

李珊珊, 李军杰, 杨 龙, 等. 基于分形理论的滑坡空间分布特征研究[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 214–220. [Li Shanshan, Li Junjie, Yang Long, et al. Characteristics of Landslide Spatial Distribution Based on Fractal Theory[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 214–220.]

# 基于分形理论的滑坡空间分布特征研究<sup>\*</sup>

李珊珊<sup>1,2,3,5</sup>, 李军杰<sup>4,5</sup>, 杨 龙<sup>1,2,3</sup>, 苑文颖<sup>1,2,3</sup>, 宫辉力<sup>5,6</sup>

(1. 北京市环境保护科学研究院, 北京 100037; 2. 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 国家环境保护工业废水污染控制工程技术(北京)中心, 北京 100037; 4. 河南城建学院, 河南 平顶山 467000; 5. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 6. 城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048)

**摘 要:**以“汶川地震”极端事件为时间分段点, 基于 ArcGIS 网格法定量分析汶川地震重灾区滑坡空间分布的分形分维特征, 得出汶川地震重灾区滑坡在震前和震后均具有分形特征。研究表明, 汶川地震重灾区滑坡点的空间分布具有统计意义上的自相似结构, 无特征尺度。基于分形理论的汶川地震重灾区滑坡空间分布特征分析为进一步研究滑坡的敏感性、危险性及滑坡风险预警奠定了重要的理论基础和前提。

**关键词:**分形; 分维; 汶川地震; 滑坡; 空间分布

**中图分类号:** P931.91; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2014)01–0214–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.01.038

滑坡是随着外界环境变化的复杂动态系统。随着滑坡活动次数的不断增加, 滑坡空间分布特征在二维平面上表现为一不规则的复杂图像, 但其往往具有统计意义上的自相似性<sup>[1]</sup>。

1967年, Mandelbrot (B. B. Mandelbrot) 在美国权威的《科学》杂志上发表了《英国的海岸线有多长?》<sup>[2]</sup>的论文, 标志着分形概念的产生。1975年, 他创立了分形几何学(fractal geometry), 并在此基础上, 形成了研究分形性质及应用的科学, 成为分形理论(fractal theory)。滑坡与分形有着密切联系, 滑坡的发生随着其时空分维, 关联维降低<sup>[3]</sup>。对滑坡空间分布特征进行分形研究, 不仅可以揭示滑坡的分形现象和特征, 而且能够为滑坡的发生、发展和预测提供重要的方法和手段<sup>[4]</sup>。分形理论在探索滑坡空间分布的复杂性, 或更确切地说, 在探索滑坡空间分布特征上的自相似性中展现出巨大的潜能。

李长江等<sup>[5]</sup>提出一种基于分形统计的滑坡敏感性(易发程度)评价方法, 该方法使用已有的滑坡编录数据, 通过分形统计获得研究区滑

坡空间分布的分形丛集关系, 再通过 GIS 的空间操作与分析生成滑坡敏感性区划图。朱晓华<sup>[6]</sup>对中国大陆地区滑坡与泥石流等地质灾害的分形特征进行研究, 通过分析发现, 滑坡与泥石流等地质灾害的空间维数值在我国三大自然区呈现的变化规律显然具有内在原因。滑坡、泥石流主要集中在东部季风区与青藏高原区的交界地带, 受水文、地形、构造等条件组合的影响, 该区域滑坡发生较为频繁, 从而导致该区域滑坡与泥石流空间维数值相对较大。易顺民等<sup>[7]</sup>采用信息维和容量维分析了滑坡活动的时间和空间分维特征, 明确指出滑坡的分维值越低, 滑坡活动自组织程度越低; 而分维值越高, 滑坡活动自组织程度越高。

分形分维理论在滑坡领域的应用研究已经取得了一系列的成果, 不仅揭示了滑坡的分形现象和特征, 而且尝试应用该理论对滑坡的发生、发展和预测进行研究。但还是有一些尚待深入探讨的问题<sup>[8]</sup>, 比如, 滑坡在什么情况下才具有分形特征? 不同类型滑坡的无标度区和分维值是否存

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013–06–23 修回日期: 2013–08–15

基金项目: 国家自然科学基金基金项目(41071074); 国家自然科学基金青年基金项目(NSFC 40901227); 国家科技支撑项目(2008BAK49B07)

作者简介: 李珊珊(1983–), 女, 山东烟台人, 博士, 助理研究员, 主要从事资源环境遥感等方面的研究。

E-mail: lishanshan@cee.cn; 154249704@qq.com.

通讯作者: 宫辉力(1956–), 男, 山东人, 教授, 博士生导师, 主要从事信息水文地质等方面的研究。

E-mail: gonghl@263.net

在数量上的关联性、时空上的连续性? 滑坡分形特征的成因和机制等。

网格法在分形分析中应用非常广泛, 但是传统的手工操作不仅费时费力, 而且分析结果的精度也不高。鉴于此缺陷, 应用计算机手段来进行网格法的应用势在必行。赵锐等<sup>[9]</sup>曾基于网格法设计了一种分维计算方法, 其操作过程是将地图经过照相缩小, 然后扫描成图像或是通过数字化过程成图, 对图形的处理则是要经过线性拉伸等技术过程, 然后在提取出被研究对象的基础上再用不同边长的正方形网格去覆盖被研究对象。该方法操作复杂, 且在不同次的重复操作过程中无法保证取得相同的数据与相同的精度。朱晓华引入 MapInfo 和 ArcView GIS 软件, 将 GIS 在线体网格分形分析中进行了具体的应用<sup>[6]</sup>。

1 研究区和数据

1.1 研究区范围

本文依据灾害范围评估原则, 构建了综合灾情指数选择研究区。综合灾情指数( DI) 是由因灾造成的死亡和失踪、房屋倒塌、转移安置、地震烈度和地质灾害危险度计算生成。

$$DI = \sum (fk \times DIk), \tag{1}$$

式中: 为归一化单项指标;  $DIk = [DIk - \min(DIk)] / [\max(DIk) - \min(DIk)]$ ;  $fk$  为上述五项指标的权重<sup>[10]</sup>。

本文选取综合灾情指数大于 0.15 的极重灾区和重灾区作为研究区(表 1)。

表 1 研究区范围及其综合灾情指数

研究区	综合灾情指数	分级	县(市、区)
汶川地震重灾区	> 0.4	极重灾区	汶川、北川、什邡、绵竹、青川、茂县、都江堰、彭州、安县、平武
	0.15 ~ 0.4	重灾区	理县、江油

1.2 数据获取

描述汶川地震重灾区滑坡涉及的数据类型种类多、空间分布面广、涵盖面大、时间跨度长, 其数据有遥感、地质、地形、气候、文献资料等多方位的数字信息, 与之相应的还有大量的滑坡实地考察资料、相片和大幅面环境背景图片, 数据涉及不同的空间尺度、坐标体系、存储介质等问题, 这些数据具有异源性、数据结构的复杂性等特点<sup>[11]</sup>。

1.2.1 滑坡点数据

震前滑坡点数据来源于滑坡编录数据, 滑坡编录数据主要来源于地面调查和地方上报数据

(中国地质环境监测院、中国国土资源航空物探遥感中心、民政部国家减灾中心)。震后滑坡点数据来源于震后高分辨率遥感影像解译。首先, 要对影像进行预处理, 主要包括几何精校正与配准、图像切割、遥感影像的信息增强等过程, 为解决多源异构数据的复杂性问题, 统一处理后的地理坐标系统为 GCS\_ WGS\_ 1984, 投影坐标系统为 WGS\_ 1984\_ UTM\_ Zone\_ 48N。然后, 对遥感数据进行解译。最后, 依据实地调查数据和地方上报数据进行滑坡室内解译数据的校正。

1.2.2 高分辨率遥感影像数据

“减灾合作宪章”(CHARTER 机制) 如图 1 所示, 是 1999 年联合国召开的第三次和平利用外层空间会议之后, 由欧空局和加拿大航天局发起建立的一个合作机制。它的运作特点是: 利用有关国家的天基卫星资源, 根据受灾国授权用户的请求, 在重大灾害的前提下, 于灾害发生期间, 根据该合作机制的技术判断, 无偿提供部分必需的数据支持, 以协助受灾国对灾害进行监测和评估。

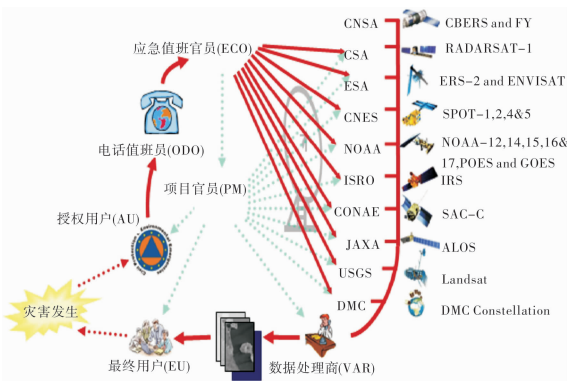


图 1 国际减灾宪章(CHARTER 机制)

汶川地震发生后, 国家减灾委通过空间与重大灾害国际宪章(CHARTER 机制) 和国内卫星遥感数据共享机制获取的遥感数据<sup>[10]</sup>, 包括 SPOT-5、EROS-B、ALOS、QuickBird、TerraSAR、资源二号、福卫二号等多种灾后高分辨率影像, 震后滑坡信息提取的影像(表 2)。

2 研究方法

2.1 技术路线

本文采用网格法对汶川地震重灾区滑坡空间分布数据进行空间常维分形分析, 基于 ArcGIS 的网格法能够定量分析汶川地震重灾区滑坡空间分布的分形分维特征, 并以“汶川地震”极端事件为时间

分段点,对比分析震前震后汶川地震重灾区滑坡空间分布特征。本文的技术路线图(图2)。

表 2 研究区震后高分辨率遥感影像数据一览表

名称	国别	空间分辨率/m	成像日期	数量/景
ALOS	日本	2.5	2008-05-18	3
CBERS-02B	中国	2.36, 20, 258	2008-11-09	1
EROS-B	以色列	0.7	2008-05-15	3
			2008-05-16	4
			2008-05-14	5
QuickBird	美国	0.61	2008-05-15	2
			2008-05-16	2
SPOT-5	法国	2.5	2008-05-16	7
TerraSAR	德国	1, 3, 16	2008-05-19	11
福卫二号 PAN	中国台湾	2.0	2008-05-19	2
航空遥感	中国	0.5	2008-05-17	1
无人机数据	中国	0.4	2008-05-15	107
资源二号 HR	中国	2.4	2008-05-16	1

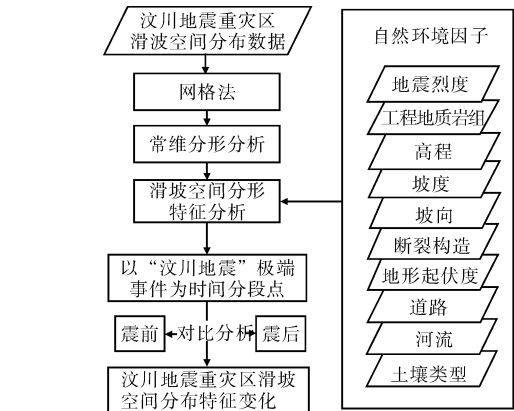


图2 本文的技术路线图

2.2 网格法分形基本流程

一群点与其他点有着极为邻近的联系,称为丛集<sup>[12]</sup>。丛集的度量是一个点事件发生在时间或空间间隔中的概率。对于具有自相似性的丛集分布,在无标度区内,所有事件之间是有某种相互关联的,而对于随机分布,所有事件的发生完全是不相关的。本文采用网格法分析汶川地震重灾区滑坡在空间上的分形丛集分布特征(图3)。

2.3 分形的计算方法

1975年,曼德尔布罗特(B. B. Mandelbrot)发表了专著《分形:形态、机遇和维数》,标志着分形几何学的诞生<sup>[13]</sup>。分形(Fractal)理论认为分形最突出的特点是无特征尺度。当然,这种自相似的形式不是完全数学意义上的,它承认有小概率的非自相似性的存在,是统计意义上的。当然,自然界的事物

和现象往往表现出复杂的形态,并不像数学分形中

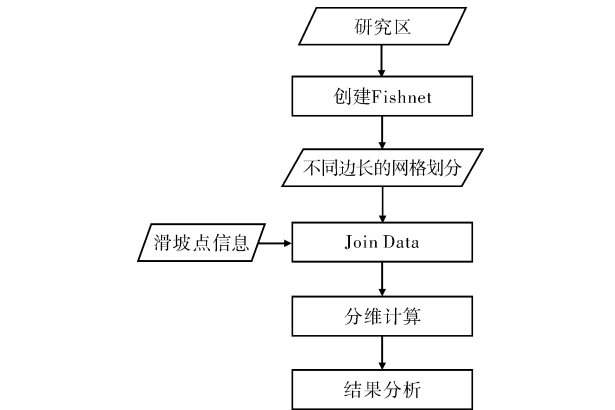


图3 基于 ArcGIS 的网格法分形计算流程图

所显示的那样理想化。分形描述一种更符合现实的分布,它承认现实是混乱和复杂的。分形认为的不确定性并不等于随机性,分形的自相似性常常以统计方式表示出来,即当改变尺度时,在该尺度包含的统计学的特征与整体是相似的。这种分形是数学分形的一种推广,叫做统计分形。

曼德尔布罗特经研究发现海岸线长度与测量尺子长度之间的关系存在如式(2)所表示的关系<sup>[2]</sup>:

$$L = Mr^{1-D}.$$
 (2)

式中: $L$ 为海岸线长度; $r$ 为测量尺子的长度; $M$ 为待定常数; $D$ 为分形维数。

如果设 $P(r)$ 是描述统计特征的基本参数,那么自相似性要求:

$$P(br) \sim P(r)G(b).$$
 (3)

式中: $b$ 是一变换系数,为常数; $G(b)$ 是与 $r$ 无关的,并且只与 $b$ 有关的函数。

著名数学家 Cauchy 曾专门研究四类方程:

$$\begin{cases} (a)f(x+y) = f(x) + f(y); \\ (b)f(x+y) = f(x)f(y); \\ (c)f(xy) = f(x) + f(y); \\ (d)f(xy) = f(x) \cdot f(y). \end{cases}$$
 (4)

1821年,Cauchy证明了满足上述方程的函数形式<sup>[16]</sup>是:

$$\begin{cases} (a)f(x) = cy(c \text{ 是常数}); \\ (b)f(x) = e^{cx}; \\ (c)f(x) = c\lg x; \\ (d)f(x) = x^c. \end{cases}$$
 (5)

显然,满足上式的只可能是幂函数,即

$$P(r) \sim r^{-D}.$$
 (6)

考虑到超越概率函数 $P(r) \leq 1$ ,所以幂指数取负号。当 $r$ 变换成 $br$ 时

$$P(br) \sim r^{-D}b^{-D}, \tag{7}$$

即在尺度变换时, 分形集合的统计特征是不变的。

这种幂指数形式的超越概率函数所表达的统计特征, 在统计分形中起着十分重要的作用。在处理各种实际问题时, 可以使用事件  $\varepsilon$  出现的频度近似地替代超越率函数。若  $N(\geq r)$  是线度大于或等于  $r$  的事件或集合的数目, 则统计分形要求下式成立:

$$N(\geq r) = \frac{C}{r^D}. \tag{8}$$

式中:  $C$  是常数;  $D$  为分形集合的分维值。作为自然现象的一种统计描述, 它的应用具有近似的意义。

2.3.1 常维分形计算

网格法 (Box-Counting Method) 是以网格为单元, 反映对象特征的一种地图表示方法。网眼大小的确定, 取决于制图目的、比例尺和掌握制图资料的详细程度等。网格法可以用来表示制图对象的数量特征, 网格法也是分形研究中最常用的常维分形计算方法<sup>[14]</sup>。假设用边长为  $r$  (拓扑维为  $d$ ) 的小盒子覆盖分形图形, 则分形内部会有各种层次的空洞, 分形图形不可能完全被覆盖。其中, 有些小盒子会是空的, 有些小盒子会覆盖分形图形的一部分, 如果将非空 (non-empty) 盒子计数为  $N(r)$ 。缩小盒子的尺寸  $r$ , 再次覆盖分形图形, 所得  $N(r)$  自然较之前会增大。当  $r \rightarrow 0$  时, 得到网格法定义的分维:

$$D_0 = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\lg N(r)}{\lg r}. \tag{9}$$

而在实际应用中只能取有限的  $r$  值。通常做法是首先统计一系列的  $r$  和  $N(r)$ , 然后根据双对数坐标中的  $\lg N - \lg r$  的直线斜率来求取  $D_0$ 。

格网法的实质就是通过改变分形的粗视化程度 (Successive Coarsening) 来获得其容量维的过程。网格法概念清楚, 但是并不实用, 通常情况下, 只有当分维数小于 2 或在 2 附近时, 计算量较小。当空间维数增加时, 计算量也随之迅速上升。

对于点状的地理要素, 如滑坡、地震灾害点等, 可以采用格网法来分析其分形分维特征 (通常分维值低于二维)。其基本思路是使用不同边长的正方形去覆盖被测点状对象。如果正方形网格边长  $r$  出现变化时, 那么覆盖有被测点状对象的网格数目  $N(r)$  也必然会出现相应地变化。如果有:

$$N(r) = r^{-D} \tag{10}$$

成立, 则定义了一个分形分布, 或者说被研究对象在一定标度域内具有分形分维的结构特征。本文主

要基于网格法来分析汶川地震重灾区滑坡点的空间分形分维特征。

2.3.2 变维分形计算

如  $D$  为常数的分形, 由于在双对数坐标上是一条直线, 称为常维分形, 但是如果双对数坐标是非直线的函数关系, 那么常维分形就无法处理。付昱华<sup>[15]</sup> 证明, 对于任一函数关系, 经过一定的变换, 均可转化为常维分形的形式。然而在实际应用中, 常常只是给出一些数据点, 函数关系如果是未知的, 那么变换的具体形式也就无法求出。

在这种情况下, 可以对原始数据实行累积和的系列变换, 使得变换后的数据序列转化成常维分形的形式。具体的流程如下所述:

(1) 将原始数据点  $(N_i, r_i) (i = 1 \sim n)$  绘制于双对数坐标上, 一般情况下该组数列不能与直线拟合良好, 于是将  $N_i$  排成一个基本序列, 即有:

$$\{N_i\} = \{N_1, N_2, N_3, \dots\}. \tag{11}$$

其他的序列均可以根据基本序列构造。如构造一阶累积和序列  $S1$ , 其中  $S1_1 = N_1, S1_2 = N_1 + N_2, S1_3 = N_1 + N_2 + N_3$  等等, 依此类推可构造二阶、三阶累积和, 即有:

$$\begin{cases} \{S1_i\} = \{N_1, N_1 + N_2, N_1 + N_2 + N_3, \dots\}, (i = 1, 2, \dots, n); \\ \{S2_i\} = \{S1_1, S1_1 + S1_2, S1_1 + S1_2 + S1_3, \dots\}, (i = 1, 2, \dots, n); \\ \{S3_i\} = \{S2_1, S2_1 + S2_2, S2_1 + S2_2 + S2_3, \dots\}, (i = 1, 2, \dots, n). \end{cases} \tag{12}$$

(2) 建立各阶累计和的分段变维分形模型。以一阶累计和为例, 将数据点  $(S1_i, r_i) (i = 1 \sim n)$  绘制于双对数坐标上, 用首尾相接的分段折线将全部数据点依此相连, 即得分段变维的分形模型;

(3) 选择效果最好的变换, 并确定其相应的常维分形参数。通常情况, 由若干数据点构成的分段变维分形模型, 如果其各段直线的分维数相差在 5% 左右, 则可以认为这些数据点与一条直线拟合良好。

2.3.3 GIS 在分形计算中的应用

本文将介绍基于 ArcGIS 对矢量数据强大的操作能力, 提出针对点状要素的基于 ArcGIS 的网格法分析计算流程<sup>[16]</sup>。在网格法计算中, 有两个关键步骤: ①生成覆盖研究对象的不同边长的正方形网格; ②判断每个网格内是否包含有点状地理要素。

基于 ArcGIS 平台, 可以较为方便地完成上述两个步骤, 而且精度可以得到保证。

(1) 基于 ArcGIS 的“Create Fishnet”功能, 创建覆盖研究对象的正方形网格, 通过设置“Cell Size

Width”和“Cell Size Height”等参数,可以实现对网格边长的设置。

(2)基于 ArcGIS 的“Join Data”功能,可以方便地判断每个网格内是否包含有点状地理要素。

3 分析及结果验证

本文基于汶川地震重灾区滑坡点空间分布数据(图4),基于样方分析的方法对研究区内滑坡点的空间模式进行分析,进而确定研究区滑坡点的空间分布特征。

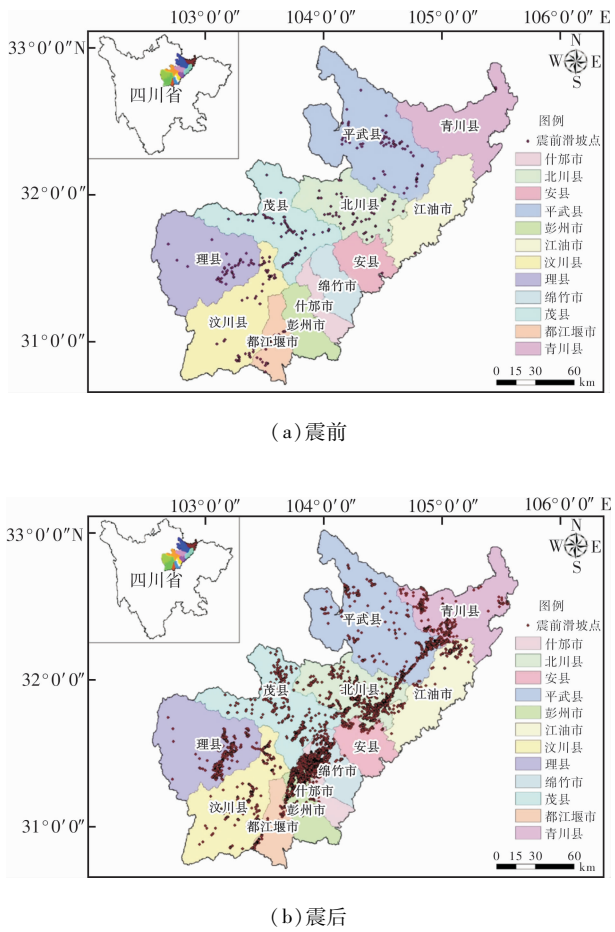


图4 汶川地震重灾区滑坡点空间分布图

3.1 分析流程

对已知空间分布的滑坡点,在不考虑单个滑坡之间在体积和滑动面深度上的差异,即把滑坡视为空间上的一个点集时,将研究区域划分成边长为  $r$  的若干正方形单元进行统计。通常是从数大格子开始,依次减小格子的尺度。当  $r$  不同时,分别统计出有滑坡的格子  $N(r)$ ,即只计算那些含滑坡的格子数。 $N(r)$  显然与  $r$  有关。当  $r$  足够小时,则所需最少格子数  $N(r)$  与  $r$  之间满足下式的定义:

$$N(r) = \propto r^{-D}; \tag{13}$$

或

$$\lg N(r) = \lg C - D \lg r. \tag{14}$$

式中: $D$  为分维数; $C$  为比例常数。以  $N(r)$  与  $r$  作双对数坐标图,其直线部分的斜率即为式中的  $D$ 。

基于汶川地震重灾区震前和震后的滑坡点形成滑坡空间分布图,应用网格法分析研究区滑坡点的分形分维特征。

基于研究区面积  $S$  和研究区内的滑坡点数目  $N$ ,按照式(15)确定样方的大小  $X$ 。

$$X = \text{sqrt}[\{2 \times (S/N)\}]. \tag{15}$$

首先,根据研究区的位置和样方大小,应用 ArcGIS 的 Create Fishnet 功能创建样方,在确定样本的基础上,基于 ArcGIS 的空间选择功能统计每个样方内点的数量和频率。分别以  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ ,  $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ , ...,  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$  的网格覆盖研究区,如图5所示。分别统计不同系列网格覆盖下有滑坡点的栅格数目,如表3所示。

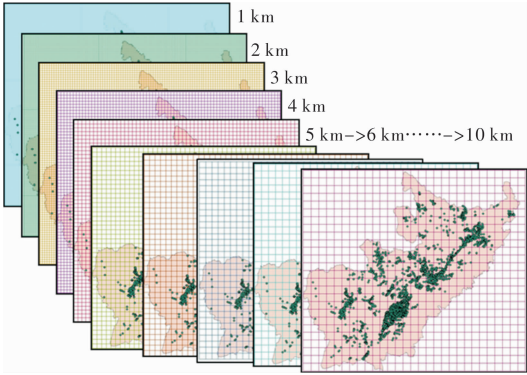


图5 计算分形维数的网格法示意图

表3 震前震后不同网格覆盖下滑坡点的栅格数目统计表

格网大小/km	栅格总数/个	无滑坡点栅格数				有滑坡点栅格数	
		震前	震后	震前	震后	震前	震后
1	77 964	77 672	75 984	292	1 980		
2	19 418	19 165	18 246	253	1 172		
3	8 633	8 404	7 826	229	807		
4	4 818	4 628	4 209	190	609		
5	3 074	2 909	2 588	165	486		
6	2 112	1 962	1 718	150	394		
7	1 558	1 427	1 230	131	328		
8	1 188	1 070	910	118	278		
9	928	816	681	112	247		
10	754	657	538	97	216		

然后,震前和震后分别以栅格大小  $r$  和不同系列栅格覆盖下有滑坡点的栅格数目  $N(r)$  做图(图6)。

将图6中的横纵坐标均取对数,得到以对数表示的汶川地震重灾区震前和震后的滑坡分形从



集分布特征曲线图(图 7)。

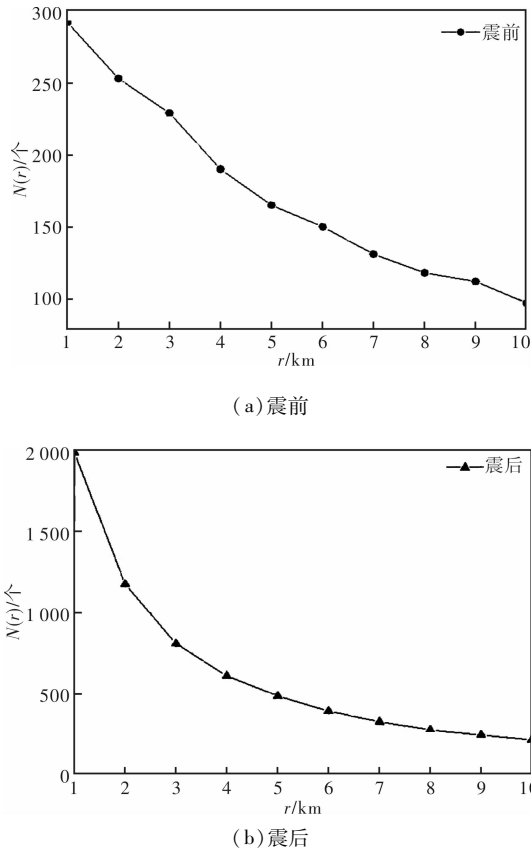


图6 汶川地震重灾区震前和震后不同栅格大小和其系列栅格覆盖下有滑坡点的栅格数目对应图

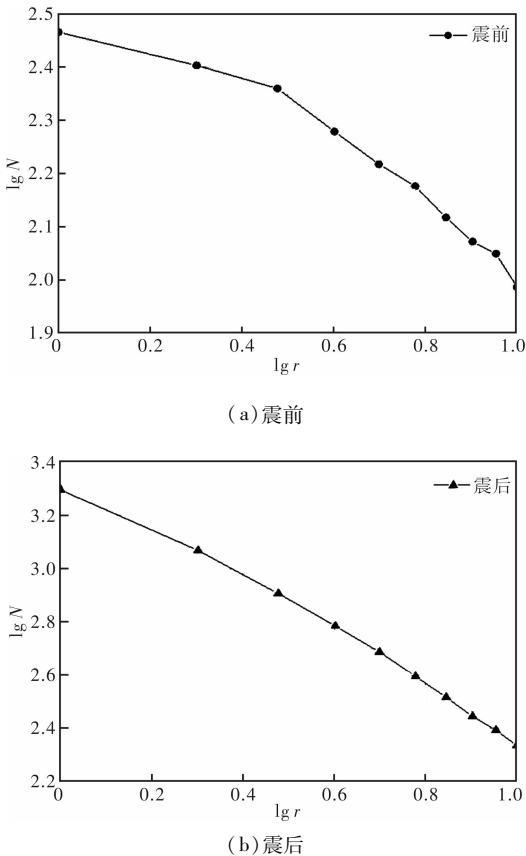


图7 汶川地震重灾区震前和震后滑坡的分形丛集分布特征曲线图

基于科学计算软件 Matlab, 分别对  $Igr$  和  $IgN$  之间的关系进行拟合, 得到拟合公式及其相关性系数如表 4 所示。

表 4 震前和震后滑坡的拟合公式及其相关系数表

分类	拟合公式	R-Square
震前	$IgN = 2.533 - 0.498 \times Igr$	0.934
震后	$IgN = 3.344 - 0.978 \times Igr$	0.992

通过分析计算可知, 汶川地震重灾区震前和震后滑坡在无标度区 1 ~ 10 km 具有分形特征, 分形维数分别为 0.498 和 0.978。震后的分维数明显高于震前, 说明震后的滑坡分形丛集性较震前更为明显。

3.2 结果分析

汶川地震重灾区的滑坡点无论是震前还是震后在 1 ~ 10 km 内均具有分形丛集性质, 说明汶川地震重灾区的滑坡在 1 ~ 10 km 范围内并非彼此毫不相干的孤立事件, 而是具有相互联系的丛集分布特征, 无标度区间亦即滑坡丛集分布的尺度范围。

研究区内滑坡空间分布的分形丛集特征是研究区内各种自然环境因子(地形地貌、工程地质岩组、断裂构造、河流等)与诱发因素共同作用的结果, 滑坡的空间分布数据本身就隐含有各种相关的信息。根据这一关系式, 根据区域滑坡敏感性分析的原则, 即“过去曾经发生过滑坡的地区在未来也有可能发生滑坡, 即可以基于历史和现实资料预测未来滑坡的发展趋势和过程”, 可以仅仅依靠滑坡空间分布数据对研究区进行滑坡敏感性分析。

4 结论与讨论

本文基于分形分维理论对汶川地震重灾区滑坡的空间分布特征进行研究。主要的研究成果包括: 基于网格法对汶川地震重灾区震前和震后的滑坡空间分布特征进行分析。研究表明, 汶川地震重灾区区内滑坡点无论在震前还是震后, 均具有统计自相似的特征, 在无标度区 1 ~ 10 km 具有分形特征, 分形维数分别为 0.498 和 0.978。计算结果可作为汶川地震重灾区滑坡敏感性分析的依据。震后的分维数明显高于震前, 说明震后的滑坡分形丛集性较震前更为明显。

但同时, 基于分形理论的滑坡空间分布特征

分析方法也存在缺点：通过网格法分析发现，汶川地震重灾区内的滑坡在空间上呈现集聚分布的趋势。但是，由于样方划定后，人为地割裂了样方滑坡点之间的空间关系，不能真实地反映研究区内的滑坡点之间的空间关系，也无法反映滑坡点在空间上的自相似性<sup>[17]</sup>。

参考文献：

[1] 王华斌. 滑坡灾害系统非线性研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3) : 271 – 276.

[2] Mandelbrot, B. B. How long is the coast of britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 156(3775) : 636 – 638.

[3] 易顺民, 唐辉明. 滑坡分维特征及其预测意义[J]. 工程地质学报, 1994, 2(2) : 48 – 53.

[4] 周寅康, 张捷, 王腊春, 等. 分形论与自然灾害的研究——地震、洪涝灾害中的分形研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(4) : 9 – 15.

[5] 李长江, 麻土华, 李炜, 等. 滑坡频度——降雨量的分形关系[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(1) : 87 – 93.

[6] 朱晓华. 中国主要地貌与地质灾害的空间分维及其关系研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2002.

[7] 易顺民, 张首丽. 滑坡活动时空结构的信息维特征及其工程地质意义[J]. 水文地质工程地质, 1998(5) : 48 – 51.

[8] 朱晓华. 地理空间信息的分形与分维[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.

[9] 赵锐, 赵宏. 地理现象的分形研究[J]. 地理科学, 1994, 11(1) : 9 – 15.

[10] 国家减灾委——科技部抗震救灾专家组. 汶川地震灾害综合分析评估[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[11] 刘应辉. 汶川地震区都汶公路沿线崩塌滑坡灾害特征与评价[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.

[12] Turcotte DL. Fractal and chaos in geology and geophysics[M]. Pergamon; Pergamon Press, 1992.

[13] Mandelbrot B B. Fractals: Form, chance and dimension[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Com pany, 1977.

[14] 陈颢, 陈凌. 分形几何学[M]. 北京: 地震出版社, 2005.

[15] 付显华. 变换形成的分形与海洋环境数据分析预测[J]. 海洋通报, 2000, 19(1) : 79 – 87.

[16] 王志恒. 基于 GIS 的四川省低山丘陵区滑坡危险性评价研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2011.

[17] 李珊珊. 汶川地震重灾区滑坡空间分布特征分布及危险性研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2012.

Characteristics of Landslide Spatial Distribution  
Based on Fractal Theory

Li Shanshan<sup>1, 2, 3, 5</sup>, Li Junjie<sup>4, 5</sup>, Yang Long<sup>1, 2, 3</sup>, Yuan Wenying<sup>1, 2, 3</sup> and Gong Huili<sup>5, 6</sup>

- (1. *Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China*;  
2. *National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China*;  
3. *State Environmental Protection Engineering (Beijing) Center for Industrial Wastewater Pollution Control, Beijing 100037, China*; 4. *Henan Urban Construction Institute, Pingdingshan 467000, China*; 5. *College of Resources Environment and Tourism Capital Normal University, Beijing 100048, China*; 6. *State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation, Beijing 100048, China*)

**Abstract:** By taking Wenchuan Earthquake as the segmentation point, and based on ArcGIS grid-based method, fractal dimension characteristics of the landslides spatial distribution in the study area are quantitatively analyzed. The results confirm the fractal characteristics of landslide in the study area before and after the earthquake. Research shows that: the landslide point spatial distribution of Wenchuan Earthquake heavy disaster area is of self-similar structure and of none characteristic scale. The landslide distribution characteristics analysis on Wenchuan Earthquake heavy area based on fractal theory provides an important foundation and prerequisite for the further study of landslide sensitivity, landslide hazard and landslide risk warning.

**Key words:** fractal; fractional dimension; Wenchuan Earthquake; landslide; spatial distribution