泥石流沟谷演化的不等时距灰色预测*

蒋 忠 信

(铁道部第二勘测设计院科研所)

提　要：泥石流沟谷纵剖面形态系表征泥石流发育的综合地形指标。本文以利子依达沟为例，用不等时距GM（1，1）预测沟谷纵剖面形态指数N值的变化，并改进了预测模型的精度。

主题词：泥石流　沟谷纵剖面　不等时距灰色预测

分　类：(中图法) P931.1　　(科图法) 57.15775

泥石流沟谷纵剖面形态富涵流域演化和泥石流发育的信息，沟谷纵剖面形态指数N可综合表征影响泥石流发育的诸多地形因素。本文以成昆铁路利子依达沟为例，应用不等时距的GM（1，1）灰色模型预测N值的变化，进而判断泥石流流域演化的前景和地貌条件的变迁，为泥石流发展趋势的预测提供一方面的依据。

1　泥石流沟谷纵剖面形态

普遍认同，泥石流发育的主要条件是暴雨、地形和松散固体物质。既有的工作采用过的地形指标甚众，诸如沟床（或形成区、流通区、堆积区）纵比降、流域（或形成区、流通区）平均坡度、沟网密度、沟槽横断面、流域面积、流域形态和流域高差等。崔鹏[1]进而建立了据8个地形要素判别泥石流沟谷类型和活动性的函数式，并据沟床比降与泥石流活动性发生联系。刘希林[2]从发展的观点，阐述了泥石流沟谷纵、横剖面形态特征与演变趋势。近年来，艾南山等提出用表征地貌发育期的流域面积-高程曲线（斯特拉勒曲线）及其积分（斯特拉勒积分）来判别泥石流的活动性[3]，用流域系统信息熵和超熵产生来刻画流域的稳定性[4,5]，为描述流域地貌演化开辟了新途径。

研究表明[6]，在一个漫长的地貌发育旋回中，在条件均一、构造典型的前提下，河谷纵剖面呈抛物线形，其方程为

$$h/h_o = (l/L)^N \tag{1}$$

本文1993年4月12日收到，1993年11月8日收到修改稿。

* 本文为院《新建铁路泥石流灾害预测》项目研究成果之一。

式中，h、l 分别为河谷中某点距河口的高差、河长；h_0、L 分别为流域高差和河流全长；N 为纵剖面形态指数，可描述地貌演化的阶段。

对于产水产沙条件均一的扇形或菱形的泥石流流域，其斯特拉勒曲线和积分、流域系统信息熵 H 和超熵产生 $\delta_X P$，均可用沟谷纵剖面形态指数 N 来表达[7,8]：

$$H = l_n \frac{N+2}{2} - \frac{N}{N+2} \tag{2}$$

$$\delta_X P = \frac{N^3(N^2-4)(N+2)}{32(6-N)} \tag{3}$$

这样，N 值不仅能直接反映沟床纵比降、沟谷形态和谷坡坡度，而且能表征泥石流流域的稳定性与演化趋势，是较理想的评判泥石流活动的综合地形指标。

在一个流域地貌发展旋回中，N 值由小到大单调变化，沟谷纵剖面形态由上凸（$N<1$）经直线（$N=1$）向下凹抛物形（$N>1$）演化，流域地貌相应由侵蚀回春期、深切侵蚀期（$N<1$）经过渡期（$N\approx1$）向均衡调整期（$N>1$）发展，最终达到新的均衡剖面。

地形条件既直接以势能转化为促发泥石流的动力，又是供给泥石流的松散固体物质得以形成和聚积的重要条件。泥石流流域又是一个开放系统，其稳定性可用超熵 $\delta_X P$ 来刻画。$\delta_X P$ 为负值，系统不稳定；且负超商的绝对值越大，系统越不稳定，因此，可用与超熵相应的 N 值作为必要的地形条件，将泥石流发育的全过程划分为两个地貌期和 5 个地貌阶段（表 1），参与对流域演化和泥石流的评判和预测。阶段划分的界限 N 值，均与据（3）式所得 N-$\delta_X P$ 曲线上的特征点相应。$N=Z$ 对应的 $\delta_X P$ 为 O，据此将 $N<2$ 对应的 $\delta_X P<O$ 段划为泥石流发育期，将 $N<2$ 对应的 $\delta_X P>O$ 段划为泥石流衰退期。$N=0.62$、1.23，分别对应 N-$\delta_X P$ 曲线的曲率极值点与拐点，据此将泥石流发育期划分为 3 个阶段。$N=1.62$ 对应 $\delta_X P$ 的极小值点，流域最不稳定。

表 1 以 N 值划分的泥石流发育的地貌阶段

Morphologic stages of development of debris flow are divided by the index N

地貌期	N 值	地貌阶段	N 值	$\delta_X P$ 值
泥石流发育期	$N<2.0$	泥石流孕育阶段	$N\leqslant0.62$	0—−00.0131
		泥石流发展阶段	$0.62<N\leqslant1.23$	−0.0131—−0.0979
		泥石流旺盛阶段	$1.23<N<2$	−0.0979—−0.151—0
泥石流衰退期	$2\leqslant N<6$	泥石流衰减阶段	$2\leqslant N<3.71$	0—38.85
		流域稳定阶段	$3.71\leqslant N<6.0$	>38.85

当 N 值处于泥石流发育旺盛的地貌阶段，地形条件最有利于促发泥石流，尤以 $N=1.62$ 时为最。N 值处于泥石流发展阶段时，地形条件较有利于泥石流的形成，但是否一定暴发泥石流，尚取决于泥石流其它形成条件之组合。N 值处于泥石流衰减阶段时，地形条件有利于流域稳定，虽仍可偶发泥石流，但规模与机率明显减小。N 值处于泥石流孕育阶段或流域稳定阶段，不具备引发泥石流的必要地形条件，不会暴发泥石流。

2　N 值的不等时距灰色预测方法

对泥石流发展趋势的预测，系包容对控制泥石流形成诸因素的演化实施定量的预测。显然，对 N 值的定量预测是对流域演化和泥石流发展趋势加以预测的基础。

在地质构造稳定的条件下，流域地貌演化的方向是确定的，沟谷纵剖面形态由凸变凹、形态指数 N 值由小变大的进程也是连续而单调的。但由于外营力乃至人文活动的影响，这种进程的速率也有某种不确定性，N 值具有灰色性。因此，对 N 值的预测可以采用灰色预测的方法。

N 值需利用地形图或航片进行量计和用抛物线式进行曲线拟合而得。灰色预测因此而可能面临两个方面的困难。一是缺少 4 个时期的图片资料时，灰色预测碍难进行；二是诸期图片的成图或摄象的时间间隔不可能等同，采用一般的等时距灰色预测方法也感困难。

针对不等时距问题，黄阳才等[9]提出了不等时距的 GM（1，1）型预测方法，并用于滑坡位移的预测。其方法是在数据累加和累减过程中考虑了时距的权重。设原始数列为 $x^{(o)}(k)$，$k=1, 2, \cdots, n$；且 $x^{(o)}(k)$ 与 $x^{(o)}(k-1)$ 之间的时距为 $(T(k)-T(k-1))$，则原始数据的一次累加式为

$$k=1\text{ 时}, x^{(1)}(k)=x^{(o)}(k) \tag{4-1}$$

$$k\geqslant 2\text{ 时}, x^{(1)}(k)=x^{(1)}(k-1)+(T(k)-T(k-1))\cdot x^{(o)}(k) \tag{4-2}$$

作 GM（1，1）预测，得到预测值的累加量 $x^{(1)}(k)$，再作一次累减，得预测值 $\hat{x}^{(o)}(k)$：

$$k=1\text{ 时}, \hat{x}^{(o)}(k)=\hat{x}^{(1)}(k) \tag{5-1}$$

$$k\geqslant 2\text{ 时}, \hat{x}^{(o)}(k)=(\hat{x}^{(1)}(k)-\hat{x}^{(1)}(k-1))/((T(k)-T(k-1)) \tag{5-2}$$

这一方法的思路是可取的，但其所得的预测值的残差较大而且残差率的变化也大，还需再建立残差模型加以修正。因而这种方法还可加以研究与改进。

通过研究与验算，我们发现可通过对时距权的分配加以改进来优化预测结果。原方法是将时距 $(T(k)-T(k-1))$ 全权赋予在 $x^{(o)}(k)$ 上，这不一定合理。因为时距 $(T(k)-T(k-1))$ 系 $x^{(o)}(k-1)$ 与 $x^{(o)}(k)$ 之间的时间间隔，时距权宜部分赋予在 $x^{(o)}(k-1)$ 上。研究结果，将时距 $(T(k)-T(k-1))$ 的 1/4 赋予在 $x^{(o)}(k-1)$ 上、3/4 赋予在 $x^{(o)}(k)$ 上的预测结果最佳。据此，原始数据的一次累加式为：

$$k=1\text{ 时}, x^{(1)}(k)=x^{(o)}(k) \tag{6-1}$$

$$k\geqslant 2\text{ 时}, x^{(1)}(k)=x^{(1)}(k-1)+\frac{1}{4}(T(k)-T(k-1))\cdot x^{(o)}(k-1) + \frac{3}{4}(T(k)-T(k-1))\cdot x^{(o)}(k) \tag{6-2}$$

据此作 GM（1，1）预测，得预测值的累加量 $\hat{x}^{(1)}(k)$，再按 $\hat{x}^{(o)}(k)=\hat{x}^{(1)}(k)-\hat{x}^{(1)}(k-1)$ 式计算预测值。进一步进行后验差检验。据（7）式得到残差率的均值，并据此对预测式进行修正，得修正后的预测式如（8）式。

即平均残差率

$$\bar{\Delta} = \sum_{i=1}^{n} [(x^{(o)}(i) - \hat{x}^{(o)}(i))/x^{(o)}(i)]/n \tag{7}$$

式中 i=1，2，…，n

修正后的预测式为

$$\hat{x}^{(o)} = [\hat{x}^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k-1)]/(1-\bar{\Delta}) \tag{8}$$

为说明上述方法，假设一算例如下：设变量 $x=e^{0.1t}$，当 t=1、3、7、10、12 时，原始数据列 $x^{(o)}$ 为（1.1052，1.3499，2.0138，2.7183，3.3201），一次累加数列 $x^{(1)}$ 据（6）式为（1.1052，3.6827，11.0740，18.7005，25.0398）。据此建立 GM（1，1）模型，得

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.099611 \\ 1.191808 \end{bmatrix}$$

故预测值的累加量为

$$\hat{x}^{(1)} = 13.0698e^{0.09961t} - 11.9646$$

预测式为

$$\hat{x}_1^{(o)} = 1.23916e^{0.09961t}$$

其残差列于表 2。残差值虽较大，但残差率是稳定的。可据平均残差率修正预测式。预测式经修正后为

$$\hat{x}^{(o)} = 1.0026e^{0.09961t}$$

此式与假设式 $x=e^{0.1t}$ 基本相同，残差近于 o，证明改进的不等时距 GM（1，1）预测方法是可行的。

表 2 不等时距 GM（1，1）预测结果之对比

Contrast of forecasting results with GM（1，1）of unequal interval

时 间 t	$x^{(o)}=e^{0.1t}$	改进的不等时距预测结果（本文）				不等时距预测结果[8]	
		$\hat{x}_1^{(o)}$	残差率 Δ（%）	$x^{(o)}$	残差率 Δ（%）	$\hat{x}_1^{(o)}$	残差率 Δ（%）
1	1.1052	1.3689	−23.86	1.1077	−0.23	1.3648	−23.49
3	1.3499	1.6707	−23.76	1.3518	−0.15	1.6434	−21.74
7	2.0138	2.4886	−23.58	2.1036	0.01	2.3828	−18.32
10	2.7183	3.3553	−23.43	2.7149	0.13	3.1485	−15.83
12	3.3201	4.0950	−23.34	3.3134	0.23	3.7912	−14.19
平均			−23.59		0.00		

3 实例：利子依达沟

成昆铁路 1971 年通车。1981 年 7 月 9 日，位于乌期河车站附近大渡河右岸的利子依达沟突发大规模泥石流，颠覆旅客列车。利子依达流域的平面形态为菱形，流域面积 24.49km²，高差 1760m，主沟长 7.72km。据 1965、1971、1981、1987 年等 4 个时期的航片或地形图计量，沟谷纵剖面形态指数 N 值分别为 1.78、1.83、1.93 和 1.95。基于此，应用本文改进的不等时距 GM（1，1）预测通车百年内 N 值的变化。

以 1965 年为起算点，则时间 t 的数据列为 (0，6，16，22)。N 的原始数列 $N^{(o)}$ 为 (1.78，1.83，1.93，1.95)。据 (6) 式，一次累加数列 $N^{(1)}$ 为 (1.78，12.685，31.735，43.405)。由

$$B=\begin{bmatrix}-7.2325 & 1\\ -22.2100 & 1\\ -37.5700 & 1\end{bmatrix},\quad Y=\begin{bmatrix}1.83\\ 1.93\\ 1.95\end{bmatrix},$$

$$B^TB=\begin{bmatrix}1957.098056 & -67.0125\\ -67.0125 & 3\end{bmatrix}$$

$$(B^TB)^{-1}=\frac{1}{1380.619012}\begin{bmatrix}3 & 67.0125\\ 67.0125 & 1957.098056\end{bmatrix}$$
$$=\begin{bmatrix}0.002172938 & 0.04853801\\ 0.04853801 & 1.417551\end{bmatrix}$$

$$B^TY=\begin{bmatrix}-129.362275\\ 5.71\end{bmatrix}$$

故

$$\hat{a}=\begin{bmatrix}a\\ b\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.002172938 & 0.04853801\\ 0.04853801 & 1.417551\end{bmatrix}\begin{bmatrix}-129.362275\\ 5.71\end{bmatrix}$$
$$=\begin{bmatrix}-0.003944163\\ 1.815229\end{bmatrix}$$

$$\therefore\quad \hat{N}_1^{(1)}=462.01174e^{0.003944163t}-460.23174$$
$$\hat{N}_1^{(o)}=1.818661e^{0.003944163t}$$

如表 3，$\hat{N}_1^{(o)}$ 的平均误差率为－1.505％。故预测式为

$$\hat{N}^{(o)}=\frac{1.818661}{1.01505}e^{0.003944163t}=1.7917e^{0.003944t}$$

其误差率之和为 0。据此式，预测值列于表 3。

预测结果表明，在 80 年代以前，利子依达流域处于泥石流旺盛的地貌阶段。但在 1965 年即已跨过了流域最不稳定的时期(N＝1.62)。因此流域地貌从 1965 年以来是向泥石流逐渐衰减、流域渐趋稳定的方向演化。至 90 年代，N 值已大于 2.0，迈入了泥石流衰减的地貌阶段。当然泥石流的发育不仅仅决定于地形条件，泥石流发展趋势尚应综合形成泥石流各要素的变化来系统预测。虽然如此，单就地貌条件而言，利子依达流域地貌的演化是有利于流域稳定和泥石流衰退的。

4　问题的讨论

4.1　关于沟谷演化的方向性。

表 3 利子依达沟 N 值的不等时距 GM (1，1) 预测结果

Forecasting result of N value of Liziyida valley with GM (1，1) of unequal interval

时 间 t（年）	年 份	实测值 $N^{(o)}$	预 测 结 果				流域演化阶段
			修正前 $\hat{N}_1^{(o)}$	误差率（%）	修正后 $\hat{N}^{(o)}$	误差率（%）	
0	1965	1.78	1.8187	−2.172	1.7917	−0.66	泥石流旺盛阶段
6	1971	1.83	1.8622	−1.760	1.8346	−0.25	
16	1981	1.93	1.9372	−0.369	1.9084	1.12	
22	1987	1.95	1.9835	−1.719	1.9541	−0.21	
28	1993				2.0009		泥石流衰减阶段
31	1996				2.0247		
56	2021				2.2345		
81	2046				2.4661		
106	2071				2.7216		
平均				−1.505		0.00	

在构造长期稳定的条件下，流域地貌近似为封闭系统，经历戴维斯的地貌旋回过程，沟谷纵剖面形态由上凸经直线向下凹抛物线形演化，N 值由小变大，沟谷单方向演进。这种演化进程可能为短暂而激烈的构造抬升所打断，促使流域地貌侵蚀回春，沟谷纵剖面呈现下陡凸、上缓凹的复合形，N 值转而变小。但实际上，在发育泥石流的山区，构造抬升与流域侵蚀往往是同时伴生的，流域是开放的地貌系统，随时有能量和物质的输入与输出，流域地貌和沟谷形态则是内外营力对抗程度的反映，演化的方向并非单调固定的。此时对沟谷演化和 N 值变化的预测就会比本文论述的更为复杂，结果也更多样化。

4.2 关于沟谷演化的速率

一般认为，流域地貌的演化是一个漫长而缓滞的过程，在一个短时期内可以近似地视流域地貌为静态。与流水作用相比，泥石流的动力作用速率至少大数十倍，对沟谷的下切是明显而频繁的，将泥石流沟谷从动态观点加以研究和防治是必要的。例如，在成昆铁路所经金沙江河谷段，三滩沟 1976 年 7 月 3 日泥石流将沟谷冲深 3.3m，三滩以北的上格达沟泥石流一次下切沟谷 7m，三滩以南的遮不苦沟 1966 年一次泥石流切深沟谷 13m[10]。可见，在泥石流发展趋势预测中，对泥石流沟谷演化加以预测是可行的。

泥石流主沟迅速下切，支沟侵蚀难以紧跟，流域内愈低级别的沟道侵蚀愈显滞后，流域地貌演化则更较缓滞。因而以 N 值变化来描述流域演化就难免有所超前，这在对预测结果的评价中应酌情考虑。

4.3 关于预测客体的选择

如前所述，由于流域内高级别水道的流量一般较大，其沟谷演化的速率比其支流、支沟要迅速，致使主沟谷的演化阶段超前于支沟谷，其纵剖面形态指数 N 也往往比支沟谷的值要大。这样，沟谷演化预测的对象不同，预测结果会有差异。预测对象的选择是正确预测的前提。我们认为，预测对象宜针对防灾目标而定。例如，对沿江铁路，主要应预防两岸支沟泥石流的危害，预测应以两岸支沟为对象，而非预测主河的演化。如铁路从河口通过，则需对这条河谷进行预测。因为即使支沟有泥石流，并不一定会危及到主河下游。预测对象不同所

得结果自然相异。

工作中得到本所胡斌、徐晓琴同志协助，特此致谢！

参 考 文 献

〔1〕 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．科学出版社，1991.

〔2〕 刘希林．试论泥石流动力作用与沟谷地貌演变的关系．地理科学，1988，8（4）.

〔3〕 艾南山等．泥石流活动性的一种判别方法．铁道工程学报，1986，（4）.

〔4〕 艾南山，岳天祥．再论流域系统的信息熵．水土保持学报，1988 2（4）：1-7.

〔5〕 岳天祥，艾南山等．论流域系统稳定性的判别指标——超熵．水土保持学报，1989，3（2）.

〔6〕 蒋忠信．滇西北三江河谷纵剖面的发育图式与演化规律．地理学报，1987 42（1）：16-27.

〔7〕 蒋忠信．泥石流沟谷纵剖面形态与流域地貌信息熵．地质灾害国际交流论文集，西南交通大学出版社，1993.

〔8〕 蒋忠信．泥石流 流域系统的超熵．中国地质灾害与防治学报，1992，3（1）.

〔9〕 黄阳才等．滑坡体位移的不等时距灰色预测．水文地质工程地质，1992，19（3）.

〔10〕 谢修齐，姚一江．从三滩泥石流沟发展趋势探讨整治方案．泥石流防治理论与实践，西南交通大学出版社，1991.

AN UNEQUAL INTERVAL GRAY FORECAST TO THE DEVELOPMENT OF DEBRIS FLOW VALLEY

Jiang Zhongxin

(The Second Surveying and Desiging Institute, Ministιy of Railway)

Subject terms: Debris flow , Longitudinal profile of valley, Gray forecast

Abstract

The shape of longitudinal profile of a debris flow valley contains the information about the evolution of the basin and the development of the debris flow , and is a synthetical topographic factor which indicates the develoment of the debris flow. Taking the Liziyida valley along the Chendu-Kunming railway as an example, the paper forecasts the change of the forming index N of the longitudinal profile of the valley by using the unequal interval GM (1, 1), and improves the accuracy of the forecast method. Finally relevant problems in forecasting valley evolution are discussed.