山 地 研 究，1992，10(1)，第57—61页
MOUNTAIN RESEARCH，1992，10(1)，p. 57—61

灰色灾变模型在蒋家沟泥石流年输沙量短期预测中的应用

刘希林
（中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所）

提 要 根据蒋家沟泥石流年输沙量最近8年的实测资料，运用灰色系统理论的灾变预测方法建立了泥石流年输沙量的灾变预测模型，对未来可能出现的年输沙量超过200万立方米的灾变年份进行了预测，并引入等维新息模型，使短期灾变预测得以连续进行。

关键词 蒋家沟 泥石流 年输沙量 灾变模型 预测

泥石流输沙量是评估泥石流规模和危险度的主要标志。输沙量的多少与河床沟道的冲淤和防治工程的设计密切相关，特别是超过某一阈值的输沙量更有着至关重要的作用。预测输沙量大小这一论题笔者已经作过探讨[1]，本文着重讨论超过某一灾变阈值的泥石流年输沙量出现的时间预测问题。

泥石流输沙是泥石流沟陡峻的坡度、大量松散固体物质储备和一定强度的降水三者综合作用的结果。当前两者为确定参数时，降水这一随机变量与输沙量更有着密切的关系。大量事实表明，降水量大的年份，泥石流暴发次数多、年输沙量也大，反之，降水量小，暴发次数少，年输沙量也小。因此可以认为输沙量这一因素中已经包含有降水量的因素。为此，在能够获得泥石流年输沙量资料的情况下，用它来进行灾变预测更为直接。若这一资料对某些泥石流沟来说尚为空缺，则可通过类似地区的泥石流年输沙量与降水量的相关分析，找出一定的规律，采用超过某一阈值的年降水量来对泥石流年输沙量作间接的灾变预测。本文则是以云南东川蒋家沟为例，利用近年来泥石流年输沙量实测值来进行灾变预测的。

（一）蒋家沟流域概况

蒋家沟是我国著名的暴雨泥石流沟，位于云南东川市北面的小江右岸。流域面积47.1平方公里，主沟长12.1公里，平均纵比降13.8%.沟内有松散固体物质12.3亿立方米。流域上部清水汇流区年降雨量约1200毫米，中上部固体物质补给区年降雨量700—850毫米。每年5—10月为雨季，降雨量占全年的85%以上，雨季常流水量0.5—1.0立方米/秒。11月至次年4月为干季，干季常流水量0.1－0.5立方米/秒。全年洪水和清水（泥石流除外）泥沙输出总量为12万立方米。1965—1988年间共暴发泥石流256次，平均每年暴发约12次，1965年最多达28次。泥石流年输沙总量一般为100—300万立方米，年平均为200万立方米左右，1974年实测最大达387万立方米[2].

本文改回日期：1991-12-03.

(二)灾变预测的理论基础

灾变预测是指某种灾害值在哪些年份将出现的预测。给定$x^{(0)}$为原始数列

$$x^{(0)}=[x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n)]. \tag{1}$$

式中　$x^{(0)}(i)$是指第i年的数据。

令ξ为灾变阈值,如果$x^{(0)}(i)\geqslant\xi$为灾变,则称此为上灾变。反之,如$x^{(0)}(i)\leqslant\xi$,则为下灾变。将$x^{(0)}(i)\geqslant\xi$或$x^{(0)}(i)\leqslant\xi$的数据重新组成新数列,记为$x_\xi^{(0)}$,则有

$$x_\xi^{(0)}=[x_\xi^{(0)}(1'),x_\xi^{0}(2'),\cdots,x_\xi^{(0)}(n')]\qquad n'<n. \tag{2}$$

灾变预测不是预测数据本身的大小,而是预测灾变值出现的时刻。从这一要求出发,在n'点以后的下一个时刻$(n+1)'$或再下一个时刻$(n+2)'$,这个数越大,表明下次出现灾变值的时间越远,反之这个数越小,表明下次出现灾变值的时间越近。这个数代表$x^{(0)}(i)\geqslant\xi$(或$\leqslant\xi$)所出现的点,据此可得下述双数列

$$P=\begin{bmatrix} 1' & 2' & \cdots & n' \\ x_\xi^{(0)}(1') & x_\xi^{(0)}(2') & \cdots & x_\xi^{(0)}(n') \end{bmatrix}. \tag{3}$$

因$x_\xi^{(0)}(i')$与$x^{(0)}(i)$有明确的一一对应的关系,因此若将P中每一对数看作二维平面的一个点,则可规定一个水平投影算子P,记垂直坐标符号为q,这种映射记为$p(i')$,且有$p(i')=q$,则称

$$P=p(1'),p(2'),\cdots,p(n'), \tag{4}$$

为灾变日期集,据此,按GM(1,1)五步建模步骤建立灾变模型进行预测[3,4]。

(三)灾变模型在蒋家沟泥石流年输沙量短期预测中的应用

1. 收集基础资料

灾变预测建模用的基础资料见表[5,6]。

表1　蒋家沟实测泥石流年输沙量

Table 1　The observational annual sediment yield of debris flows in Jiangjia Ravine

序　号	1	2	3	4	5	6	7	8
时　间(年)	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
暴发次数(次)	14	23	9	11	6	13	7	14
年输沙量(万立方米)	227	376	150	218	107	208	169	315

2. 建立灾变模型

根据表1,得原始数列为

$$\begin{aligned} x^{(0)}&=[x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(8)] \\ &=(227,376,150,218,107,208,169,315). \end{aligned}$$

蒋家沟多年平均输沙量为200万立方米,给定灾变阈值$\xi=200$,$x^{(0)}(i)\geqslant200$为需要预测其发生年份的灾变值,则有新数列

$$\begin{aligned} x_\xi^{(0)}&=(227,376,218,208,315) \\ &=[x^{(0)}\xi(1,)x_\xi^{(0)}(2),x_\xi^{(0)}(4),x_\xi^{(0)}(6),x_\xi^{(0)}(8)], \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} P&=[p(1'),p(2'),p(3'),p(4'),p(5')] \\ &=(1,2,4,6,8). \end{aligned}$$

将 P 中数据作 1 次累加生成

$$P^{(1)}(1)=1,$$
$$P^{(1)}(2)=P^{(1)}(1)+p(2')=3,$$
$$P^{(1)}(3)=P^{(1)}(2)+p(3')=7,$$
$$P^{(1)}(4)=P^{(1)}(3)+p(4')=13,$$
$$P^{(1)}(5)=P^{(1)}(4)+p(5')=21,$$

即
$$P^{(1)}(1)=[P^{(1)}(1),P^{(1)}(2),\cdots,P^{(1)}(5)]=(1,3,7,13,21).$$

由 $P^{(1)}$ 建立 GM(1,1)模型

$$dP^{(1)}/dt+aP^{(1)}=u. \tag{5}$$

式中　a,u 为参数向量 $\hat{a}$ 的元素，并有

$$\hat{a}=\begin{bmatrix}a\\u\end{bmatrix}=(B^TB)^{-1}B^TY_n, \tag{6}$$

由此得微分方程(5)式的解

$$\hat{P}^{(1)}(t+1)=[P^{(1)}(1)-u/a]e^{-at}+u/a, \tag{7}$$

即为所求的预测模型。

构造数据矩阵 B 和 Y_n

$$B=\begin{bmatrix}-0.5P^{(1)}(1)+P^{(1)}(2) & 1\\ -0.5P^{(1)}(2)+P^{(1)}(3) & 1\\ -0.5P^{(1)}(3)+P^{(1)}(4) & 1\\ -0.5P^{(1)}(4)+P^{(1)}(5) & 1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-2' & 1\\ -5' & 1\\ -10' & 1\\ -17' & 1\end{bmatrix},\qquad Y_n=\begin{bmatrix}P(2)\\P(3)\\P(4)\\P(5)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2\\4\\6\\8\end{bmatrix},$$

并计算 $(B^TB)^{-1}B^TY_n$ 后得

$$\hat{a}=\begin{bmatrix}a\\u\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-0.3980\\1.7040\end{bmatrix},$$

即 $a=-0.3980, u=1.7040$，　$u/a=-4.2814$，则所求的灾变预测模型为

$$\hat{P}^{(1)}(t+1)=5.2814e^{0.3980t}-4.2814. \tag{8}$$

3. 检验模型精度

预测模型的精度直接关系到预测结果的可信度，我们分别采用残差检验（表 2 ）和后验差检验（表 3 ），并由 $\hat{P}(t)=\hat{P}^{(1)}(t)-\hat{P}^{(1)}(t-1)$ 计算模型还原值。

表 2　残差检验结果

Table 2　The result of the error test

模型还原值	实际值	绝对误差	残差(%)
$\hat{P}(2)=2.58$	$P(2)=2$	$q_2=-0.58$	$e_2=-29.0$
$\hat{P}(3)=3.85$	$P(3)=4$	$q_3=0.15$	$e_3=3.8$
$\hat{P}(4)=5.72$	$P(4)=6$	$q_4=0.28$	$e_4=4.7$
$\hat{P}(5)=8.52$	$P(5)=8$	$q_5=-0.52$	$e_5=-6.5$

表 3　后验差检验结果[3]

Table 3　The result of the test of the remains difference

预测精度等级	p	C
好	>0.95	<0.35
合　格	>0.80	<0.50
勉　强	>0.70	<0.45
不合格	$\leqslant 0.70$	$\geqslant 0.65$

后验差比值为

$$C=\frac{S_2}{S_1}=\frac{\sqrt{\frac{1}{4}\sum_{t=2}^{5}[q(t)-\bar{q}]^2}}{\sqrt{\frac{1}{5}\sum_{t=1}^{5}[p(t)-\bar{p}]^2}}=\frac{0.6336}{2.5612}=0.2474.$$

小误差概率为

$$p=p[|q(t)|<0.6745S_1],$$

即

$$p=p[|q(t)|<1.7275].$$

由表 2 可知，所有 $|q(t)|$ 值均小于 1.7275，即 $p=100\%=1$. 由表 3 知，当 $p>0.95$，$C<0.35$时预测精度为"好"，用灰色灾变模型对泥石流年输沙量进行预测是可行的。

4. 模型预测结果

根据灾变预测模型(8)式来预测自 1985 年以后蒋家沟泥石流年输沙量超过 200 万立方米将会出现的第一个年份在哪一年。首先由预测模型(8)来计算出 $\hat{P}^{(1)}(6)=34.35$，$\hat{P}^{(1)}(5)=21.67$，由此得到 $\hat{P}(6)=\hat{P}^{(1)}(6)-\hat{P}^{(1)}(5)=12.68$. 因 $P(5)=8$，即从 $t=8$算起，12.68与8相差4.68，这表明蒋家沟下一次泥石流灾变年份将在4—5年后再次出现，即在1989年或1990年出现。事实证明这一预测结果是正确的，1990年蒋家沟泥石流的确偏大，年输沙量接近300万立方米。但若依此方法继续预测，则下一次灾变年份将相隔6年而出现在1996年，再下一次将相隔9年而推迟到2005年才出现。显然，在蒋家沟松散固体物质储量非常丰富的情况下，这种随着时间的增长，泥石流活动明显减弱的趋势与实际情况是不相符的。因此模型(8)式预测的时间越长，其可靠度越低，它的有效结论可能只是建模后预测的第一个灾变年份。也即只能应用于泥石流年输沙量的短期预测问题。

为了解决灾变预测的连续性，本文在此根据邓聚龙关于等维新息模型具有最高精度的结论[4]，在增加一个新信息的同时又去掉一个老信息，建立等维新息 GM(1,1)模型，再预测下一次灾变年份。如此不断更新，模型预测一次，实践检验一次，再建立一个等维新息模型，以保持灾变年份的连续预测始终达到最高精度水平。

蒋家沟自1986—1989年间未曾发生过特大泥石流。1990年泥石流年输沙量超过灾变阈值200万立方米，已由灾变模型(8)式预测准确，因此可以加上这一新的年代信息，同时去掉原1978年的老信息，这样得到一个等维新息数列

$$P=(1,3,5,7,12).$$

仍将 P 中数据作1次累加生成后得

$$P^{(1)}=(1,4,9,16,28).$$

由 $P^{(1)}$建立的等维新息 GM(1,1)模型为

$$\hat{P}^{(1)}(t+1)=5.1411e^{0.4401t}-4.1411. \tag{9}$$

计算 $\hat{P}(6)=\hat{P}^{(1)}(6)-\hat{P}^{(1)}(5)=16.53$，已知 $P(5)=12$，即从 $t=12$算起，16.53与12相差4.53. 预测结果表明蒋家沟再下一次泥石流年输沙量的灾变年份将在4—5年以后出现，即在1994年或1995年再次出现年输沙量超过200万立方米的灾变年份。

(四)结 论

灾变预测模型的创立者是设想随着时间的推移，人类抵御灾害能力的增强，超过(或低于)某一灾变阈值的灾害事件的频率会越来越低。但对于泥石流这一突发性特定灾种来说，只要有充足的松散固体物质储量，在短期内泥石流活动很难有大幅度衰减(除非采取强有力的工程治理措施)。因此仅用一个灾变模型来作泥石流年输沙量的中长期预测是不可靠的，只有多次运用等维新息模型作短期预测，才是一项行之有效的方法。

由于 $\hat{P}(t)=\hat{P}^{(1)}(t)-\hat{P}^{(1)}(t-1)$ 不都为整数，也即下一次灾变年份与建模用的最后一次灾变年份的时间间隔很难是整数年(可四舍五入)，这样就不可避免地使预测的灾变年份有一定的变幅，但一般不会超过两个年份。

本文以蒋家沟为例，论述了预测泥石流年输沙量灾变值出现时间的基本步骤和方法并作了相应的检验和验证。但在其它暴雨泥石流地区，仿此法加以应用时，应结合具体情况，重新确定灾变阈值 ξ，建立 GM(1,1)灾变模型和等维新息模型，才能进行灾变预测。

参 考 文 献

〔1〕 刘希林，1989，灰色模型和回归分析在泥石流预测中的应用，灾害学，4(2)，第26—30页。
〔2〕 吴积善等，1990，云南蒋家沟泥石流观测研究，科学出版社，第1—140页。
〔3〕 邓聚龙，1986，灰色预测与决策，华中理工大学出版社，第125—133页。
〔4〕 邓聚龙，1987，灰色系统基本方法，华中理工大学出版社，第145—150页。
〔5〕 康志成，1987，蒋家沟泥石流观测实验研究，中国水土保持，(2)，第21—22页。
〔6〕 李槭等，1979，云南东川蒋家沟泥石流发生、发展过程的初步分析，地理学报，34(2)，第156—167页。

THE APPLICATION OF GREY CATASTROPHE MODEL TO THE FORECAST ON ANNUAL SEDIMENT YIELD OF DEBRIS FLOW ALONG JIANGJIA RAVINE

Liu Xilin

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy)

Abstract

Based on the observational data of the recent 8 years on annual sediment yield of debris flow along Jiangjia Ravine and appling the method of the catastrophe forecast of Grey System theory, this study has established the catastrophe model of annual sediment yield by debris flow in Jiangjia Ravine. It has forecasted the following possible catastrophic years in which the annual sediment yield of debris flow will be over 2 million m^3. Furthermore, it introduced the equal dimension-new information model, which makes the short-term catastrophe forecast can be done continuously.

Key words Jiangjia Ravine, debris flow, annual sediment yield, catastrophe model