

分形理论及其在地貌学中的应用

——分形地貌学研究综述及展望

张 捷 包浩生

(南京大学大地海洋科学系)

提 要:本文简介了分形的有关基本概念,回顾了分形理论在海岸、流水、喀斯特地貌等多种地貌类型和流域地貌发育的形态研究中,以及在地貌过程研究中的应用的近成果,并提出了今后分形地貌学研究的五个主要方面。

主题词:分形 分维 空间分形 时间分形 混沌 地貌形态 地貌过程 分形地貌学。

分 类:(中图法) P931 (科图法) 57.15

近代数学的发展,为科学研究提供了许多新的方法,分形理论的出现便是一例,它在80年代被广泛应用于包括地学在内的众多研究领域:如从文艺学、经济学、物理学到动物学,都可见到分形现象的发现及分形理论成功运用的例子^[1-2]。其中尤其令地貌学者关注的是根据分形理论由计算机所模拟出的一系列地形景观^[3-5],其逼真程度令人惊讶。近年来,分形理论在地貌学研究中的应用也十分广泛,成为国际地貌学研究中的新的热点,如荷兰出版的国际地貌学杂志特别编辑了“分形理论在地貌学中应用”问题的专辑^[6],值得注意的是,在该专辑的导言中编者用了个新术语“分形地貌学”,但惜未下定义。我国学者李后强、艾南山(1992)研究了分形地貌(主要是流水地貌及分形地形的模拟)并提出了分形地貌学的概念,认为“分形地貌学是运用分形方法及原理研究地表形态及其发生、发展和分布规律的科学”^[7]。本文拟在简介分形理论的基础上,回顾和综述分形理论在地貌学研究中的近成果,并提出分形地貌学研究需深入完善的几方面问题,抛砖引玉,以求同行批评指正。

1 分形理论的基本概念简介

十分有趣,分形概念的源起就与地貌学相关。现代分形的概念,发轫于法裔美国学者 Mandelbrot (1967) 的著名论文“英国海岸线有多长?”^[8]。该文通过对世界几个海岸线的测量长度分析,认为地理界线(如海岸线)是不确定的,其长度与测量精度(测量单元,即测长度时

所用两脚规的长度)相关,即随着两脚规的尺度变小,其测量的长度值将变大;从而导出了分形的重要特性——自相似性(Self-Similarity)的概念,即每一部分可考虑成其整体的缩影。以海岸线为例,随着测量精度的增大,海岸线的曲折将不断“增多”,因此不同比例的海岸线(如卫片与航片上的海岸线),其曲折性等几何性质及形态看起来会十分相似,Mandelbrot 在该文中还将这种自相似性与其分数维(Fractional Dimension)相联系分析。自相似性十分重要,事实上,后期也有的研究者将其作为分形的定义条件,认为“在形态(结构)、动能和信息方面具有自相似性的研究对象统称为分形”^[1]。

Mandelbrot 后来给分形下的原始数学定义十分简单:“分形是其豪斯道夫维数(Hausdorff Dimension, Df)严格大于拓扑维数(Dt)的集,即 $Df > Dt$ ”^[9-10],而 Hausdorff 维数也是分形描述的基本指标。但有的研究者认为这一定义将一些明显是分形的集排除了,故将定义修改为:分形是具有下列性质的集:1)具有精细的结构;2)其不规则性在整体和局部均不能用传统几何语言来描述;3)具有某种自相似的形式(统计或近似的);4)一般 $Df > Dt$;5)该集常可由极简单的方法定义,可能由迭代产生^[5]。值得注意的是,尽管地貌常被作为分形几何的典型^{[8]、[11]},但客观地貌中,严格地说的不存在真正的数学上的分形的(就象自然界不存在严格的圆和直线一样),而只是在一定尺度内具有某种(如统计的)分形特征。

分形几何学,以 Mandelbrot 自己的话说,有两个意义,即它既是描述“确定性混沌”(deterministic chaos)的几何学,同时也可描述山脉、云系、星系的几何特性^[12]。

分形的类型有自然分形、时间分形、社会分形、思维分形等。地貌学中所涉及的分形类型主要是几何分形和时间分形,几何分形又可分为线状分形、面状分形和体积分形。分形的数量特征由豪斯道夫维数或分维 Df (Fractal Dimension) 来确定。设求一个客体某测量值(如长度、面积、体积)时所用的标准测量体(单位体)的“半径”(如单位直线的半段长、单位圆半径、单位球半径)为 r ,则以该单位体量度的测量值结果 $N(r)$ (例如在测量线段长度时所用跨度为 $2r$ 的两脚规度量的次数)满足下式:

$$N(r) \propto r^{-Df} \quad (1)$$

其中 Df 即为豪斯道夫维数¹⁾,对于分形而言,Df 即是分维。Dubuc 等(1989)曾研究了剖面及表面的分维值的求算法^[13-14],无疑可应用于地貌剖面和地形表面。李后强等(1992)曾介绍了地貌分维求算的谱分析法和高差统计法^[7]。地貌分形现象较常见。海岸线作为线状分形是分形研究的初始客体^[8],除此之外,具线状分形性的地貌性质尚有洞穴延伸性质^[15]、河流平面形态^[16]及山体剖面线等,其 Df 值介于 1.0—2.0 之间,具面状分形性的地貌类型有喀斯特漏斗洼地^[17]及具湖泊洼地镶嵌的山体表面等^[18],其 Df 值为 2.0—3.0;体积分形在某些地貌中也可找到类似性质,如一些海岸灰岩的藻类海绵状钻孔,可在不同尺度上(从常规尺度直至扫描电镜下的超微尺度)具有相似的钻孔性质,即可能具有某种自相似性。自仿射性(Self-Affine)也是分形的一种重要特性。而自然地貌不完全是自相似的,更常见的是自仿射的^[19]。有关分形地貌的自仿射性的研究,近年也有一定的进展^[11、20]。

1) 有关豪斯道夫维数的详细数学含义请参见文献 [9] 42—49

2 分形理论在地貌学中的应用

分形理论的出现,为地貌学提供了新的研究方法。事实上,许多地貌形态(山脉、河流、海岸等)虽然貌似杂乱无章,但用分形理论来分析即可发现它们仍然是具有一定的数学(几何)规律的,并可用分维 D_f 来定量描述这种性质。虽然 Snow 等(1992)在提出“分形地貌学”这一术语时未下定义^[6],但我们可以认为分形地貌学是运用分形理论分析研究地貌现象在空间、时间(相空间)上分布的数学特性及这种特征在地貌发育过程中的意义的分支学科,是分形理论在地貌学中的应用。分形地貌学研究在内容上主要有两大类:一类是地貌现象的某些空间分形性质的研究,这些研究通常以特定的地貌类型为研究对象,故可归入部门地貌学范畴;另一类研究则着重于分形特征与区域地貌演化的关系,可归入区域地貌学范畴。

2.1 海岸地貌的分形研究

上文说过,具有多种不同尺度的大小岬角海湾的海岸线是分形几何的摇篮^[8]。继 Mandelbrot (1967) 研究之后,有关海岸线的分形研究又有深入。Phillips (1986) 将分形理论方法应用于海岸线的侵蚀过程研究^[21],研究表明,海岸侵蚀速率的变化很大,其沿岸形式是复杂的,而变化的尺度是局地性的。该研究的意义在于说明除了侵蚀速率在大范围的明显差异外,小范围的局地因素在决定侵蚀速率差异方面要比大范围因素(如河口形态)更为重要^[21]。海岸地貌的分形研究尚有许多方面可以深入,如潮汐汉道的分形特征等。

2.2 流水地貌中的分形研究

流域水系密度、流域水网长度等流水地貌特征常具分形特征。La Barbera 等(1989),通过大量实地数据的分析得出水网的典型分维值 D_f 在 1.5—2.0 之间,而平均值约在 1.6—1.7 之间,同时指出分形研究在流域地貌及水文学中具有如下意义:1) 根据分维值运用数字化高度模型模拟流域水网形态;2) 研究河流长度与流域汇水面积的关系;3) 流域水力学与尺度相关的问题^[22]。Gupta 等(1989)研究了河流水网的统计自相似性及其在流域坡降与其它几何特征的经验相关关系的意义^[23]。Robert 等(1990)则以分形理论来解释河流主流长度与流域面积的相关性^[24]。Nikora (1991)对苏联 46 条河流的平面形态的分形结构研究,表明河流平面形态的平面同形态的分形结构研究,表明河流平面形态在一定尺度内具有分形特征,其内分形尺度 (Internal Fractal Scale) 和外分形尺度 (External Fractal Scale) 分别为河道的河床宽 B 和河流的河谷谷底宽 B_0 ,在这两个尺度内河流平面形态具有分形结构^[16],突破了前人对河流平面形态描述研究限于宏观形态上曲流特征的单一方法。此外, Tarboton 等(1992)将水网密度与地貌演化相联系来进行研究,并探讨了随研究尺度的变化后分维所发生变化的原因^[25]。李后强等(1992)则将流水地貌与紊流分形相联系^[7]。

2.3 喀斯特地貌的分形研究

有关喀斯特地貌的分形研究最早是关于洞穴延伸的线型分形特征的研究^[26]。Laverty (1987)对洞穴勘测数据的分析表明,洞穴长度具有自相似性,在测量标度为 1—100m 的范围内,其分维值在 1—1.5 之间^[15]。Ream (1992)对美国一些地区落水洞进行的分形研究表明,落水洞的数量特征可能是具分形特征的,其分维值在 1.209—1.558 之间 (区域面积 >

10000m²)^[17]。

2.4 其它地貌类型的分形研究

有关冰川地貌的分形研究目前主要在两个方面，一是冰碛物地形形态的表面糙率分形特征的研究 (Brown 等 1986, Snow 等 1991)；二是有关冰川冰下岩表侵蚀形态的小尺度的糙率研究 (Elliot, 1989)^[6]。

土壤埋藏地貌 (Soil-covered Landscape) 的分形研究，主要采用分维或 Hausdorff 维数来描述表面景观的不规则性^[27-28]，同时，有的研究还计算了土壤深度、土壤中石砾含量、土壤中砂含量、土壤表面石头的直径均值及地下水水面等性质的分维值，这些分维值均在 1.1—2.0 之间^[5]。分形方法还曾被应用于倒石锥表面糙率的研究^[29-30]。此外，分形方法还可应用于遥感景观信息及地理信息系统的研究^[31]。

2.5 分形地形景观的数学模拟

分形地形的数值模拟生成方法的研究似乎一直是数学物理学家们的“专利”。Feder (1988)对分形地形景观生成的几种主要数学方法，如随机转换表面 (Random Translation Surface) 的数学法则、分形地形 (表面) 的生成的数学方法及另一种模拟生成的分形表面——随机附加表面 (Random Addition Surface) 的数学法则进行了较系统的阐述^[3]。模拟生成的“分形地形”，既可以是自相似的，也可以是自仿射性的，然而无论具有哪种特性，其形态上与自然界的地貌景观都非常相似。在分形地形的数值模拟中，Weierstrass-Mandelbrot 分形函数 (WMF) 的应用也是其中成功的例子之一^{[3][5][7]}，同时这个函数还可用于客观自然现象 (如地形等) 的描述 (即估算分维)^[4-5]。分形地形的数学模拟方法，可以认为是一个简单的过程，其控制参数很少 (仅 2—3 个)。这种方法无疑有助于人们对自然地貌景观特征的把握。分形地形的数学模型不仅可直接应用于地貌学研究，这种“地形”还可用来表示温度、矿产的丰度等的分布场。

2.6 区域地貌的分形研究

近年来，地貌学家突破了分形地形或分形表面的纯理论研究的现状，尝试着将其应用于区域地貌演化方面。区域地貌的地形起伏特征及地貌演化规律的研究，可以通过地貌形态测量 (Morphometry) 和数值模拟来实现。Klinkenberg (1992) 对分维与地貌测量值的相关性研究表明分维是一项独特的形态参数并可作为地形发育模型的检验指标^[32]。Chase (1992) 在研究流水地貌塑造作用的地形分维时，提出了一个三维流水侵蚀-堆积模型，并通过几乎为线性的简单法则 (公式) 模拟出了复杂的分形地形的形态，说明复杂地形的形成不一定需要复杂的原理，同时其模拟地貌的分维值对气候的敏感程度比对构造抬升的敏感程度大^[33]。Lifton 等 (1992) 采用了地貌景观的分维 D (测量不同尺度地形起伏度指标) 和测高积分 I (Hypsometric Integral 为测量某一相对基面上地体体积分布的指标) 来测量不同尺度上的地貌高度变化特征，他们对实地地形分析研究表明构造运动强烈影响着山脉波长 (Range-Wavelength) 尺度的分维值，构造运动显示出与 D、I 的较大负相关性，他们研究的三维地形模型还显示出一种气候参数比构造运动更强烈地影响 D 的现象，且气候干旱则测量尺度内的 D 愈大^[34]。Ouchi 等 (1992) 着重于形态测量法对三维空间的自仿射地形参数的测量及意义进行了探讨^[11]。Willgoose 等 (1992) 则探讨了汇流区地貌演化模型，研究了大尺度与小尺度地貌景观性的关系^[35]。

此外, Breyer 等 (1992) 估算了流域边界对分形特征的影响, 并提出了对某些传统流域地貌测量指标的测量计算进行改进的方法^[36]。

2.7 地貌过程的相空间分形特征研究

分形理论虽然仅探讨“形态”的几何特征, 但也可应用于地貌过程的时序研究。这实际上是研究地貌过程空间分形规律 (即时间分形)。时间分形一般指事件的出现在时间轴上具有自相似性的性质。Mandelbrot 等 (1969) 首先运用分形模式探讨了地表过程中的时序记录^[37]; 有关地貌活动的非常事件——地震的时间分形研究也颇不少见^[38]。在这类研究中, 人们着重于对某些不连续性记录的变化及某些对地貌发育比平均速率可能更为重要的特殊事件的特征进行研究。Kirkby (1987) 应用分形方法探讨了气候或水文事件长期记录中的“Hurst 作用”及其在过程速率的外推中的意义^[39]。Mayer (1992) 的研究表明美国南加州及内华达荒漠气候站所测的日降雨系列, 当时间箱 (尺度) 在 100 日以内则呈分形性 (为分形束 Fractal clustering), 其分维值为 0.37—0.26, 而 >100 天则不具分形性^[40]。Snow (1992) 研究了地史上抬升及剥蚀事件在时间上的分形特征, 得出其分维值为 $D_{\text{抬升}}=0.75$ 和 $D_{\text{剥蚀}}=0.81$, 说明了地史上抬升事件的聚集程度仅略高于剥蚀事件^[41]。

除了上述之外, 值得一提的是我国学者在分形地貌学的基础理论研究方面进行了有益的探索 and 开拓^[7,42]。艾南山等 (1992) 还尝试建立了分形地貌学的一系列基本原理和定量^[42]。

3 讨论和展望

著名地貌学家 Goudie 在《地貌研究的技术》一书中指出, 一旦一种新技术可以利用, 整个科学过程就可围绕其发展并进入更高层次的研究和解释^[43]。分形理论作为一种新技术应用于地貌学也是如此。地貌研究中分形理论的应用可十分广泛, 包括多种地貌类型或流域整体的地貌形态研究和地貌过程的研究。分形理论为地貌学家提供了新的研究方法, 使之得以发现传统认为复杂无序的地貌现象的新的跨尺度定量特征 (分形特征), 同时分维也成为地貌学中的新的参数。分形理论的应用, 也使地貌研究有可能将野外观测得到的简单公式与复杂地貌形态从成因上相联系并建立模式的可能, 例如 (Chase (1992) 就说明了复杂地形的形成并不一定需要复杂的原理^[39]。因而分形理论实际上也为地貌学者解释复杂地形提供了一个可能途径。

分形理论在地貌学研究中的作用大致可分为四个类型: 1) 描述地貌形态特征, 以分维作为地貌的阶段性和区域性、类型等划分的指标; 2) 以分形理论来进行地貌发育的内、外动力因素特征的描述; 3) 以分形理论来建立地貌模型, 首先是以分形法则进行一般地貌景观形态的数学生成, 进而将这种地貌生成的分形数学法则运用于地貌发育演化机制的模拟, 即由形态模型发展至过程模型; 4) 以分形方法来描述地貌事件的时序特征。

分形地貌学研究可以说是一个崭新研究领域, 我们认为, 目前尚待进一步完善和深入研究的问题主要有以下方面:

(1) 地貌分形段特征的内在成因机制研究 许多初期研究仅是对地貌现象中分形现象的发现与描述, 而有关这些地貌分形性质形成的内在机制或其内动力及外动力条件, 以及这

种分形特征能否反映某种特殊的地貌过程的性质、地貌的分形特征的区域性如何等问题，尚有待于深入。同时，现有的研究表明，地貌的动力因素，如许多地理、地质和地球物理场（重力场等）乃至地质构造（如断裂）等，都可具有分形结构^[19,14]，而在此基础上形成的地貌也可以是分形的，那么这二类分形的数学关系是什么？如何运用已有的定理^[42]来进行分析？

（2）地貌分维值与地貌过程的关系研究 许多有关地貌分形特征的研究所揭示的分形规律仅是一种静态特征（即是现今地貌的“瞬时”状态），而另一些研究虽然尝试着将分形特征与地貌发育相联系，但仍然难以解释分维特性与地貌过程的关系^[35]，因此尚需研究下列问题：地貌分维值是一常数还是不断变化的？现代地貌的分维值所能代表的地史阶段多长？一些研究认为气候、岩性条件大致相同，地貌发育达到壮年或老年期的流域（面积足够大），其河流的分维值较接近^[18]，这是否意味着一个稳定的（已达到平衡的）地貌类型分维值趋向于一个确定值（常数）？如果某个阶段的地貌的分维值是常数，从其开始发育到达到这一常数所需时间有多长？分维值能否反映地貌发育过程的阶段性？亦即不同地貌阶段是否有各自的典型分维值？其原因又是什么？尽管可将分维作为流域侵蚀期划分的指标^[7]，但这种以形成分形水网为标志而进行的水系发育阶段划分与传统以地貌剖面等形态因素进行的地貌阶段划分有何联系？以及地质构造、岩性、气候、植被等是否影响这种“阶段分维”？

（3）地形分形性的尺度范围（即无梯度区间）与主要地貌过程的尺度范围的关系 地貌上的分形特征通常仅是在一定尺度范围内的统计特征，而这种尺度范围与主要地貌过程作用的尺度范围是否相关？同时，同一地貌过程或作用在不同尺度上有差异而分形特征则是一种在一定尺度范围内（即无标度区间内）的跨尺度几何特征，这种分形特征意味着什么？更有意义的是，某种地貌遵循统计分形性，是否意味着其主导地貌营力的作用机制也是无标度性或跨尺度的？这一问题的答案在对室内缩微地貌实验模型（包括常见的水利工程地貌模拟如葛洲坝枢纽等）的结果的可靠性判断及其可推广性或代表性的范围确定是至关重要的。

（4）分形地貌模型研究的深化 模拟生成分形地形的较成功的数学法则有多种，但数学家们也承认这种地形并不反映地貌形成过程的任何信息^[3]，另一些研究发现运用简单的近乎线性的法则可模拟生成自然地貌景观（且十分逼真），但这种简单的法则与自然界地貌发育过程中多因素复杂过程的联系是什么？它反映了复杂地貌过程的某种特性，还是仅仅符合了人们视觉判断的某些规律？人们应如何有效地借助这种数学法则来建立有内外动力作用参与的地貌发育演变模型？模拟地形与天然地形的差异是什么？显然，对分形地貌模型的阐释也是一个重要方面。

（5）地貌现象中的时间和空间分形规律应用于地貌过程的预测的可行性研究 地貌事件如地震、洪水、泥石流等可具时间分形性，这意味着一定预测意义。例如：若洪水分布具时间分形性，则意味着百年一遇的洪水次数与十年一遇的洪水次数之比可代表千年一遇的洪水与百年一遇的洪水之比^[20]。

上述一些问题，有的已不是仅从数学角度出发能解决的，而是需要从更多的学科去观察、运用更多的手段来进行综合研究的课题，或由地貌学家与数学家们共同努力来解决。还需一提的是，人们对美国七个自然省的 55 个数学地形体视模型（DEM）进行分形自相似性的研究表明，自然地貌形态并非都具分形性^[45]，这就提醒人们要警惕分形在地貌学中的盲目滥用。

参 考 文 献

- [1] 李后强、程光钺. 分形与分维. 四川教育出版社, 1990, 1-10.
- [2] 林鸿溢、李映雪. 分形论——奇异性探索. 北京理工大学出版社, 1992, 23.
- [3] Feder J. *Fractals*. New York & London: Plenum Press, 1988, 214.
- [4] 林鸿溢、李映雪. 分形论——奇异性探索. 北京理工大学出版社, 1992, 207.
- [5] Burrough P A. Fractal dimensions of landscapes and other environment data. *Nature*, 1981, 294 (5838): 240-242.
- [6] Snow R S, Mayer L. Introduction. *Geomorphology* (Special issue on fractals in geomorphology), 1992, 5 (1-2): 1-4.
- [7] 李后强, 艾南山. 分形地貌学及地貌发育的分形模型. *自然杂志*, 1992, 15 (7): 516-518.
- [8] Mandelbrot B. How long is the coast of Britain—statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, 156 (3775): 636-638.
- [9] 肯尼思·法尔科内. 分形几何——数学基础及其应用 (曾文曲、刘世耀等译), 东北工学院出版社, 1991, 10-11.
- [10] 林鸿溢、李映雪. 分形论——奇异性探索. 北京理工大学出版社, 1992, 62.
- [11] Ouchi S, Matsushita M. Measurement of self-affinity on surface as a trial application of fractal geometry to land-form analysis. *Geomorphology*, 1992, 5 (1-2): 115-130.
- [12] Mandelbrot B. Fractal—a geometry of nature. *New Scientists*, 1990, 1127 (1734): 38-43.
- [13] Dubuc, B. et al. Evaluating the fractal dimension of profiles. *Phys. Review*, 1989, A39: 1500-1512.
- [14] Dubuc, B. et al. Evaluating the fractal dimension of surfaces. *Proc. Roy. Soc. London*. 1989, A 425: 113-127.
- [15] Lavery M. Fractals in karst. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12 (5): 475-480.
- [16] Nikora W. Fractal Structures of River Plan Forms. *Water Resources Research*, 1991, 27 (6): 1327-1333.
- [17] Reams MW. Fractal dimensions of sinkholes. *Geomorphology*, 1992, 5 (1-2): 159-165.
- [18] 李后强、程光钺. 分形与分维. 四川教育出版社, 1990, 63-64. 64-66.
- [19] 艾南山、李后强. 第四纪研究的非线性科学方法. *第四纪研究*, 1993, (2): 109-120.
- [20] D. L. 法科特. 分形与混沌——在地质学和地球物理学中的应用 (陈颙、郑捷等译). 地震出版社, 1993, 76-105. 88.
- [21] Phillips JD. Spatial Analysis of Shoreline Erosion, Delaware Bay, New Jersey. *Annals of the Association of American Geographers*, 1986, 76 (1): 50-62.
- [22] La Barbera P, Rosso R. On the Fractal Dimension of Stream Networks. *Water Resources Research*, 1989, 25 (4): 735-741.
- [23] Gupta VK, Waymire E. Statistical Self-similarity in River Networks Parameterized by Elevation. *Water Resources Research*. 1989, 25 (3): 463-476.
- [24] Robert A, Roy AG. On the fractal Interpretation of the mainstream length-Drainage area Relationship. *Water Resources Research*. 1990, 26 (5): 839-842.
- [25] Tarboton DG, Bras RL, Rodriguez-Iturbe IA. Physical basis for drainage density. *Geomorphology*, 1992, 5 (1-2): 59-76.
- [26] Curl RL. Fractal dimension and geometries of caves. *Mathematic Geology*, 1986, 18 (8): 765-783.
- [27] Culling WEH, Datko, M. The Fractal Geometry of the Soil-covered Landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12 (4): 360-385.
- [28] Culling WEH. Dimension and Entropy in the Soil-covered Landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13 (7): 619-648.
- [29] Andrieu R, Abranams AD. Fractal techniques and the surface roughness of talus slopes. *Earth Surface Processes*

- and Landforms, 1989, 14 (2): 191-209.
- [30] Andrieu R, Abranams AD. Fractal techniques and the surface roughness of talus slopes-Reply. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15 (3): 187-290.
- [31] Malansen GP, Butler DR, Walsh SJ. 自然地理学中的混沌理论 (王云才等译). *地理译报*, 1992, 4: 5-9.
- [32] Klinkenberg B. Fractals and morphometric measures: Is there a relationship? *Geomorphology*, 1992, 5 (1-2): 5-20.
- [33] Chase CG. Fluvial landscaping and the fractal dimension of topography. *Geomorphology*, 1992, 5 (1/2): 39-57.
- [34] Lifton NA, Chase CG. Tectonic, Climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution in San Gabriel Mountain, California. *Geomorphology*, 1992, 5 (1-2): 77-114.
- [35] Willgoose G, Bras RL, Rodriguez-Iturbe I. The Relationship between catchment and landscape properties: implications of a catchment evolution model. *Geomorphology*, 1992 5 (1-2): 21-37.
- [36] Breyer SP, Snow RS. Drainage basin Perimeters: a fractal significance. *Geomorphology*, 1992 5 (1-2): 143-157.
- [37] Mandelbrot BB, Wallis JR. Some Long-run properties of geophysical records. *Water Resources Research*, 1969, 5 (3): 321-340.
- [38] 洪时中、洪时明. 地学领域中的分维研究: 水系、地震及其它. *大自然探索*, 1988, 7 (2): 33-40.
- [39] Kirkby MJ. The Hurst effect and its implications for extrapolating process rate. *Earth surface processes and Landforms*, 1987, 12 (1): 57-67.
- [40] Mayer L. Fractal characteristics of desert storm sequences and implications for geomorphic studies. *Geomorphology*, 1992, 5 (1-2): 167-183.
- [41] Snow SR. The Cantor dust model for discontinuity in geomorphic processes rate. *Geomorphology*, 1992, 5 (1-2): 185-194.
- [42] 艾南山、李后强. 从曼德布罗特景观到分形地貌学. *地理学与国土研究*, 1993, 9 (1): 14-17.
- [43] Goudie AS. *Geomorphological techniques*. London: Allen & Unwin. 1981: 10.
- [44] 杨新社、王谦身. 重力场分形及其在确定布格密度中的应用. *科学通报*, 1992, 37 (20): 1884-1886.
- [45] Klinkenberg B, Goodchild MF. The Fractal Properties of Topography: A comparison of methods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17: 217-234.

勘误：本刊1993年第4期《水文特征年内分配的优势期和优势值》一文中第69页，倒5行，“1972年”应为“72个数据”，该文中图1中图应为图2，图2应为图4、图4应为图1。71页中表1中80年优势期为12月30日，优势值应为6600，特此更正。

FRACTAL GEOMORPHOLOGY

—REVIEW AND PROPECT

Zhong Jie Bao Haosheng

(Dept. of Geography, Nanjing University)

Subject terms: Fractals, Fractal Dimensions, Geometric fractals, Temporal fractals, Chaos, Geomorphology, Geomorphic process, Fractal geomorphology

Abstract

Fractal theory is a new techniques occurred with development of modern mathematics. Fractal geomorphological research is a new direction in geomorphology with the application of fractal theory. Fractal geomorphology can be considered to be a new discipline to deal with the principle of origins, development and distribution of relieves of the earth surface with special reference to fractal theory. It focuses on the fractal geometric character of the distribution of geomorphological phenomena in space and time (phase space) and the related significances in geomorphological process. In this paper, with a brief introduction of the basic concepts of fractal, we reviewed the recent accomplishment of the application of fractal theory to morphological research of drainage basin and various types of geomorphology and to geomorphological process researches including following aspects: 1) coastal geomorphology, 2) fluvial geomorphology, 3) karst geomorphology, 4) other types of geomorphology including glacial landforms, soil-covered land-scape and rock talus, 5) mathematical-technique to generate fractal landscapes, 6) landscape evolution, and 7) fractals in geomorphological process in phase space.

Fractal theory provides a new technique to find and to describe quantitative geometrical characters of 'chaotic' geomorphic phenomena, and various kind fractal dimensions become type of geomorphic parameters. Fractal theory may be a possible way for geomorphologist to study and to explain the complex and chaotic earth surface processes and landforms. As for the future research of fractal geomorphology, the following issues still need further study: 1) the genetic mechanisms of geomorphic fractal, ie, the relationship between geomorphic fractals and geomorphic conditions, 2) the relationship between geomorphic fractal dimensions and geomorphic processes (phase), 3) relationship between range-scale of geomorphic fractals and that of geomorphic processes, 4) the further study of digital modeling of fractal landscape and its relation to physical geomorphic processes, 5) fractal characteristics of geomorphic phenomena in space and time and the possibility of geomorphic forecasting.