

# 地形等高线的分形特征及其动力学含义

李 锰, 朱令人

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**以天山地区不同地貌类型的地形等高线为研究对象,用尺度法探讨了它们的分形特征.结果表明:在0.1至200 km的标度范围内,不同地貌类型等高线具有不同的分形特点,而且与标度有关.陆地表面地形等高线分维值与地貌侵蚀作用和不均匀堆积作用的强度密切相关,可作为地貌学研究中一个重要参数.

**关键词:**地形等高线;地貌;分形;分维;侵蚀作用

**中图分类号:** P931.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-0844(2002)02-0097-07

## 0 引言

一门学科的发展水平,很大程度上取决于它对事物的定量化描述水平.分形几何学作为描述自然界复杂现象的一种有力工具,已在许多学科得到了广泛应用.分形几何学的主要价值在于,它在极端有序和真正混沌之间提供了一种可能性.它最显著的特点是:本来看起来十分复杂的事物,事实上大多数可用仅含有很少参数的简单公式来描述<sup>[1]</sup>.地球表面除了大约占总面积70%的洋面以外,陆地表面是很粗糙和不规则的.分形思想正是来源于地貌学,并在地貌学的土壤中成长壮大<sup>[3,4]</sup>.Mandelbrot(1967)用百万分之一的地形图研究了英国海岸线的分维<sup>[5]</sup>.我们可以用类似的方法对地形图上任何高程的等高线进行分维分析<sup>[6]</sup>.地质学家的研究表明,陆地表面的复杂形状是长期地质构造运动和至今还在进行的侵蚀作用的结果.那末,能否由等高线形状的复杂性推断产生这种复杂形状的过程呢?显然分形地貌学不应是分形与地貌二者简单地相加,甚至只是后者对前者的套用,而应该认真研讨它的概念、方法与地貌现象的联系<sup>[7]</sup>.本文正是基于这一出发点来研究不同地貌类型等高线的分形特征及其与内外力地质作用之间的关系.

## 1 资料与方法

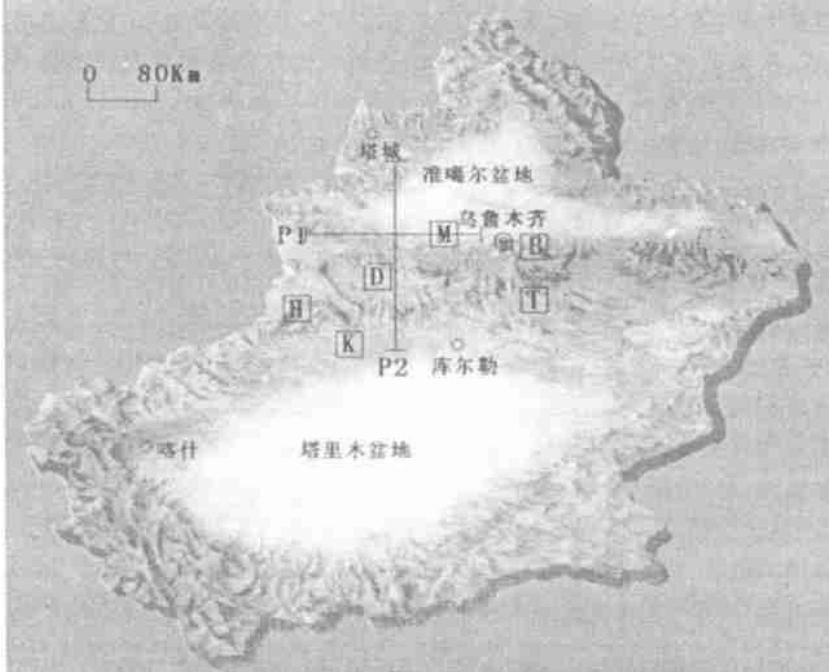
以新疆天山地区为例,选择了3种不同地貌类型,即强烈隆起区(高山区)、弱一中等隆起区(中低山区)和沉积凹陷区(盆地).其中每种地貌类型包含了两个地质和地理条件有一定差异的研究区,共计6个研究区.高山区为博格达山和哈尔克山;中低山区为玛纳斯县城以南的天山北缘最新隆起区和库车县城以北的天山南缘最新隆起区;沉积凹陷区为天山内部的大尤鲁都斯山间盆地和博格达山以南的吐鲁番盆地.依次用B、H、M、K、D、T区表示(图1).以

收稿日期: 2001-09-10

基金项目: 新疆地震科学基金项目(200007)部分成果.

作者简介: 李锰(1965-),男(汉族),河南淮滨人,副研究员,博士生,主要从事地震地质与工程地震研究.

1:5万地形图为底图,在每一个研究区分别选取6条不同海拔高程的等高线,测量了它们在0.1~10 km 标度下的尺度数量.为了进一步研究上述不同地貌类型在更大标度下的分形特征,在1:100万地形图上又追踪测量了部分等高线在5~200 km 标度范围内的标度特征.尺度法是分形测量中常用的方法,其实质就是改变粗视化程度.在上述两种比例尺的地形图上,以不同开度( $r$ )的两角规重复测量每一条等高线所包含的相应尺度的个数( $N(r)$ ),然后在双对数坐标图上进行回归得到离散点据的斜率,其相反数即为分维值.其中在1:5万地形图上所用的标度是0.1、0.2、0.3、0.5、0.75、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0、8.0、10 km;在1:100万图上是5、10、15、20、25、30、40、50、70、100、120、150、200 km.



B 博格达山; H 哈尔克山; M 玛纳斯隆起;  
K 库车隆起; D 大尤鲁都斯盆地; T 吐鲁番盆地

图1 新疆地貌略图及研究区位置分布示意图

Fig. 1 Landscape sketch of Xinjiang and distribution of studying areas.

## 2 结果与分析

表1是3种地貌类型6个研究区共36条等高线在0.1~10 km 标度下的分维值及其相关参数;表2是追踪上述6个研究区部分等高线在5~200 km 标度下的分维值及相关参数.地形等高线在0.1~10 km 和5~200 km 标度范围内的双对数标度图上显示出很好的线性关系,相关系数均在99%以上,由此说明地形等高线具有统计分形性质.

在0.1~10 km 标度下,由表征等高线小标度局域特性的分维值(表1)不难看出:不同地貌类型的平均分维值显示出中低山区>高山区>沉积盆地的特点.位于天山南部的3个研究区(K区、H区、T区)的等高线的平均分维值均明显低于位于天山中北部的相应地貌区(M区、B区、D区).其中吐鲁番盆地的平均分维值趋近于1.

在5~200 km 标度下,表征等高线大标度下局部特性的分维值(表2)情形相对复杂一些.但总体上随着各研究区沉降与隆起幅度的不同,等高线分维值呈上升的特点,即高山区>中低

山区>沉积盆地区. 另外, 与小标度下的相应等高线分维值相比, 总体都有不同程度的下降. 下降最显著的是天山南北缘的2个最新隆起区 M区(1 000 m)和 K区(1 600 m), 最大分别下降0.211和0.141; 唯有哈尔克山的2条等高线的分维值明显升高, 最大(4 000 m)升幅可达0.28; 盆地则相对稳定.

表1 不同地貌类型等高线分维值计算结果(标度范围0.1~10 km)

| 研究区   | 参 数                          |         |       |        |       | 备注                                   |
|-------|------------------------------|---------|-------|--------|-------|--------------------------------------|
|       | 范围                           | 等高线标高/m | 分维值   | 相关系数/% | 平均分维值 |                                      |
| 高山区   | 哈<br>尔<br>克<br>山<br>(H)      | 3 000   | 1.257 | 99.7   | 1.190 | 南天山西段强烈隆起区, 上新世以来最大隆起幅度达5 000 m      |
|       |                              | 3 500   | 1.192 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 3 800   | 1.152 | 99.6   |       |                                      |
|       |                              | 4 000   | 1.138 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 4 500   | 1.188 | 99.7   |       |                                      |
|       | 5 000                        | 1.120   | 99.6  |        |       |                                      |
|       | 博<br>格<br>达<br>山<br>(B)      | 2 600   | 1.286 | 99.8   | 1.286 | 东天山强烈隆起剥蚀区, 上新世以来隆起幅度达4 000 m        |
|       |                              | 3 000   | 1.273 | 99.3   |       |                                      |
|       |                              | 3 500   | 1.270 | 99.8   |       |                                      |
|       |                              | 4 000   | 1.314 | 99.7   |       |                                      |
| 4 400 |                              | 1.292   | 99.3  |        |       |                                      |
| 4 400 | 1.283                        | 99.3    |       |        |       |                                      |
| 中山区   | 库<br>车<br>北<br>(K)           | 1 400   | 1.371 | 99.9   | 1.301 | 天山南缘新生代隆起剥蚀区, 隆起幅度可达数百米              |
|       |                              | 1 600   | 1.334 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 1 800   | 1.337 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 1 900   | 1.276 | 99.8   |       |                                      |
|       |                              | 2 000   | 1.212 | 99.9   |       |                                      |
|       | 2 200                        | 1.276   | 99.8  |        |       |                                      |
|       | 玛<br>纳<br>斯<br>南<br>(M)      | 800     | 1.475 | 99.5   | 1.390 | 天山北缘新生代隆起区, 第四纪以来隆起幅度可达270 m         |
|       |                              | 1 000   | 1.397 | 99.7   |       |                                      |
|       |                              | 1 200   | 1.377 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 1 400   | 1.332 | 99.7   |       |                                      |
| 1 800 |                              | 1.383   | 99.5  |        |       |                                      |
| 2 000 | 1.381                        | 99.1    |       |        |       |                                      |
| 盆地    | 吐<br>鲁<br>番<br>(T)           | -150    | 1.065 | 99.9   | 1.064 | 新生代凹陷区, 凹陷幅度为1 200 m, 其中第四纪约为1 000 m |
|       |                              | -100    | 1.055 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 0       | 1.053 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 50      | 1.069 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 100     | 1.060 | 99.9   |       |                                      |
|       | 200                          | 1.092   | 99.7  |        |       |                                      |
|       | 大<br>尤<br>鲁<br>都<br>斯<br>(T) | 2 400   | 1.241 | 99.8   | 1.197 | 天山山间的高位断陷盆地                          |
|       |                              | 2 420   | 1.118 | 99.9   |       |                                      |
|       |                              | 2 500   | 1.153 | 99.8   |       |                                      |
|       |                              | 2 600   | 1.238 | 99.9   |       |                                      |
| 2 700 |                              | 1.194   | 99.9  |        |       |                                      |
| 2 800 | 1.235                        | 99.4    |       |        |       |                                      |

表2 不同地貌类型等高线大标度下的分维计算结果(标度范围5~200 km)

| 地貌区  | 追踪等高线标高<br>(研究区/高程 m) | 分维值   | 相关系数<br>/ % | 与表1相应等高<br>线分维值之差 |
|------|-----------------------|-------|-------------|-------------------|
| 高山区  | H/3 000               | 1.449 | 99.1        | 0.192             |
|      | H/4 000               | 1.418 | 99.5        | 0.28              |
|      | B/3 000               | 1.237 | 99.4        | -0.036            |
|      | B/3 500               | 1.183 | 99.2        | -0.086            |
|      | K/1 600               | 1.193 | 99.9        | -0.141            |
| 中低山区 | K/1 800               | 1.223 | 99.1        | -0.114            |
|      | K/2 000               | 1.214 | 99.9        | 0.002             |
|      | M/1 000               | 1.186 | 99.4        | -0.211            |
|      | M/1 400               | 1.171 | 99.4        | -0.161            |
|      | M/2 000               | 1.297 | 99.4        | -0.084            |
| 盆地   | T/-100                | 1.061 | 99.8        | 0.006             |
|      | T/0                   | 1.065 | 99.5        | 0.012             |
|      | T/200                 | 1.070 | 99.6        | -0.022            |
|      | D/2 400               | 1.151 | 99.2        | -0.090            |
|      | D/2 600               | 1.161 | 99.6        | -0.077            |
|      | D/2 800               | 1.161 | 99.9        | -0.074            |

### 3 等高线分维的动力学含义

#### 3.1 地貌学中的有关基本问题

自然界的地貌形态,常以单个或组合形态方式存在.地貌形态组合可以是简单的同一年代同一类型地貌组合,也可以是复杂的不同成因的地貌组合.地貌规模极其悬殊,通常按其相对大小,并考虑地质构造基础和塑造地貌的营力进行分级.大型地貌形态与内力地质作用关系密切,是地壳长期发展的结果;小型地貌形态特征主要取决于外力地质作用,并受到岩性的影响.上述地貌分级不是一个严格的分类方案,它类似于地质构造分级.本文研究的地貌等级相当于中小型地貌的范畴.

地貌的形成和发展是在一定地质地理条件下内外营力相互对抗作用的结果<sup>[8]</sup>,并表现出阶段性、继承性的特点.内营力主要控制大型地貌的总体格局.外营力则是塑造剥蚀地形和堆积地形.就一定空间范围来说,由于有物质的水平向流动,地貌过程是一个开放耗散的系统.外营力在地貌的形成发展中主要塑造各种较小的地貌形态,并受到内营力作用的控制,但这绝不意味着外营力的强度不大,外营力的强度总和几乎可以和内营力处于相等的地位<sup>[9]</sup>.本文研究的主要是与外营力有关的侵蚀和堆积作用.

美国地貌学家 Davis 1899 年提出了著名的“地理循环说”,他假定在构造运动(上升之后)和气候条件不变的情况下,地貌发展沿着青年期→壮年期→老年期的阶段进行,指出了地貌发展的阶段性.

从宏观上看,内营力主要形成地表基本起伏(巨型、大型地貌),向着增强地势的趋势发展;外营力则趋向于削平地表的基本起伏(夷平作用),向着减弱地势的趋势发展.但从微观上看,外营力却表现出一种相对随机的正反馈机制(侵蚀作用),使地表起伏加剧<sup>[10]</sup>.上述作用贯穿于地球形成以来的一切地貌过程中.由于现今大多数地貌是新第三纪以来特别是第四纪发展起来的,因而研究地貌要充分而慎重地估计新构造运动的影响.

#### 3.2 等高线分维与外营力地质作用间的联系

等高线是一定分辨率下(忽略某些细节)地表高程相同点的连线,一定高程的等高线是与

一定地貌类型相联系的.对于自相似/自仿射分形曲线来说,分维的大小表征了曲线的复杂程度,或者说曲线对平面的填充能力.在隆起剥蚀区,凡等高线遇到规模不同的侵蚀沟谷时,等高线就会向高处侵蚀源产生大小不同的曲折;在沉积凹陷区,由沉积作用形成平缓的沉积盆地,或者在盆地边缘把搬运带来的物质堆积在沟口处,形成不同规模的冲洪积扇、锥,这样等高线就会向沉积中心凸起,形成不同规模的曲折.当然这种曲折的复杂程度会明显小于侵蚀区.如果冲洪积扇锥上还发育有冲沟,则会出现类似剥蚀区所述情形.从平面上看,侵蚀作用总是向着把地表切割成不同规模曲折的碎片方向发展,而沉积作用则是向着使地表趋于平缓整体的方向发展.因此在各种类型的地貌中,等高线的曲折主要是由侵蚀作用和不均匀堆积作用形成的,而且这些曲折因上述作用规模的不同而具有层次性的.由此我们可得到如下认识:

(1) 与外营力地质作用有关的侵蚀沟、堆积体等地貌单元,是地貌发展过程中的产物,等高线的曲折程度与上述地貌形态密切相关.如在抬升隆起区,由于强烈的下切侵蚀作用,等高线的分维值就会明显较高;而在稳定的沉降区分维值则会明显较低,一般接近于1.因此,在不同地貌作用方式和强度下形成的各类地貌的等高线应该具有不同的分形特征.

(2) 随着地貌的形成发展,地貌等高线分维值会展现出阶段性特点.例如,就单个流域的汇水区来说,不断抬升的隆起作用,伴随着不断增强的侵蚀作用,进而导致诸如谷岸滑坡和河流袭夺作用,产生侵蚀沟的增大和归并的过程,出现大面积的侵蚀谷地.在地貌发展进入成熟阶段,多个侵蚀谷地相连则会形成较大规模的等高线曲折,较小的曲折相应减少.在不断凹陷的沉积区,则会形成较大规模冲洪积扇叠置在早期较小的扇体上,并在其上发育较大的冲沟,形成较大规模的等高线曲折.这是因为外营力作用存在一种正反馈机制.在内外营力作用下的地貌形态,不是处于瞬时的平衡,而是处于自组织临界状态,或者说处于混沌的边缘.一个微小事件(偶然出现的小坑),将导致一个长期的行为,一个小坑终究演化成一个大坑<sup>[7]</sup>.如果外营力的这种正反馈作用处在地貌演化的较早阶段,那末在一个地区等高线的大的曲折减少,越小的曲折越多;反之,如果这种正反馈作用进行的相对完全和彻底,那末等高线的大的曲折就会越多,小的曲折就会越少.因而可以根据不同地貌类型等高线在不同标度下的分维特征,定量推断内外地质营力作用强度以及地貌形成发展的阶段.

### 3.3 等高线分维的动力学含义

中生代天山为缓慢隆升的准平原化剥蚀区,在天山南北两侧堆积了侏罗和白垩纪湖沼、湖滨相沉积.早第三纪期间,欧亚和印度板块碰撞产生的侧向水平挤压作用使得基本削平的天山再度强烈隆起,同时山前强烈下沉并堆积了4 000~7 000 m的磨拉石沉积.早更新世末期,构造运动由天山向南北两侧盆地迁移,形成了库车、乌鲁木齐一带的数排第四纪逆冲褶皱带,成为天山南北缘的最新隆起区.总体而言,在天山地区新构造运动作用的时间顺序和强度由西向东、由中间向南北两侧呈现由早到晚、由强到弱的趋势.

根据上述认识和6个研究区在不同标度下的分维计算结果,得出如下结论:

(1) 地形等高线的分维值或复杂性高低主要是由侵蚀作用和不均匀沉积作用引起的,隆起区分维值明显大于沉降区,也就是说分维值受到构造运动方式控制.

(2) 等高线分维值随地貌类型和标度区范围不同而变化,表现了不同地质作用尺度范围和强度.在表征小标度侵蚀作用特点的0.1~10 km标度范围下,南北天山山前的最新隆起剥蚀区(M区、K区)分维值最高.这是因为它们由前第四纪沉积区变为剥蚀区,经历了较短的剥蚀作用,而且近地表主要是中生代抗蚀能力较差岩石和堆积物,等高线曲折主要是由大量小型侵蚀沟所致;在强烈隆起区(B区、H区),由于经历了较长和较强的侵蚀作用,侵蚀沟经过发

展和合并,小标度的等高线曲折相应减少,因而分维值次之;在沉积凹陷区(T区、D区),由于是以堆积作用为主,等高线分维值最低.

在此需要特别指出的是:与吐鲁番盆地(T区)单一的沉积作用特点不同,大尤鲁都斯盆地(D区)是天山山体内部的高位断陷盆地,一方面接受来自高山的侵蚀物质,同时又遭受较为强烈的侵蚀作用,侵蚀作用的强度明显大于沉积作用的强度,因而等高线分维值明显大于单一沉积作用形成的盆地.

在表征大尺度侵蚀作用特点的5~200 km 标度下,等高线分维值表现出强烈隆起区>最新隆起区>沉积凹陷区.因此在研究侵蚀作用特点和强度时必须说明其标度范围.

(3) 不同发展速度和阶段地貌的分维特点不同.

由同一等高线在大小两个不同标度下的分维值可以发现,不同尺度下地貌作用的强度是有差异的.如哈尔克山大标度下的分维值明显高于小标度下的分维值,而天山北缘的玛纳斯中低山区则相反,表明分维与标度有关,即多分形特征.

同一类型地貌区在不同标度下的平均分维值特点也不相同.在最新隆起区的M、K区两个标度分维值相差明显;在高山区的H区大标度分维值明显升高,而B区则显示下降;在沉积凹陷区的T区基本保持不变,D区则略有所降低.由此可以判断不同地貌区构造运动的强度,进而估计地貌所处的发展阶段.如果在隆起区小标度下的分维值明显大于大标度下的分维值,则地貌处于幼年期(如M区),在多度域自相似标度图上曲线是下凹型的;相反则处于发展成熟的青一壮年期(如H区),在多度域自相似标度图上曲线是上凹型的;

— ( B区、K区),

(4)

, K区 1 400 m、1 600 m、1 800 m, M区 800 m 和大标度下的M区 2 000 m 等高线.

### 4 结语

#### 地形等高线具有分形性质

地形等高线具有分形性质,其分维值与标度密切相关.本文通过分析天山地区不同地貌区在不同标度下的等高线分维值,揭示了地貌发育阶段与分维值的关系.研究表明,幼年期地貌(如M区)表现为下凹型曲线,而发展成熟期地貌(如H区)表现为上凹型曲线.这一结论对于理解地貌演化过程具有重要意义.

[1] 魏. [M]. : , 1998. 1—3.

[2] . [J]. , 1999. 51(3): 3—8.

[3] , . [M]. : , 1990. 63—66.

[4] , . [J]. , 1992. 15(7): 516—519.

[5] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967. 155: 636—638.

- [6] Norton D, Sorenson S. Geometric characteristics of fractured granite surface[ J ]. *Puer Appl. Geophys.*, 1989, **131**: 107—116.
- [7] , , , [ J ]. , 1999, **15**(1): 92—96.
- [8] Scheidegger A E. The principle of antagonism in the earth's evolution[ J ]. *Tectonophysics*, 1979, **55**: 7—10.
- [9] , , . [ M ]. : , 1981. 6—15.
- [10] , , . [ J ]. , 1998, **17**(1): 23—30.
- [11] , . : , [ J ]. , 1988 (2): 33—37.

## FRACTAL CHARACTERISTICS OF TOPOGRAPHIC ISOLINE AND DYNAMIC INTERPRETATION

LI Meng, ZHU Ling-ren

(Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumuqi 830011, China)

**Abstract:** Based on terrain elevation isolines from topographic maps with scale 1: 50 000 and 1: 1 000 000 in Tianshan area in Xinjiang, the fractal dimensions of isolines in 6 studying sectors from 3 different types of geomorphology, including high mountain, low—moderate mountain and catchment basin, are computed by using successive coarsening method. The results show that all the studied isolines are statistical fractals, and the fractal dimensions take on different characters for different geomorphological regions and scale ranges. It can be inferred that the fractional dimension values are closely dependent on the erosional intensities, and it can be a very important parameter in geomorphological and geodynamic researches.

**Key words:** Topographic isoline; Geomorphology; Fractal; Dimension; Erosional process