存在多种趋势。

以上分析可知, 泥石流灾害系统的自组织过程不具备稳定性, 它可以从相邻的初始状态出发, 形成完全不同的新的有序结构, 不同的结构影响了泥石流发育的各个因素的主次地位的不同, 以及各子系统之间的相互关系的不同。

3.3 序参量的产生和涨落

影响泥石流形成的因素很多, 但各因素对泥石流的作用不同, 有的具有长期的作用, 有的具有短期的^[10]。就地质背景来说, 地球营力作用、新构造运动、地震对泥石流形成有利, 并且是长期的效应。岩性对泥石流形成的影响, 在区域背景上, 松散破碎岩石导致泥石流暴发机率增大。水文气象因素对泥石流形成具有重大影响, 其正方向的增加对泥石流形成有利。流域地貌形态因素对泥石流的影响, 主要通过流域形态向圆发展、坡度增大等方面, 而且影响是长期的、不可逆的。植被覆盖率增大, 对泥石流形成有阻抑作用, 而土壤侵蚀性增大, 两因素都对泥石流具有长期的影响效应。人为因素包罗甚广, 既有正效应, 又有负效应; 既可是短期的, 又可是长期的。这些因

素的作用错综复杂, 构成泥石流形成的三个基本条件, 即丰富的松散固体物质、足够的水流和陡峭的地形。

由于组成系统的各个单元, 即子系统之间的非线性作用, 使泥石流活动无需外部调整而能自然地随机应力状态演化到自组织的极限应力临界状态。系统达到临界点时, 慢变量与快变量所处的地位、作用不同, 慢变量决定和控制着快变量, 快变量受慢变量的支配, 从而慢变量成为序参量。从工程区泥石流灾害系统存在的自组织特性来看, 泥石流堆积物方量、沟谷流域面积、沟床坡降和主沟长度四个控制参量对泥石流形成的影响较大, 其影响是长期的, 经过各子系统间的非线性作用可成为控制研究区泥石流灾害系统演化的四个序参量。随着流域面积的扩展, 沟床坡降的增大和主沟长度的变化, 整个流域固体松散物质的急剧增加, 经过序参量的进一步的竞争, 固体松散物质方量最终成为整个泥石流灾害系统的主序参量, 其量的大小主宰着整个系统的发展变化。从四个序参量的分维值的大小也可以看出泥石流堆积物方量的分维值最小, 表明其自组织程度最高, 对泥石流形成的影响最大。

在泥石流灾害系统的这种新的稳定有序结构下, 降水因素成为泥石流形成的重要“涨落”。由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, 整个泥石流灾害系统发生质的变化, 最终导致泥石流的暴发。

4 泥石流灾害系统协同进化的四个阶段

(1) 协调。这是一个原始“混沌”阶段, 也称为低层次无序阶段, 主要表现为泥石流形成的序参量不发育, 整个系统对泥石流形成不利, 泥石流形成过程并没有萌发, 各子系统缺乏竞争力, 以致于在整个系统中协调一致, 共处于同一的协调平衡状态。

(2) 协同。泥石流灾害系统内部任何两个子系统间的非线性作用的本质特征, 是双方之间作用的非对称性, 表现为一方的属性支配着另一方属性的变化, 另一方丧失了原先的属性而以一方的属性为自己的新属性。也就是, 一方的属性同化了另一方的属性, 使对方的属性与自己的属性同一。经过上述的同化与被同化的相互作用, 原先不同的子系统, 会以同化一方所提供的运动方式为统一模式, 协同一致的运动。

(3) 放大。经过上述的同化与被同化的相互作用, 由于一方被另一方所同化, 使得同化一方的数量, 得以呈指数形式迅速增长。

(4) 进化。由于这类相互作用连锁反应的进行, 系统内越来越多的子系统, 都一批接一批地被同化到某种涨落单元中来, 最终使绝大多数乃至全部子系统都按此涨落单元所提供的运动方式为统一模式, 协同一致的运动。这就表现为, 一个原先只是在局部范围的涨落, 被迅速放大到整体范围, 形成一个新的有序结构。

5 结论

综上所述, 我们可以得到以下几点认识:

(1) 泥石流灾害系统位于地球表层巨系统之中, 地球表层各圈层中任何一个因素的变化, 都会引起该系统的波动, 整个泥石流灾害系统受外界环境能量和物质输入而形成, 是物质和能量达到一定状态的产物, 是开放系统。

(2) 研究区泥石流沟道数与其堆积物方量、流域面积、平

(下转第 129 页)

- [2] 朱荫湄, 周启星 土壤污染与我国农业环境保护的现状[J]. 土壤通报, 1999, 30(3): 132- 135
- [3] 刘玉机, 刘绮, 王家旺 辽宁省环境重金属研究[M]. 北京: 环境科学出版社, 1996 153- 164, 276- 295, 376- 393
- [4] E Gabler, J Schneider. Assessment of Heavy Metal Contamination of Floodplain Soils due to Mining and Mineral Processing in the Harz Mountains Germany[J]. Economic Geology, 2000, 39(7): 774- 781
- [5] Zhixun Lin, Roger B, Herbert Jr. Heavy-metal Retention in Secondary Precipitates from a Mine Rock Dump and Underlying Soil, Dalarna, Sweden[J]. Environmental Geology, 1997, 33(1): 1- 12
- [6] T L Hudson, J C Borden, M Russ, et al Control on As, Pb and Mn Distribution in Community Soils of an Historical Mining District, Southwestern Colorado[J]. Environmental Ecology, 1997, 33(1): 25- 42
- [7] Y X Tao, Y Zhao, N Z Xu. The Effects of Metals Mine on Ecological Environment of Rocks and Soils[J]. Volcano Geology and Minerals, 1997, 20(3): 225- 231
- [8] 陈怀满, 郑春荣, 涂从, 等 中国土壤重金属污染: 现状与对策[J]. Ambio, 1999, 28(2): 130- 133
- [9] 王焕校 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000 3- 14
- [10] 孙铁珩, 周启星, 李培军 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003
- [11] 彭再德. Function of blur pattern in appraise of heavy metal pollution of area soil[J]. Protection of Chemosynthesis Environment, 1993, 13(4): 235- 238
- [12] 吴燕玉, 余国营, 王新 Cd, Cu, Pb, Zn, As 复合污染对水稻的影响[J]. 农业环境保护, 1998, 17(2): 49- 54
- [13] 夏增禄 土壤环境容量与应用[M]. 北京: 气象出版社, 1988
- [14] 夏增禄 中国土壤环境容量[M]. 北京: 地震出版社, 1992
- [15] 地理学会, 环境地质学会 环境污染与生态效应论文集[C]. 北京: 科学出版社, 1991
- [16] 郑振华, 周培疆, 吴振斌 复合污染研究进展[J]. 应用生态学报, 2001, 12: 469- 473
- [17] 李博文, 郝晋琨 土壤镉、铅、锌污染的植物效应研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(supp): 74- 76.
- [18] 夏汉平. 土壤植物系统中的镉研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3(3): 289- 298
- [19] 罗厚枚, 王宏康 土壤重金属复合污染对农作物的影响[J]. 环境科学, 1994, 13(5): 427- 432
- [20] 宋菲, 郭玉文, 刘孝义, 等 土壤中重金属镉、锌、铅复合污染的研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(4): 431- 436
- [21] 刘丽霞, 辛克敏, 张德美, 等 粉煤灰中镉、铬、铅、锌、汞对土壤及作物影响的初步评价[J]. 贵州科学, 1998, 16(3): 207- 211
- [22] 李湘洲 重金属铅和镉对土壤与作物的危害与防治[J]. 经济林研究, 2000, 18(4): 12- 13
- [23] 王凯荣, 周建林, 龚惠群 土壤镉污染对蓖麻的生长毒害效应[J]. 应用生态学报, 2000, 11(5): 773- 776
- [24] 李清报, 罗样熙, 杨良 土壤作物生态系统中的铅镉污染影响研究, 云南环境科学, 2002, 21(2): 10- 11
- [25] 李忠海, 王海燕, 梁文彬 土壤镉、锌、铅复合污染对芹菜的影响[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 36- 39
- [26] 游植麟 土壤受镉铬铅复合污染的生物效应研究[J]. 农业环境保护, 1997, 16(3): 131- 132

(上接第 79 页)

均沟床比降和主沟长度等形态要素间存在非线性关系, 堆积物粒度组成具有很好的分形结构特征, 分维值的大小, 表明了该系统自组织程度的高低。

(3) 泥石流暴发是松散堆积物起动的结果, 松散堆积物的分布与聚集受流域面积、主沟长度、沟床坡度等因素的影响, 特征值的过大或过小都不利于泥石流的发生。在工程区流域面积 $< 5 \text{ km}^2$, 主沟长度 $< 3 \text{ km}$ 和主沟平均沟床坡度 $< 30^\circ$ 的沟谷, 最利于泥石流的发生。松散堆积物的堆积角保持在临界角附近, 整个松散堆积物被锁定在自组织临界状态

参考文献:

- [1] 郭治安, 等 协同学入门[M]. 成都: 四川人民出版社, 1988
- [2] 王裕宜, 詹钱登, 韩文亮, 等 泥石流暴发的应力自组织临界特性[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 39- 43
- [3] 罗德军, 艾南山, 李后强 泥石流暴发的组织临界现象[J]. 山地研究, 1995, 13(4): 213- 218
- [4] 高鹏 流域水系的多尺度分形研究及应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(2): 31- 39
- [5] 胡卸文, 钟沛林 云南蒋家沟流域泥石流沟谷演变的非线性特征[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(1): 94- 96
- [6] 易顺民, 孙云志 泥石流的分形特征及其意义[J]. 地理科学, 1997, 17(1): 24- 31
- [7] 易顺民 泥石流堆积物的分形结构特征[J]. 自然灾害学报, 1994, 3(2): 91- 96
- [8] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所 泥石流研究与防治[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989
- [9] 张成恭 工程地质学(上册)[M]. 北京: 地质出版社, 1979
- [10] 杜榕桓, 段金凡 中国泥石流形成环境剖析[J]. 云南地理环境研究, 1990, 2(2): 8- 17

下, 泥石流具有自组织临界性。

(4) 泥石流灾害系统是由大量子系统按一定的结构和方式组合起来的复杂体系, 这些不同层次的子系统通过非线性作用, 既协同又制约, 经过协调、协同、放大和进化等阶段, 促使系统由无序向有序的方向发展进化。

致谢: 中国科学院成都山地灾害与环境研究所游勇研究员和柳金峰硕士在野外考察中给予了大力支持, 在此表示致谢。