

滑坡的分维与预测*

汤连生 周萃英

(中山大学地球科学系, 广州 510275)

摘要 研究了滑坡的时空分维特征及其变化规律,探索性地提出了“升维迭加性原理”.在研究滑坡实例的基础上,指出了分维与预测的关系.

关键词 滑坡, 分维, 预测

分类号 P 642.22

1 Hausdorff 维数与关联维数

1.1 Hausdorff 维数

对于不规则的研究对象,如岩体的节理裂隙、断裂等,为了测得其长度,取一测量单位 ε 去度量,当 ε 不断缩小时,测得的长度 $N(\varepsilon)$ 便随着 ε 的缩小而不断增大. 求 ε 趋近于 0 时的极限,则有

$$C = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg(1/\varepsilon)}$$

如果能够存在一个数 D_0 , 当 $C < D_0$ 时, $N(\varepsilon)\varepsilon^C \rightarrow \infty$; 当 $C > D_0$ 时, $N(\varepsilon)\varepsilon^C \rightarrow 0$; 当 $C = D_0$ 时, $N(\varepsilon)\varepsilon^C$ 趋向有限数, 则 D_0 是“奇怪集合”的分维, 即 Hausdorff 维数.

1.2 关联维数

设有半径为 r 的小球 $N(\varepsilon)$ 个, 现用半径为 ε 的筛子去筛选, 筛漏下去的小球个数记为 $N_{\mp}(\varepsilon)$, 将半径小于 ε 的小球个数与总的小球个数之比记为 $C(\varepsilon)$, 则有

$$C(\varepsilon) = N_{\mp}(\varepsilon) / N(\varepsilon)$$

适当地改变 ε , 求其一段 ε 值区间, 有

$$C(\varepsilon) \propto \varepsilon^r$$

式中 r 就是关联维数的一种逼近. 更严格定义有

$$D_c = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg C(\varepsilon)}{\lg \varepsilon}$$

通常为了简便地求取 D_0 或 D_c , 可作 $\lg N(\varepsilon) - \lg(1/\varepsilon)$ 或 $\lg C(\varepsilon) - \lg \varepsilon$ 关系曲线, 则无标度区的斜率即为 D_0 或 D_c , 这就是关联维数.

* 国家自然科学基金和广东省自然科学基金资助项目

收稿日期: 1995-03-01 汤连生, 男, 32 岁, 讲师

2 滑坡的时空分维特征及其变化规律

2.1 滑坡的时间分维特征

滑坡的发生如果从其活动历史之角度出发,可以认为是周期或者非周期性地同一表面或其周近表面上所产生的重复滑动;如果从其短期临滑阶段所反映的特点看,则可认为是一种应力应变不断的快速积累达到某一临界阈值时所产生的灾变破坏现象.因而,研究滑坡的分维特征也应从不同的尺度区间进行探讨.

2.1.1 滑坡历史活动时期之时间分维特征 据长江三峡地区滑坡史料记载^{1,2)},取一定时段 ϵ , 统计出有滑坡发生的时段数 $N(\epsilon)$, 通过计算可得 $\lg N(\epsilon) \sim \lg(1/\epsilon)$ 关系曲线(如图 1a 所示). 在该曲线上有 3 个直线段, 即 AB, CD, DE, 其斜率可分别代表 3 个不同时期的分维值, 即 $D_{AB}=1.035$, $D_{CD}=1.235$, $D_{DE}=3.487$, 且 $D_{AB} < D_{CD} < D_{DE}$.

用同样的方法对四川金堂垮梁子滑坡进行研究可得其 $\lg N(\epsilon) \sim \lg(1/\epsilon)$ 关系曲线(图 1b). 从该曲线也可见其明确存在着 3 个无标度区, 其斜率 $D_{AB}=1.118$, $D_{CD}=1.367$, $D_{EG}=2.58$, 可分别代表 3 个不同时期的分维值, 且有 $D_{AB} < D_{CD} < D_{EG}$.

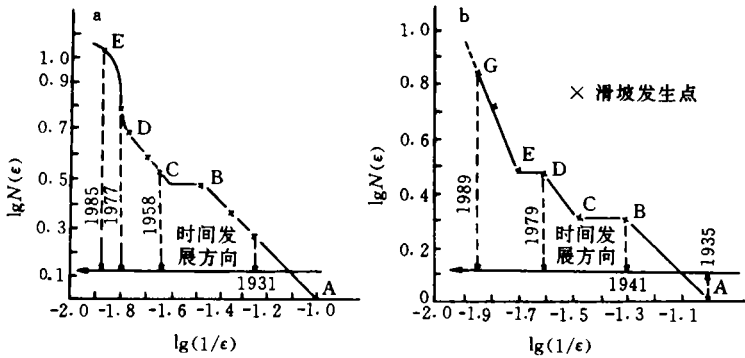


图 1 长江三峡地区滑坡(a)和四川金堂垮梁子滑坡(b)活动历史之时间分维分析图

Fig. 1 Analysing map of fractal dimension in the historical period of landslides in three gorges, Yangtze River and Kualiangzi landslide

图 1 曲线的总体趋势特征一致, 两滑坡的活动规律类似, 现以图 1b 为例分析. 顺着滑坡活动历史(即从 1935~现今), 在图 1b 上表现为由 AB 段向 EG 段发展, 无标度区的斜率递增. 若将 AB, CD, EG 段分别视为垮梁子滑坡历史活动时期的三个子时期, 则说明滑坡活动过程中伴随着其分维值的升高, 即下一个子时期的分维是在上个子时期分维值的基础上有所增加的. 例如 CD 段分维值是在 AB 段分维值的基础上增加的, 说明在滑坡活动的历史时期中, 系统向着更复杂的状态演化(系统的分维值越高, 则系统越复杂). 在图 1b 中可以看到 AB 段有两次滑坡活动, CD 段也有两次滑坡活动, 而 EG 段有

1) 长江三峡山崩史初探(1985 年)
2) 长江西陵峡岩崩调研工作汇报(1985)

三次滑坡活动，说明滑坡活动的数量越多，分维值的升幅就越大，而最后导致系统越复杂。这一分析表明升维过程是可迭加的，关于分维这一性质尚未见有报导，这里笔者暂称其为“升维迭加性原理”。曲线上(图 1b)的 BC 段和 DE 段两支水平曲线，可视为滑坡在子时期活动后的平稳调整期，即一个滑坡系统的演化历史可以概括为：从简单(分维值低)→平稳过渡(或系统调整)→较复杂(分维值有所升高)→平稳过渡(或系统调整)→复杂(分维值高)的过程。当然系统复杂性的增长不会是无限制的，其终极演化状态当是下一级次的简单系统。例斜坡最终会演化为平地或湖泊或得到人类的整治而达到一种阶段性的稳态。

图 1a 所反映的长江三峡地区滑坡活动历史之分维总体分布特征及阶段性分布特征具有和图 1b 所示垮梁子滑坡类似的规律性，只是在其分维值大幅升幅的过程中(从 CD 段到 DE 段)无平稳调整段存在，正是由于系统来不及很好的调整，故而在下一个子时期(对应于图 1a 曲线 DE 段)发生了更多数量之滑坡，分维值由 1.235 陡升至 3.487，意味着控制系统的序参量增多，系统变得更为复杂。

以上分析表明，如果滑坡在其活动的历史时期内，某一阶段分维值有所升高，尤其是有显著升高时，则有一定数量滑坡发生，故而可以根据某个时期内斜坡系统分维值的变化及其升幅的大小来预测滑坡产生的数量。也就是分维的“升维迭加性”与滑坡数量之间有一定相关关系。

2.1.2 滑坡短期临滑阶段分维特征 以洒勒山滑坡和卧龙寺滑坡为例进行分析。以短期临滑阶段位移监测时序资料为基础，分别取一定时段 ϵ ，选定位移等于某一适当值 N_0 为标准，超过该值时认为滑坡出现显著变形。统计出位移大于 N_0 的时段数 $N(\epsilon)$ ，计算得到两滑坡之 $\lg N(\epsilon) - \lg(1/\epsilon)$ 关系曲线(图 2a)。由图 2 知，洒勒山滑坡在产生大变形前(即 1985 年 6 月以前对应于图中 D 点)曲线上不存在无标度区。D 点之后，曲线呈明显的

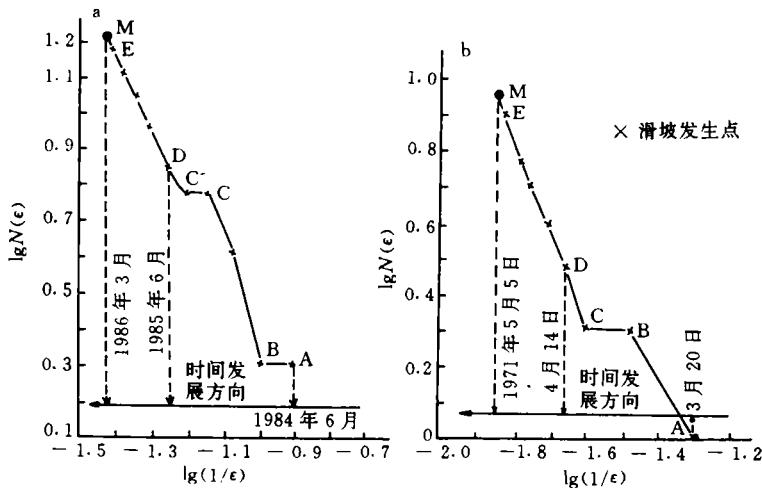


图 2 洒勒山(a)和卧龙寺(b)滑坡短期临滑阶段 $\lg N(\epsilon) - \lg(1/\epsilon)$ 曲线关系

Fig. 2 Related curve of $\lg N(\epsilon) - \lg(1/\epsilon)$ just before the occurrence of Saleshan(a) and Wolongsi(b) landslides

直线段, 显示此时滑坡的分维存在, 其大小为直线段斜率 $D_{DE}=2.130$, 直至 M 点滑坡产生. 卧龙寺滑坡 $\lg N(\varepsilon)-\lg(1/\varepsilon)$ 曲线具有和洒勒山滑坡类似的规律性(图 2b). 所不同的是在大变形前(1971 年 4 月 14 日前, 对应于图中 D 点)曲线上可见一无标度区存在(AB 段). 然而由于 A 点之前位移时序资料欠缺, AB 段是否确为直线段尚无法确定. 曲线在大变形(D 点)之后所显示的无标度区斜率为 $D_{DE}=2.417$, 此即为滑坡分维. 此后斜坡沿直线发展, 直至 M 点滑坡产生.

以上分析表明, 若斜坡在短期临滑阶段不存在显著无标度区, 则将不会面临大滑产生的危险性; 若其发展至有稳定明确的无标度区, 且分维值较高时, 则面临着大滑产生的可能性. 据此, 可以预测滑坡产生的大体时间, 这对于临滑阶段滑坡的预测显然具有重要的意义.

2.2 滑坡的空间分维特征及其规律性

以长江新滩滑坡区为例, 运用分维分析方法对滑坡的空间分维特征进行研究.

将研究区分成若干个大小相等的区域, 统计出危险的小区域数 $N(\varepsilon)$ 与每个区域的无量纲面积 ε 之间的双对数关系, 得到新滩滑坡在未滑前的 1981 年和滑动后的 1985 年之空间分维分别为: 滑前 $D_b=1.644$, 滑后 $D_a=1.3764$ (图 3).

结果表明, 滑坡的空间分布具有分形结构. 又因为滑前分维大于滑后分维, 则说明滑坡的产生伴随着空间分维的降低. 这样就有可能将研究区不同时期之空间分维值求得, 统计其变化趋势特征, 预测该区是否产生滑坡, 同时有可能根据分维降低幅度, 预测滑坡数量和规模.

2.3 关联维数与滑坡预测

关联维数主要用以刻画系统的复杂性特征, 确定系统的维数. 通过关联维数的求法, 可以定量确定描述一个系统的动力学方程组所需的变量个数, 从而预测滑坡的动态. 笔者曾以长江新滩滑坡为例, 通过饱和关联维数与系统相空间数的关系分析, 建立了新滩滑坡非线性动力学方程组, 较成功地预测了该滑坡的动态^[2].

3 讨论

(1) 滑坡时间分维的规律性. 滑坡的时间分维在滑坡活动历史的长时间轴上和短期临滑阶段的短时间轴上的分布具有不同的规律性. 在滑坡活动的长历史时期中, 系统的演化可概括为从简单→平稳调整过渡期→较复杂→平稳调整过渡期→复杂的动态演化过程. 滑坡系统在其动态演化发展的历史长河中具有多重分形特征, 且其分维具有“可选

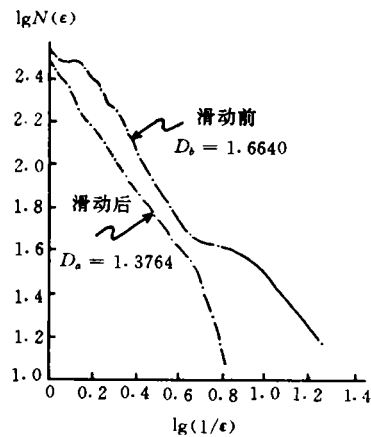


图 3 新滩滑坡发生前后空间分维对比分析图
Fig. 3 Comparising map of spatial fractal dimension around the happened time of Xintan landslide

加性”，据此可预测滑坡的发生时间数量和规模。

(2) 滑坡空间分维的规律性。滑坡的产生伴随着空间分维的降低。但本次研究限于资料尚无法对更多的滑坡实例进行探究，此项工作将在以后进行。洪时中等^[3]对于我国中小地震空间分维的探讨表明了在地震前后空间分维有一个明显的降低。基于地震与滑坡在破裂机理上的相似性，可以认为对于地震空间分维的这一探讨结果在滑坡空间分维的研究上可辅佐证。

参 考 文 献

- 1 李居强, 程光铨. 分形与分维. 成都: 四川教育出版社, 1990. 17~25
- 2 周萃英, 晏同珍, 汤连生. 滑坡灾害系统非线性动力学研究. 长春地质学院学报, 1995, 25(3): 310~316
- 3 洪时中, 洪时明. 地质领域中的分维研究: 水系、地震及其它. 大自然探索, 1988, 7(2): 30~40

Fractal Dimension and Prognosis of Landslide

Tang Liansheng Zhou Cuiying*

Abstract The characteristics of spatial and temporal fractal dimension and their varying regularities of landslides are researched, and an accumulative principle of fractal dimension increase is proposed. Based on the studies of several typical landslides in China, the relationship between fractal dimension and the prognosis of landslides is given out.

Keywords landslide, fractal dimension, prognosis

* Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou 510275