

文章编号: 1007-6301 (2003) 04-0426-11

分形理论在地理学中的应用研究进展

秦耀辰, 刘 凯

(河南大学环境与规划学院, 开封 475001)

摘 要: 美国数学家Mandelbrot 提出的分形理论为解决复杂性问题提供了有效方法。地理学的复杂性问题已成为分形理论的重要实证研究领域。本文根据国内已有的文献, 在概括分形理论主要内容的基础上, 对地理学各分支领域的应用研究现状及有关问题进行了评述, 并就地理学分形研究的前景作了展望。

关 键 词: 分形理论; 分形维数; 地理学; 进展

中图分类号: K909

1 引言

许多自然现象无法用传统的欧几里德几何来描述, 如曲折的海岸线、千姿百态的地貌、河流中的湍流等。虽然这些现象变幻无常且缺乏规则, 但却具有自我相似性。分形几何以这些复杂性问题为对象, 发展了一类专门的理论与方法。所谓分形 (Fractal) 原指“不规则的、分数的、支离破碎的”, 其核心是自我相似性^[1]。描述分形的特征量是分形维数, 简称分维^[2]。1967 年, Mandelbrot B. B. 在《科学》杂志发表“英国的海岸线有多长?” 的论文^[3], 标志着分形概念的产生。但最早的工作可追溯到 1875 年, 德国数学家Weierstrass 构造的处处连续但处处不可微的函数, 集合论创始人Cantor 构造了许多奇异性质的三分Cantor 集, 后经许多数学家的努力逐渐发展起来^[4]。1977 年Mandelbrot 发表“分形: 形式、机遇与分维”^[5], 1982 年又发表“自然界的分形几何”^[6]。分形理论的思想进一步成熟起来。

按照分形理论, 分形体内任何一个相对独立的部分 (分形元或生成元), 在一定程度上都是整体的再现和缩影^[7]。这种现象, 无论在客观的自然界和社会领域, 还是在主观的思维领域, 都是普遍存在的。分形理论在创立之后的二十多年里, 已被广泛应用于自然科学和社会科学的几乎所有的领域, 成为国际上科学领域的前沿研究课题之一。以至于美国物理学家惠勒说: “可以相信, 明天谁不熟悉分形, 就不能被称为是科学上的文化人!”^[7]在国内, 分形理论在地理学中的应用自 20 世纪 90 年代以来逐渐活跃起来, 应用日益广泛, 并在地貌学、城市地理学、地图学和遥感等分支学科取得了较大进展。以至于有学者指出^[8], 如果说地理学的第一、第二代语言分别是文字描述、地图的话, 那末地理信息系统已成为地理

收稿日期: 2003-06; 修订日期: 2003-06

基金项目: 国家自然科学基金 (49471025)

作者简介: 秦耀辰 (1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事区域可持续发展理论、模型与信息系统的教学与研究工作。qinye@henu.edu.cn

学的第三代语言, 地理学的第四代语言将是分形几何学, 甚至预见分形研究是未来地理学的主流^[9]。本文主要根据国内已有文献评述地理学应用分形理论的现状与前景。

2 分形理论简述

2.1 分形的概念

在Mandelbrot最初的论述中, 定义分形是其豪斯道夫维数(Hausdorff Dimension, 简称Df)严格大于其拓扑维数的集, 即 $D_f > D_t$ ^[10]。这个定义不合理, 因为它把一些明显是分形的集排除了。英国数学家肯尼思·法尔科内给出的定义为多数学者所接受, 他认为, 称集 F 为分形, 即认定它具有下述性质: (1) F 具有精细的结构, 即有任意小比例的细节; (2) F 是如此的不规则以至它的整体和局部都不能用传统的几何语言来描述; (3) F 通常有某种自相似, 可能是近似的或统计的; (4) 一般的, F 的“分形维数”大于它的拓扑维数; (5) 在多数情形下 F 以简单的方法定义, 可由迭代产生。

2.2 分形维数

用以定量表征分形的参数称为分形维数(简称分维), 它是研究分形的主要工具。从分形机理描述的不同层次、方面, 人们已给出了多种分维的定义, 其中Hausdorff维数最为常见。

设 $X \subset E^n$ 是一个非空集合, $\{U_j\}$ 是 X 的 δ 覆盖, $D > 0$ 是一实数, 定义:

$$K_{\delta}^D(X) = \inf_{j=1} \left| U_j \right|^D \quad (1)$$

如果 δ 小于两个完全可分离的集合 E 与 F 的距离, 则有

$$K_{\delta}^D(E \cup F) = K_{\delta}^D(E) + K_{\delta}^D(F) \quad (2)$$

我们将覆盖加细, 即让 $\delta \rightarrow 0$, 由(1)式

$$K^D(X) = \lim_{\delta \rightarrow 0} K_{\delta}^D(X) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\inf_{j=1} \left| U_j \right|^D \right] = \sup_{j=1} \left| U_j \right|^D \quad (3)$$

与(2)式类似的有:

$$K^D(E \cup F) = K^D(E) + K^D(F) \quad (4)$$

称 $K^D(X)$ 为集合 X 的Hausdorff D 维测度, 称使 $K^D(X) < \infty$ 的 D 为Hausdorff维数。其它维数还有盒子维数、信息维数、关联维数等。

2.3 分形空间

设 (X, ρ) 是完备的度量空间, $F(X)$ 是 (X, ρ) 上的非空紧子集构成的空间, $A, B \in F(X)$, 则称 $\rho(x, A) = \min \{ \rho(x, y) \mid x \in X, y \in A \}$ 为点 x 到 A 的距离, 称 $A_{\delta} = \{ x \in X \mid \rho(x, A) \leq \delta \}$ 为 A 的 δ -平行体; 称 $h_{\delta}(A, B) = \inf \{ \delta \mid A \subset B_{\delta}, \text{ 且 } B \subset A_{\delta} \}$ 为 A, B 间的Hausdorff距离。容易验证, h_{ρ} 是空间 $F(X)$ 上的一个度量。在 $F(X)$ 上赋予度量 h_{ρ} , 则称 $(F(X), h_{\rho})$ 为分形空间。

2.4 迭代函数系

迭代函数系(Iterated Function System, 简称IFS)是分型理论和应用的重要内容, 也是分形绘制的典型方法。其基本思想是认定几何对象的整体与局部, 在仿射变换的意义下, 具有相似的结构, 因此, 将几何对象整体定义后, 选取若干仿射变换, 将整体形态变换到

局部, 并且这一过程可以迭代地进行下去, 直到得到满意的造型。

3 国内分形理论在地理学主要领域的应用研究

分形理论从诞生起就与地理学结下了不解之缘。大量的地理学事象, 如: 山脉、水系、河流、植被景观、湖泊、土壤以及城市形态、城市分布、人口分布、交通道路、市场网络等都具有自相似分布特征, 可以用分形理论进行研究。

3.1 分形理论在自然地理学领域的应用研究

3.1.1 地貌学中的应用研究进展

分形思想的产生来源于地貌学, 并在地貌学的肥沃土壤中成长壮大^[11]。许多地貌形态虽然貌似杂乱无章, 但用分形理论来分析即可发现他们仍然具有数学规律, 并能用分形维数来表示。我国学者艾南山、李后强研究了分形地貌(主要是流水地貌及地貌的分形模拟)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、发展和分布的规律的科学”^[12], 还以分形理论为基础对地表现象进行了描述, 并以分数维为中介参数建立地貌现象与其内部机制之间的联系^[13]。艾南山、李后强等从风沙流的含量服从负幂定率分布出发, 提出了风积地貌形成的湍流理论, 并总结出分形地貌学的 8 个基本原理及其中包含的 7 条定律^[14]。分形地貌学的研究内容主要分两大类: 一是特定地貌类型的某些空间分形性质研究, 二是着重分形特征与区域地貌演化关系研究。^[15] 以下从几个方面概述。

(1) 海岸地貌的分形研究。继 Mandelbrot 之后, 有关海岸线的研究又有发展, 在国内, 冯金良等计算出渤海海岸线的分维值为 1.0199~1.1252, 并初步探讨了其分维值的地质意义^[16]。朱晓华等根据分形理论并借助于 GIS 支持, 以江苏省海岸线为例探讨了潮滩不同分界线的分形性质^[17]。认为江苏省大陆海岸线具有分形性质, 其分维值为 1.0696。这既是对海岸线分形性质认识的深化, 而且也表明各空间界线的分维值的差异表征了滩面淤积与侵蚀相对强度的变化。结论指出, 影响海岸线分维值的因素, 除了地质构造外, 岩性、物质组成、海岸动力也扮演了极其重要的作用。

(2) 喀斯特地貌的分形研究。喀斯特地形是一种自然几何形态, 具有强烈的分形特征^[18]。落水洞、喀斯特洼地、喀斯特水系都具有分形特征^[19, 20]。宋林华等以贵州高原中部谱定马官地区和云南高原边缘西畴峰丛-洼地地区为实验区, 研究和探讨了喀斯特洼地发育过程的分形特性。梁虹、卢娟把分形理论与熵理论有机结合起来, 系统地研究喀斯特和非喀斯特流域的干谷水系的分形结构及其熵的地貌意义^[21]。

(3) 流水地貌的分形研究。流域水系、流域水网长度等流水地貌特征常具有分形特征。在这方面国内的研究主要集中于两个方面, 一是紊流和水系的分形特征; 二是水系分形与其他自然现象及过程(如滑坡)的关系。艾南山等将流水地貌与紊流相联系^[11]。并从被侵蚀物质的量的角度来研究地貌发育过程。江永清等将 Horton 定律与水路网分维的理论应用于黄土高原流域水系研究^[22]; 邹谨敏、绍顺妹利用分形几何理论对甘肃中部及其邻近地区进行了水系分析, 发现了分维值的大小反映研究区内发生滑坡灾害的程度^[23]。

(4) 其它地貌类型的分形研究主要有: 湖泊^[24]、冰川冻土^[25]、第四纪沉积物^[26~28]、沙

丘分布及沙漠化^[29]、泥石流^[30]等, 主要侧重于刻画其分形特征及其分维值表示的意义。

3.1.2 土壤地理学中的应用研究进展

分形理论在土壤地理学研究中的应用主要表现在以下几个方面:

(1) 土壤结构的分形特征, 如: 土壤空隙结构的分形特征^[31, 32], 土壤团粒结构的分形特征^[33]。

(2) 土壤结构的分形特征与特殊地理事象过程的关系^[34, 35]。杨培岭等提出了用粒径的重量分布代替数量分布来描述土壤的分形模型^[36]。吴承祯等用此模型对不同经营模式土壤团粒结构的分形特征的研究表明分形维数可以很好地反映土壤的肥力特征^[37]。丁文峰、丁登山对黄土高原植被破坏前后的土壤团粒结构特征进行了研究, 表明分形维数与水稳性团聚体含量之间呈显著性线性关系。赵文智、刘克民、程国栋对土壤沙漠化过程中的土壤分形特征进行研究, 表明在沙质荒漠化过程中土壤的分形维数与各粒径颗粒的含量均显著相关, 得出了随沙质荒漠化的程度的增加, 土壤分形维数降低的结论。

3.1.3 自然灾害中的应用研究进展

自然灾害领域的分形理论的应用主要表现在两个方面, 一是洪水、干旱、海潮、滑坡发生的时间序列的分形特征^[38~41], 另一方面是受灾面积和经济损失的分形特征^[42]。朱晓华等对中国历代灾害性海潮发生的频率特征和时间序列进行了研究。结论表明, 灾害性海潮发生的时间序列具有分形性质, 并探讨了其分维值与历代海潮累积发生次数和累积发生频率的关系及变化趋势。陈亚宁、杨思全对天山麦兹巴赫冰川湖和河冰湖突发性洪水进行了时序分布的分形研究, 研究结果表明洪水突发时序分布具有分形特征。魏一鸣、周成虎等对中国 1949~1994 年洪水灾害成灾面积的时序分形特征进行研究, 结果为建立洪水成灾面积的时序预报预测模型提供了依据。

3.1.4 气候学中的应用研究进展

在气象气候领域, 运用分形理论已经取得了不少进展。著名的洛伦兹吸引子就是一个分形体。另外降水预报因子^[43]、降水的模式和强度、气温^[44]、气候变化^[45]等, 都可以用分形理论来研究。

此外, 在自然地理学的其他分支学科中分形理论也有应用, 如: 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征的分形研究^[46]。

3.2 分形理论在人文地理学领域的应用研究

在人文地理学领域, 分形理论也同样得到广泛应用^[47~53, 98]。在 20 世纪 90 年代之初, 主要是应用于城市地理研究, 后在其他分支也有应用。

3.2.1 城市地理中的应用研究进展

(1) 城镇等级规模分布的分形研究。城镇等级规模分布是一定地区内城镇规模的层次分布, 揭示了一定区域内城镇规模的分布规律^[54], 它反映城镇从大到小的序列与规模的关系。对于给定的一个区域, 其中分布若干聚落, 由于城镇与乡镇之间并无明确的界线, 可以设定一个人口尺度 r 来度量, r 用人口数来表示。显然, 改变人口尺度, 区域城镇的数目 $N(r)$ 也会改变, 当 r 由大变小时 $N(r)$ 不断增大, 当满足关系式

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (5)$$

即区域城镇累积数与人口尺度成负幂律分布时, 可以认为城镇规模分布为分形。类比于

Hausdorff 维数公式可知, 式中 D 为分维, 它在一定时期内为常数。上式经变换可得 zif 公式: $P(k) = P_1 k^{-q}$, 式中 k 为城镇序号 ($k = 1, 2, \dots, N$, N 为系统中的城镇总数); $P(k)$ 是序号为 K 的城镇的人口, P_1 为首位城市的人口, q 为 zif 指数, $q = 1/D$ 。可见, zif 公式具有分形意义。 $D < 1$ 时, 城镇规模分布比较分散, 人口呈不均衡态分布, 中间位序的城镇少, 城镇体系发育不成熟。 $D = 1$ 时, 该区域首位城市人口与最小城镇人口数比为区域内城市总数。 $D > 1$ 时, 城镇规模分布比较集中, 人口分布比较均衡, 中间位序的城镇较多。刘继生、陈彦光讨论了区域城镇规模分布的 zif 模型, 并通过分形结构退化分析将其应用范围加以拓广, 从而与非分形研究接口, 并且引进了分形结构因子, 依此开拓了城镇体系等级结构的 FSF 分析。

(2) 城市体系空间结构与空间相互作用的分形研究。刘继生、陈彦光以河南城市为研究对象, 对城市体系的空间结构进行了分析, 构造了中心城市吸引力模型:

$$F = KR^{D-ds} + A \quad (6)$$

k , A 为常数, ds 为欧氏维数, $ds = 2$, 当 $D < 2$ 时, 中心城市的吸引力从中心向四周逐渐衰减, 呈非线性、不均匀变化, 越向四周衰减速度越快, $D = 2$ 时, 中心城市的吸引力从中心向四周的变化是均匀的; 当 $D > 2$ 时, 中心城市吸引力从中心向四周逐渐增大, 这是一种不正常的现象。此外, 刘继生、陈彦光还提出了城镇体系的空间相关性的分形模型和城市引力模型的一般形式。

(3) 城市边界形态和城市人口的分形研究。研究表明城市边界形态和城市人口分布也具有分形特征^[55~57]。王益谦、王放运用多重分形理论, 探讨了城市人口空间分布模式的刻画方法, 并对人口分布的标度不变性进行了分析。刘继生、陈彦光基于中心地假设, 证明人口的分布区位选择过程与城市的分形形态存在着内在联系, 提出关于区域人口运动和城市演化的三个基本原理: 信息熵原理、异速增长原理和 logistic 发展原理。

(4) 城市化的分形评价。城市化是持续的、动态的、不断深化的, 城市化是经济发展和社会进步的必然结果, 是广域空间普遍存在的现象, 具有普遍性。塔西甫拉提·特依拜、张伟将分形理论用于城市化评价取得了较好的效果^[60]。

3.2.2 交通运输地理中的应用研究进展

城市体系和交通网络的发展是一种空间互动过程。城市体系具有分形几何性质, 交通网络也一定具有自相似特征。刘继生、陈彦光利用分形理论对交通网络进行研究^[58], 结果表明, 分形维数是刻画交通网络空间结构的有效参数, 并系统地阐述了三种分形维数的算法与意义: (1) 长度维数, 表明交通网络密度的变化特征; (2) 分支维数, 表明交通网络复杂性的量度; (3) 关联维数, 网络的通达程度的量度。此外, 有学者利用网络形态覆盖模型, 评价了宁波市交通网络, 取得了较好的效果^[59]。

3.2.5 其他方面的应用

陈彦光、王义民论述了旅游景观的分形结构特征, 解释了其美学实质^[61, 62]。岳文泽等研究了城市郊区土地利用的分形特征, 以分维数为依据分析了各种土地类型的分布形态复杂性和稳定性^[63, 64]。

3.3 分型理论在地理信息科学领域的应用研究

国内分形理论在地理信息科学领域的应用主要集中在地图制图、空间数据压缩和数据模型、遥感图像处理等几个方面。

3.3.1 制图综合

地图制图对象不同于一般的几何体。他们往往具有深刻的地理背景,是复杂的自然现象的客观反映。近年来的大量研究表明,分形理论可有效地用于地图制图领域。我国学者王桥、毋河海利用分形理论,对地图制图的方根规律进行扩展,建立了其分形扩展模型^[65,66]。为制图综合的数量选取开辟了一条新的途径。表1总结了制图综合中的空间分维模型。

表1 地图信息分形描述的空间分维模型^[86]

Tab. 1 The models of spatial fractal dimension of map information				
拓扑维数	分形表达式	参数说明	基于分形理论的地物选取规律 (M 为比例尺分母)	地图综合中的分维数确定方法
零维	$N_1 = C_1 \times R^{-D_1}$	N_1 为点集的点数, C_1 为常数, R 为分辨距离, D_1 为点集的分维	$N_2 = N_1 \times (M_1/M_2)^{D_1/2}$	D_1 可由网格覆盖法确定
一维	$N_2 = C_2 \times S^{-D_2}$	N_2 为曲线的长度, C_2 为常数, S 为分辨距离, D_2 是曲线的分维	$N_{M_2} = N_{M_1} \times (M_2/M_1)^{1-D_2/2}$ (此公式用于一般线状地物) $N_2 = N_1 \times (M_1/M_2)^{-D_2/2}$ (此式用于具有分形特征的线状物体集合, 如河系结构)	D_{21} 可由结构步长法回归确定 D_{22} 可由结构步长法回归确定, 或者用网格覆盖法和Horton定律确定
二维	$N_3 = C_3 \times T^{-D_3}$	N_3 为面积大于 T 的目标数, C_3 为常数, D_3 是面状要素的分维	$N_2 = N_1 \times (M_1/M_2)^{D_3}$	D_3 可先求出图斑集中面积最大的图斑 M 和最小的图斑 m , 在 $[m, M]$ 内对图斑群进行划分, 然后再用线性回归求出

3.3.2 遥感影像处理

遥感影像处理方面的应用主要在以下几个方面: 遥感数据测量^[67~69]、纹理分类^[70~73]、地物识别与图像分类^[74~78]、特征提取^[79~81]等。用分形方法对遥感数据进行分析,从而可以定量地解释遥感影像。主要方法有分线法、方差图法和三角棱柱方法。

3.3.3 地理景观模拟

大量研究表明,自然界许多事物都有自相似性。因此,利用分形理论可以逼真地模拟自然及人文景观^[82~85]。一般采用过程模型进行模拟,目前常用的模型有基于分形迭代的分维布朗运动 FBM (Fractal Brownian Motion) 和基于语法规则的分形方法。

3.3.4 数据模型及数据压缩

根据分形理论的自相似性原理,对影像数据进行高效率的压缩,在人工干预条件下,可以达到较高的压缩比^[86]。在数据模型和数据压缩方面的应用研究有: 遥感图像的分类压缩^[86~89], 地学数据的分形插值^[90~93], 分形与三角网结合的三维地形可视化数据模型^[94]等。基于分形的不同特性,有以下几种分形图像的压缩编码方法: 一种是基于分形的自相似性。这种方法主要是利用迭代函数系来定义分形。这一系统由变换集构成。每一个变换表示一种旋转、平移或缩放,可以产生复杂的分形图像。分形图像压缩是分形图像合成的逆过程,由图像求出其对应的变换公式或一套分形集的过程。一旦确定了这样的一组分形集,图像就由这组非常“紧凑”的分形变换表示。另一种方法是基于分维特性的压缩方法。第三种方法是利用分形几何中, Yardstic 测量弧长的特性来实现压缩。

4 问题与讨论

综上所述,十多年来,分形理论已被我国学者应用于地理学的各分支研究中,并已取得可喜的成绩。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应用,整个科学过程就可以围绕其发展并进入更高层次的研究和解释,分形理论应用于地理学也是如此^[95]。

4.1 分形理论自身发展的局限性

分形理论自 70 年代中期产生以来,尽管取得了很大进展,但其本身还有许多不完善的地方。例如对分形定义及分形对象的争议、使用不同测算方法出现的分维数测算的不统一性等。而且,分形维数作为唯一一个刻画地理事物的性状特征的量,过于单一^[96]。

4.2 国内掌握和利用分形理论的地理学者还不是很多,在应用的内容上具有不均衡性

尽管分形理论在地理学中得到了较为广泛的应用,但对地理学界的大多数学者来说还较为陌生,其在地理学中的应用还处于地理现象的揭示和描述阶段,从分形理论在地理学中的应用的内容上,较多地应用于地貌学、城市地理学、地图学等。而其他大多数地理学的分支则应用较少。

4.3 应用的广度和深度不够

对于许多地理现象来说,其分维数表示的意义还不够明确,而且究竟那些地理现象和过程具有分形性质,那些不具有分形性质,还不能做出满意的回答。另外,如何从分形维数的变化中找出其共同的规律性及其演变机制等方面还有待于做深入的工作。地理现象中的分形主要有空间分形和时间分形。空间上的分形是地理事物本身形态特征、空间结构的分形。时间分形是地理事物的出现在时间轴上具有统计的自相似特征。国内这方面的研究发现了一些地理事象发生的时间序列具有分形特征,但无法解释其发生的内在机制。对此,在研究的方向上,应该在研究地理事象空间、时间分形特征的基础上,向探讨其功能结构、发展机制及信息的方向努力。

4.4 要与其它理论充分结合

地理学的研究对象是复杂的地球表层系统,这个巨系统中充满了支离破碎、没有规则的地理事象及其不可积分的非线性过程。仅用分形理论对其进行刻画和描述是很有限的。因此,把分形理论与其他理论和方法如界壳论 (Jieke Theory)、混沌论 (Chaos Theory)、小波分析 (Wavelet Analysis)、耗散结构论 (Dissipative Structure Theory)、突变论 (Catastrophe Theory)、孤立子 (Soliton Theory)、神经网络 (Neural Network) 等其他理论结合起来进行研究才能取得较好的成果,而这种结合才刚刚开始。

4.5 要充分利用现代技术

GIS 和遥感技术是进行地理学研究的有力工具。判断一个地理事物是否具有分形性质,应当对它进行结构的多层次测算分析,单凭地图是不行的,因为制图综合往往丢失地物的分形信息,而遥感影像却不存在这样的问题。另外,分维值的测算往往比较麻烦,但利用 GIS 技术可以很好的解决这个问题。在利用分形理论进行地理研究的过程中,充分利用 GIS、遥感技术、元胞自动机技术等现代高精尖技术,一定会取得较好的研究效果。国内已有这方面的研究。

5 展望

分形理论作为一种新理论, 有着强大的生命力。它不仅为人们提供了从部分认识整体的方法, 而且进一步深化和丰富了物质世界的统一性原理。由前所述, 分形理论无论在理论上还是在应用上都为地理学带来了新的学科增长点。地理系统属于开放的复杂巨系统, 许多地理问题不是一、两种理论和方法所能解决的, 因此, 分形理论和其他理论、方法、技术的综合应用应该是一个重要的方向。地理事象的发生具有时间序列上的分形特征, 这为预测研究提供了可能。分形维数是具有分形性质的地理事象的度量, 它的大小反映了地理事象空间分布和形态特征的规则和均匀程度, 这为评价研究提供了依据。因此, 预测应用研究和评价应用研究也是一个重要的方向。对地理学者而言, 要借助于分形理论来武装自己, 深化已有的理论, 应用研究成果加深其认识, 提高分形理论的应用总体水平, 拓宽其应用范围。同时还要不断学习新的分形理论, 关注其应用热点, 编写有关教材, 并进行分形方法的理论研究。

可以相信, “分形理论必将为研究地表现象空间结构和时间演化的地理学提供新的有力工具, 由于它对传统数学的革命性, 它被引入地理学, 肯定会引发一场深刻的革命”^[97]。随着更多的地理学者加入分形地理研究及研究的不断深入, 分形理论必将会推动地理学数量化研究的发展, 并给地理学难题的解决提供新的研究线索和途径, 为国民经济建设服务。

参考文献

- [1] 王东生, 曹磊. 混沌、分形及其应用. 合肥: 中国科学技术出版社, 1995, 93~ 99
- [2] 黄登仕, 李后强. R/S 分析与分布式布朗运动. 自然杂志, 1992, 13(8): 477~ 483
- [3] Mandelbrot B. B.. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension, Science, 1967, 150(3775): 636~ 638
- [4] 王桥, 毋河海. 地图信息的分形描述与自动综合研究. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1998
- [5] Mandelbrot B. B. Fractal: Form, chance and dimension. San Francisco: Freeman, 1977.
- [6] Mandelbrot B. B. The fractal geometry of nature. New York: W H Freeman, 1982
- [7] 张国祺, 李后强. 分形理论对世界认识的意义. 大自然探索, 1994, 13(1): 11~ 16
- [8] 陈彦光, 陈文惠. GIS 与地理现象的分形研究. 东北师范大学学报(自然科学版), 1998(2): 91~ 96
- [9] 陈彦光. 地理学: 计量运动的失败和分形研究的崛起. 信阳师范学院学报(自然科学版) 1999, 12(3): 310~ 314
- [10] [英]肯尼思·发尔科内著, 曾文曲等译. 分形几何——数学基础及其应用. 沈阳: 东北大学出版社, 1991.
- [11] 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~ 519
- [12] 艾南山, 陈嵘等. 走向分形地貌学. 地理学与国土研究, 1999, 15(1): 92~ 96
- [13] 艾南山, 李后强. 从曼德尔布罗特景观到分形地貌学. 自然杂志, 1993, 16(1): 13~ 17
- [14] 艾南山, 朱治军等. 外营力作用随机特性和分形布朗地貌的稳定性. 地理研究, 1998, 17(1): 23~ 29
- [15] 张捷, 包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用. 地理研究, 1994, 13(3): 104~ 112
- [16] 冯金良, 郑丽. 海岸线分维的地质意义浅析. 海洋地质与第四纪, 1997, 17(1): 45~ 51
- [17] 朱晓华, 王建等. 海岸线空间分形性质的探讨——以江苏省为例. 地理科学, 2001, 21(1): 70~ 74
- [18] 宋林华. 试论峰丛地貌的双层结构与峰林地貌. 喀斯特景观与洞穴旅游, 北京: 中国环境科学出版社, 1993, 1~ 6
- [19] 宋林华, 程晓平等. 喀斯特多边形发育的形态特征与动力过程研究. 喀斯特景观与洞穴旅游, 北京: 中国环境科学出版社, 1993, 19~ 26

- [20] 宋林华, 房金福等 喀斯特洼地的分形特征研究 地理研究, 1995(1): 8~ 15
- [21] 梁虹, 卢娟 喀斯特流域水系的分形、熵及其地貌意义 地理科学, 1997, 17(4): 310~ 315
- [22] 江永清, 绍明安等 黄土高原流域水系的Horton 级比数与分形特征 山地学报, 2001, 20(2): 206~ 211
- [23] 邹谨敞, 邵顺妹 甘肃中部及邻区水系分形研究结果与滑坡分布的关系 地震研究, 1994, 17(4): 383~ 388
- [24] 赵宏, 赵安 中国湖泊的分形特征的探讨 湖泊科学, 1997, 9(3): 279~ 283
- [25] 易顺民, 唐辉明 冻土粒度成份的分形结构特征及其意义 冰川冻土, 1994, 16(4): 314~ 319
- [25] 徐永福, 孙婉莹等 我国膨胀土的分形结构研究 河海大学学报(自然科学版), 1997, 25(1): 18~ 23
- [26] 周秉根 黄山第四纪泥砾沉积物分形结构特征与成因机制分析 冰川冻土, 1998, 20(2): 180~ 183
- [27] 周秉根 黄山第四纪泥砾沉积物分形结构特征与沉积环境分析 地理科学, 1999, 19(1): 92~ 94
- [28] 朱诚, 于世永等 分形方法在庐山第四纪沉积环境中的应用 地理研究, 1996, 15(3): 64~ 69
- [29] 徐建华, 艾南山等 沙漠化的分形特征研究 中国沙漠, 2002, 21(1): 6~ 10
- [30] 易顺民, 孙云志 泥石流的分形特征及其意义 地理科学, 1997, 17(1): 24~ 31
- [31] 刘松玉, 张继文 土中空隙分布的分形特征研究 东南大学学报(自然科学版), 1997(3): 127~ 130
- [32] 易顺民, 黎志恒等 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义 岩土工程学报, 1999, 21(3): 294~ 298
- [33] 丁文峰, 丁登山 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构的分形特征 地理研究, 2002, 21(6): 700~ 706
- [34] 赵文智, 刘克民等 土壤沙漠化过程中的土壤分形特征 土壤学报, 2002, 39(6): 877~ 881
- [35] 易顺民 滑坡滑动带土的分形特征及其意义 中国地质灾害与防治学报, 1995, 6(2): 21~ 24
- [36] 杨培岭, 罗远达等 用粒径的重量分布表征土壤的分形特征 科技通报, 1993, 38(20): 1896~ 1899
- [37] 吴承祯, 洪伟 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究 土壤学报, 1999, 36(2): 162~ 166
- [38] 朱晓华, 肖彬等 中国历代灾害性海潮频率特征及其时间序列的分形研究 灾害学, 1998, 13(3): 7~ 12
- [39] 杨思全, 陈亚宁 河冰湖突发洪水的分形和混沌特征研究 干旱区地理, 1999, 22(2): 77~ 82
- [40] 陈亚宁, 杨思全等 天山麦兹巴赫冰川湖突发性洪水分形特征研究 冰川冻土, 1999, 21(3): 253~ 256
- [41] 李祚泳, 邓新民等 四川旱涝灾害时间分布序列的分形特征研究 灾害学, 1994, 9(3): 88~ 90
- [42] 魏一鸣, 周成虎等 中国 1949~ 1994 年洪水灾害成灾面积的时序分形特征 自然灾害学报, 1998, 7(1): 83~ 86
- [43] 孔旭, 赵宗彦等 降水预报因子分形特征及其应用的探讨 安徽大学学报(自然科学版), 1995, (4): 41~ 45
- [44] 严绍瑾, 彭永清 一维气温时间序列的多重分形研究 热带气象学报, 1996, 12(3): 207~ 211
- [45] 陈辉, 郭世昌 昆明地区气候变化的多重分形特征 气候与环境研究, 1997, 2(4): 261~ 268
- [46] 张潮生, 章申等 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——空间自相关及分形方法 地理学报, 1998, 53(1): 87~ 95
- [47] 岳文泽, 徐建华等 分形理论在人文地理学中的应用研究 地理学与国土研究, 2001, 17(2): 51~ 56
- [48] 李后强, 艾南山 关于城市演化的非线性动力学问题 经济地理, 1996, 16(1): 65~ 70
- [49] 刘继生, 陈彦光 东北地区城市体系分形结构的地理空间图式——对东北地区城市体系空间结构分形的再探讨 人文地理, 2000, 15(6): 9~ 16
- [50] 刘继生, 陈彦光 城镇体系等级结构的分形维数及其测算方法 地理研究, 1998, 17(1): 82~ 89
- [51] 刘继生, 陈彦光 分形城市引力模型的一般形式和应用方法——关于城市体系空间作用的引力理论探讨 地理科学, 2000, 20(6): 528~ 533
- [52] 刘继生, 陈彦光 人口的区位过程与城市的分形形态——关于城市生长的理论探讨 人文地理, 2002, 17(1): 24~ 28
- [53] 陈彦光, 刘继生 中心地体系与水系分形结构的相似形分析——关于人-地对称关系的理论探讨 地理科学进展, 2001, 20(1): 81~ 88.
- [54] 陈嵘, 艾南山 城市结构的分形研究 地理学与国土研究, 1994, 10(4): 35~ 41
- [55] 许学强, 周一星等 城市地理学 高等教育出版社, 北京: 1996, 125~ 131
- [56] 王益谦, 王放 城市人口分布的分形特征刻画 大自然探索, 1997, 16(4): 72~ 76
- [57] 刘继生, 陈彦光 人口的区位过程与城市的分形形态——关于城市生长的一个理论探讨 人文地理, 2002, 17(4): 24~ 28
- [58] 刘继生, 陈彦光 交通网络空间结构的分形维数及其测算方法探讨 地理学报, 1999, 54(5): 471~ 478

- [59] 丁以中, 楼勇. 分形理论在交通网络评价中的应用. 上海海运学院学报, 1998, 19(4): 7~ 12
- [60] 塔西甫拉提·特依拜, 张伟. 分形理论在城市化评价中的应用——以乌鲁木齐市为例. 新疆大学学报, 2001, 18(3): 257~ 262
- [61] 陈彦光, 王义民. 论分形与旅游景观. 人文地理, 1997, 12(1): 62~ 66
- [62] 陈彦光, 王义民. 分形 $1/f$ 涨落与旅游风景地的美学实质. 大自然探索, 1999, 19(3): 51~ 54
- [63] 岳文泽, 徐建华等. 西北干旱区城郊土地利用结构与分形模型研究. 中国沙漠, 2002, 22(3): 249~ 256
- [64] 岳文泽, 徐建华等. 山区景观镶嵌体的数量特征分析与分形结构模型. 山地学报, 2002, 20(2): 150~ 156
- [65] 王桥, 胡毓钊. 基于分形分析的自动化制图综合研究. 测绘学报, 1995, 24(3): 211~ 216
- [66] 王桥, 吴纪桃. 制图综合方格规律模型的分形扩展. 测绘学报, 1996, 25(2): 248~ 256
- [67] 徐青, 谭光国等. 遥感数据的分形测量. 遥感学报, 1998, 2(3): 186~ 192
- [68] 徐青译. 分析遥感数据的三种分形测量算法的实现和操作. 遥感信息, 1994(1): 38~ 42
- [69] 单勇兵, 赵军等. 遥感图像地物分形测量. 徐州师范大学学报(自然科学版), 2001, 19(2): 53~ 56
- [70] 黄桂兰, 郑邦葆. 模糊聚类分析用于基于分形的影像纹理分类. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(2): 112~ 117
- [71] 张继贤, 李德仁. 基于纹理质地子特征的影像纹理分形分析. 测绘学报, 1995, 24(4): 267~ 274
- [72] 黄桂兰, 郑邦葆. 分形几何在影像纹理分类中的应用. 测绘学报, 1995, 24(4): 283~ 292
- [73] 舒宁. 卫星遥感影像纹理分析与分形分维方法. 武汉测绘科技大学学报, 1998, 23(4): 370~ 373
- [74] 李加洪, 秦勇. 应用分形几何学与小波理论对成像光谱数据进行地物识别的模型研究. 遥感技术与应用, 1996, 11(1): 1~ 6
- [75] 赵军, 李先华等. 北京地区典型地物遥感图像分形研究. 东北测绘, 2001, 24(2): 3~ 7
- [76] 塔西甫拉提·特依拜. 利用分形特征量提高土地覆盖分类图精度的研究. 环境遥感, 1994, 9(2): 150~ 160
- [77] 秦其明, 陆荣建. 分形与神经网络方法在卫星数字图像分类中的应用. 北京大学学报(自然科学版), 2000, 36(6): 855~ 864
- [78] 李后强, 刘政凯等. 基于分形理论的航空图像分类方法. 遥感学报, 2001, 5(5): 353~ 357
- [79] 杨山. 发达地区城乡聚落形态的信息提取与分形研究——以无锡市为例. 地理学报, 2000, 55(6): 671~ 678
- [80] 郑丽颖, 田凯等. 基于分形维数的复杂图像特征提取方法. 哈尔滨工程大学学报, 2001, 22(5): 20~ 23
- [81] 蒋雪中, 杨山等. 云南漾弓江流域城乡聚落形态信息提取与分形分析. 遥感学报, 2002, 6(4): 294~ 299
- [82] 陶闯, 林宗坚等. 分形地形模拟. 计算机辅助设计与图形学学报, 1996, 8(3): 178~ 186
- [83] 张牧. 地形模拟的一种分形几何方法——中心辐射法. 河海大学学报, 2001, 29(5): 60~ 63
- [84] 彭仪普, 刘文熙. 分形地形模拟研究. 长沙铁道学院学报, 2001, 19(4): 95~ 98
- [85] 王琰, 祁燕等. 虚拟场景三维自然景观的分形模拟. 沈阳工业学院学报, 2002, 21(3): 6~ 10
- [86] 吴兵, 葛绍攀. 分形理论在地理信息科学研究中的应用. 地理学与国土研究, 2002, 18(3): 23~ 26
- [87] 宋士仓. 图像数据压缩的分形几何模型. 郑州大学学报(自然科学版), 1996, 28(2): 25~ 29
- [88] 李才伟, 孟宪国. 遥感图像的分形压缩. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(6): 597~ 600
- [89] 倪林. 多波段遥感图像的快速分形编码. 电子学报, 2002, 30(7): 1079~ 1082
- [90] 李才伟. 地学数据的分形插值. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(2): 191~ 198
- [91] 张华国, 黄韦良等. 一种新的地理线要素分形插值方法. 测绘学报, 2002, 31(3): 255~ 261
- [92] 王桥. 地图曲线的分形插值. 武汉测绘科技大学学报, 1995(4): 8~ 13
- [93] 肖高逾, 周源. 基于分形插值的地貌生成技术. 上海交通大学学报, 2000, 34(5): 705~ 707
- [94] 陶闯. 分形内插与DELAUNAY三角网结合的三维地形可视化数据模型. 环境遥感, 1995, 10(10): 204~ 210
- [95] Goudie A. S. Geomorphological techniques. London: Allen & Unwin. 1981, 10
- [96] 李后强, 方曙. 分形理论若干进展. 自然杂志, 1994, 17(2): 103~ 105
- [97] 艾南山. 曼德尔布罗特景观和赫斯特现象——分形理论引发的地理学革命. 见: 辛厚文主编, 分形理论及其应用, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993, 444~ 446
- [98] 刘继生, 陈彦光. 城镇体系空间结构的分形维数及其测算方法. 地理研究, 1999, 18(2): 171~ 178

Advancement of Applied Studies of Fractal Theory in Geography

Q N Yaochen, L U Kai

(College of Environment and Planning, Henan University, Henan, Kaifeng 475001)

Abstract: American mathematician B. B. Mandelbrot introduced fractal theory in the middle of 1970s and it is an effective method for sophisticated problems. Before 1975 mathematicians had found already some fractals, for examples, the Canternary and Peano curves. Since then, it has been applied in almost every field of natural science and social science successfully. Especially in recent years, fractal theory has aroused a great amount of interest and attention from scientists. So-called "fractal" means "irregular, fractional, fragmental" and its core is self-similarity. To characterize fractal, different dimensions are defined according to methods to calculate it. Examples include Hausdorff dimension, capacity dimension, correlation dimension, etc. Fractal theory describes irregular (fractal) objects in quantitative manner. The property of fractals can be mathematically expressed by self-similarity and self-affinity suggesting that the structural phenomena exist at any scale. Fractal dimension as a measure provides geometric property of fractals. In 1986, B. B. Mandelbrot proposed: "the shape whose components are similar to its entirety is called fractal" and "fractal is inflexibility under nonlinear transformations". We can define a fractal assemblage as:

$$N_n = C/r_n^D$$

Where N_n is the number of the objects whose measurement scale is r_n , C is ration and D is fractal dimension. In this paper, the main contents of fractal theory are introduced firstly; then based on a great number of correlative papers the domestic conditions of applications of fractal theory in geography are reviewed; finally the problems concerned are discussed and future applications of it are also prospected.

Key words: fractal theory; fractal dimension; geography; advancement