

# 关于地学中分形理论应用的思考

朱晓华,王建,陆娟

(南京师范大学地理科学学院,南京 210097)

[摘要] 自曼得尔布罗特(Mandelbrot B. B.)于 20 世纪 70 年代中期提出分形与分维的概念以来,分形理论已在包括地学在内的众多学科领域得到了广泛的应用.本文在总结大量有关研究文献的基础上,对分形理论的产生对系统自组织理论的完善及其对深化地学研究的方法论意义进行了必要的总结,并对分形理论在地学中的应用做出了简要的概括.在此基础上,针对应用现状,对应用中存在的问题以及其未来的应用方向与发展前景等进行了必要的评述、讨论和展望.

[关键词] 分形,分维,地学

[中图分类号] P91; [文献标识码] A; [文章编号] 1001-4616(2001)03-0093-06

## 0 引言

分形理论是由法裔美国科学家曼得尔布罗特(Mandelbrot B. B.)于 20 世纪 60 ~ 70 年代创立的,它的产生,加深了人们对自然界不规则几何体的认识,使人们能够借助于事物内部的自相似性(Self-similarity)来洞察隐藏于混乱现象中的精细结构,为人们从局部认识整体,从有限认识无限提供了全新的思路和描述工具.分形理论目前已经在包括地学在内的众多学科领域取得了广泛的应用.本文即是在总结大量相关研究文献的基础上,对分形理论的产生对系统自组织理论的完善及其对深化地学研究的方法论意义进行了必要地总结,并对分形理论在地学中的应用做出了简要地概括.在此基础上,针对应用现状,对应用中存在的问题及其未来的应用方向与发展前景等进行了必要的评述、讨论与展望.

## 1 分形理论对系统自组织理论的完善及其对深化地学研究的方法论意义

分形理论的建立,由于提出了一系列新的观点和解决了一系列原有难题,所以在一定程度上完善了系统自组织理论.分形理论的建立把人们的注意力引向了研究那些不能用通常的长度、面积、体积等测度来表示或描述的非规则几何体的性质,使人们能用更贴近自然的语言来描绘自然.分形理论主要用于研究复杂系统的自相似性,借助它,可以通过少量信息来重现原来的研究对象,不仅具有指定信息少、计算容易和重现精度高的特点,而且它通过对系统整体与部分相似性的研究,试图找到介于有序—无序、宏观—微观、整体—部分之间的新秩序,从而深化对于系统的此类关系的理解,以及对于物质世界多样性的统一认识.

收稿日期 2000-02-26

基金项目 教育部“教育振兴计划”青年教师奖励基金和江苏省“333”工程跨世纪学术带头人人才基金项目.

作者简介 朱晓华,1972—,南京师范大学地理科学学院博士研究生,从事综合自然地学的学习与研究.

万方数据

分形理论的建立,不仅对系统自组织理论是一种完善,而且对深化科学研究还具有重要的方法论意义。从哲学的层面上讲,分形理论借助于事物内部的自相似性质来洞察隐藏于混乱现象中的精细结构,为人们从局部认知整体,从有限认知无限提供了新的途径;同时,亦为不同学科发现的新的规律性提供了崭新的语言和定量的描述,为现代科学的深入发展提供了新的思路和方法。

从认识事物的途径或思考问题的方法来看,分形理论与系统论分别体现了从两个端点出发的思想。系统论由整体出发确立各个部分的系统性质,沿着从宏观到微观的方向考察整体与部分之间的相关性;而分形理论则是由部分出发来确立整体的性质,沿着从微观到宏观的方向考察部分与整体之间的相关性。系统论强调了部分依赖整体的性质,体现了从整体出发认识部分的思想;而分形理论则强调了整体依赖于部分的性质,体现了从部分出发认识整体的方法。于是,系统论与分形理论构成互补,相互辉映,极大地提高了人类对自然的认识能力和水平。

对传统数学而言,已对那些可用经典微积分方法进行研究的集类和函数作了深入的讨论,但对那些不十分光滑或不规则的集合和函数则认为其是“病态”的或“妖魔”的而不予理睬。现在,这种情况开始出现了改变,人们不但认识到许多“不光滑集”很值得研究,而且用它们来描述自然现象要比经典的几何图形好得多,分形理论的产生则为进行这类描述提供了有力的工具。分形理论使人们能以新的观念、新的手段来处理扑朔迷离的无序的混沌现象和不规则的形态,揭示隐藏在复杂现象背后的规律,以及局部和整体之间的本质联系。

正是基于分形理论对哲学发展的贡献,以及其在各个学科中的巨大实际应用效果,它不仅显示出了巨大的存在价值,而且人们也由此把它作为20世纪70年代科学上的三大发现之一。美国著名物理学家惠勒指出:“可以相信,明天谁不熟悉分形,谁就不能被认为是科学上的文化人!”

分形理论的产生,来源于曼得尔布罗特对自然界长期的深入观察和思考,可以相信,以大量地理现象为研究背景而产生的这一理论必将在地学中做出进一步的深入应用,并为深化地学相关研究,为推动地学的创新与持续发展做出有力的贡献!

## 2 分形理论在地学研究中的应用概述

分形理论的产生,最初源于曼得尔布罗特对自然界大量而长期的观察、思考,它产生的过程,可以说是通过在地学中的逐步应用而逐渐成熟的过程。分形理论的产生,使得现代科学可以超越传统科学的束缚而对自然界中复杂事物的描述变得轻松自如,用分维来描述复杂的自然和人文现象,已经取得了很好的效果。这一方面极大地促进了分形理论本身的发展,另一方面也加深了地理现象的认识,并引出了新的有待解决的问题,进而推动了地学的纵深发展和逐步完善。大量相关研究已经揭示出了众多地理现象的分形性质。在地貌学领域,运用分形理论研究了地表面的起伏,例如山地的起伏形态,以及它们产生、发展、分布的规律等,已经形成了分形地貌学(fractal geomorphology)这一地貌学新的分支,它不仅以分形理论为基础对地表面(特别是山地表面)的形态进行了描述,而且还进而以分维为中介参数以建立山地起伏等地貌现象与其内部机制之间的联系,用以探讨分形布朗地貌的演化规律,认为分维可以成为描述地表面粗糙度的良好指标。分形地貌学除去研究了地表的起伏之外,还大量探讨了山系、断层系的空间展布以及喀斯特洼地、峡谷高边坡的稳定性、地表水系、地下渗流、海岸线、湖泊、湖岸线等的分形性质。同时,运用分形布朗运动随机分形生成逼真景物的方法,借助于分维可用以产

生各种各样的自然景观,自然界中的山地起伏、山脉的形状以及海岸线、湖岸线、河流等都被形象而逼真地模拟了出来。在灾害学领域,滑坡、泥石流等山地灾害的发生、旱涝灾害的发生、地震的发生、灾害性海潮的发生、历代灾害造成的伤亡人数、受灾地区的分布及面积大小、灾害造成的经济损失等都被揭示出是具有分形性质的。在人文地学领域,分形理论也同样取得了一定的应用。用分形理论已经探讨了类似于海岸线的城市边界线的分形特征,探讨了城市等级体系和城市规模分布的分形特征;另外,城市道路网的分布、城市商业网点的布局、城市人口的分布以及城镇土地利用类型的空间展布等,它们的分形性质也都被相关研究所揭示和证明。除此而外,分形理论还在沙漠定量化研究、长江水系沉积物重金属含量空间分布特征、旅游景观的设计布局以及与地理位置有关的金矿矿位、油田井位的位置和储量的确定等方面也做出了实际性的探索和应用。

总之,分形理论在地学中的大量应用已经揭示出了众多地理现象的分形性质,结合已有知识,它把对客观世界的认识向前推进了很大的距离。

### 3 结论、讨论与展望

结合分形理论在地学中的已有应用,综合而言,关于其应用中存在的问题以及其未来研究方向与发展前景等有如下一些认识:

(1)从分形理论在地学中的已有应用可以看出,分形理论对地学界的大多数学者来说仍是一个较为陌生的领域,分形理论在地学中的应用还不够深入,基本上处于对地理现象分形性质的揭示阶段,而且,即使是这一点也还是做得不够。为了促进地学的创新与持续发展,更好地迎接新世纪的挑战,接下去的首要任务是进行地理现象分维的普遍测算,以确定哪些地理现象具有分形性质,哪些不具有分形性质?各种不同地理分形现象的无标度区间和分维是否存在数量上的关联、时空上的联系?不同地理分形现象的分维能否作为进行横向比较的参数?等等,并从具有分形性质的地理现象的分维变化中寻找出某些规律性。

对于分形理论在地学中的应用来说,一些学者认为当前地学中的分形研究应主要是进行地理现象的分形机理研究。笔者认为这一提法值得商榷,目前尚不宜大力提倡,因为没有对大量地理现象分形性质的普遍认识,不透过大量的分形现象去认识分形本质(即分形机理)是不可能的。所以,进行地理现象分维的普遍测算应当是当前地学中分形应用研究的首要任务。同时,鉴于分形理论在地学中初步应用的现状,当前应尽可能地组织熟悉这一理论的研究人员编写切合本、专科生及研究生水平的权威教材,同时在有条件的高校地理专业中开设相关课程,以拓宽学生的思路,积极进行地学后备研究人才的培养。

(2)关于地学中进行分形应用的方法研究,关于应用分形理论进行相关研究的意义目前虽然逐渐得到了大多数研究者的共识,但是分形的严格定义、分形无标度区间的严格界定以及进行地理现象分维计算的方法等仍是值得深入探讨和完善的。一方面有关于关联维、容量维、信息维等多种维数的各种定义,另一方面又有基于这些不同定义的不同分维计算方法,例如改变量测尺度的方法(The method of changing yardstick)与计盒法(Box-counting method)等,虽然这些定义或方法都是基于分形自相似性的本质,但是在实际的计算中各个不同的分维计算方法及其结果之间却是存在着一定的差异的。目前关于如何严格计算与确定分形性质存在的无标度区间、应用不同的分维计算方法计算所得的分维究竟有什么差异以及如何解决等均少见探讨,所以,如果地学中的分形应用研究不能解决研究方法这一基本问题,可以说分形应用研究势必是

很难继续深入下去,因为没有完善可行的研究方法,就难以得到严格的并经得起反复推敲的研究结论。

(3) 深化已有理论应用研究成果,加深对某些专题问题的认识,以期提高地学中分形理论应用的整体水平,而这对于推动地学中分形理论的纵深应用无疑具有重要意义。例如运用分形理论,地震在时间、空间和能量这三个方面的分形性质已经被初步揭示了出来。就地震发生的时间序列的分形研究而言,主要是探讨了大震发生前,主震附近小震活动与大震发生之间的关系,希望根据小震活动时空分布异常变化特征来预测预报中强地震,即试图用小震分维这一定量指标来描述震兆关系。我国一些学者研究了我国历史上长时间和高震级的地震,以及近几十年来我国发生的几次强地震前小震活动时间分维统计变化特征。他们在分析华北地区 1970~1988 年 12 次中强地震前的小震活动时间序列时发现,华北南部 5 次中强地震前根据不同起止时间做出的 90 个时间序列的统计结果中,有 52 个时间段存在着分形性质;华北北部 7 次中强地震前根据不同起止时间做出的 75 个时间序列的统计结果中,有 35 个存在分形性质。通过对唐山、海城等具体震例的研究还进一步发现,当大震即将来临时,地震的分维会出现低值异常,而在震后分维又会变大。所以,强震前小震活动分维的变化,可能作为地震发生趋势判断的一个具有一定统计意义的前兆指标。就地震空间分布的分形性质而言,应用分形理论主要是揭示了地震震中分布的分形性质。通过研究发现,在大震发生前,中小地震的空间分维比较低,而在大震后余震的空间分维则较高。同地震在时间、空间方面具有分形性质一样,地震的能量分布也是具有分形性质的。通过对唐山等震例的研究,发现地震的能量分维也有可能成为地震预测预报的新指标。

对大震发生前后分维变化的探讨,虽然地震的分维在大震发生前后会出现高低值的变化,但不同学者对此种变化的具体过程的认识是不尽一致的,所以应下力气研究出对地震预测预报具有独立意义的指标,而不应是局限于用分形理论去诠释已有的地震预测预报指标。郭建增等(1991a)认为,对某个动态系统来说,分维结构是一种兆示系统随后有重大不稳定发生的结构,并据此提出了无偏分维这一具有独立意义的临震指标的概念。上述这些相关认识对现今在地震领域和其它领域中进行分形理论的探索仍具有重要的指导意义。

(4) 及时关注分形理论的新进展和发展热点,不断开辟新的研究及应用领域。例如就地学中分形理论的应用而言,新的研究热点将是时间序列的分形分析,即借助于关联维数和饱和嵌入维数,确定模拟相应动力系统所需的基本变量数目的上限和下限,然后计算出 Lyapunov 指数和 Kolmogorov 熵,得出对该时间序列进行预测的平均预报时间和最大可能预报时间,再基于 R/S 分形分析,探讨该时间序列的变化趋势(即探讨现在和过去的相关性,是正相关还是反相关,或是不相关;同时,  $H$  赫斯特指数与  $D$  关联维/ $m$  饱和嵌入维之值应接近,所以二者可以用来互相映证)根据上述得出的基本变量数目的上限和下限,确定变量数目,进行数学建模,进行未来时间序列数值的预测和预报。这一研究方向的深入,既可加深对时间序列分形性质的认识,深化对地理现象的认知,也可以为政府等部门正确决策提供必要的参考数据,具有重要的理论和现实应用价值。地学中这一方面已有的一些应用,要么仅计算了关联维和饱和嵌入维,要么仅计算了赫斯特指数,目前尚缺乏综合性的分形分析,在数学建模方面则更少见探讨。

(5) 积极开拓分形理论在实际领域之中的应用,以期实现实际的应用推动理论研究的进展。例如,60 年代初科学家 Richaron 曾指出:西班牙和葡萄牙之间的国界线由于测量标尺的不同,两国的测量结果竟有 20% 的偏差。基于此,则可考虑建立客观而能普及的测量方法,以用



于实际生活中的区域边界的同标准测量.基于这一思路,笔者探讨了不同比例尺下江苏省海岸线长度的分形标定问题,建立了不同比例尺下海岸线长度与各个比例尺之间的关系式: $\lg(L/k) = -1.029 \lg k + 2.9544$  (式中: $k$ 为比例尺, $L$ 为不同比例尺下海岸线的长度).这一公式无疑对科学标定江苏海岸线的长度,合理利用海岸线资源以及在制图综合等方面均具有一定的参考价值.同时,笔者认为,进一步的深入研究应该是探讨点、线、面等地理现象在不同比例尺地图下信息的分形变化特征,并总结出相应的规律,并用以指导实际应用.

(6)加强分形理论与其它非线性理论的关系研究,深入探讨分形理论对它们的深化以及对加强地学研究的实践意义.例如,界壳论的研究认为,当界壳要素与系统状态有非线性作用时,系统的动态方程就会出现非线性项,由于界壳对系统存在、发展与演化的重要作用,所以系统出现自组织现象可能源于界壳控制的结果,进而系统的界壳也可能是一种分形结构.关于这一仍不太确定的推论,笔者认为可以从近年来的大量分形研究中得到一定程度的验证.这些分形研究已经揭示出大量自然系统与人造系统的边界都是具有分形结构特征的,那么它们的界壳是否具有分形结构特征就在一定程度上得到了回答.同时,对于某一区域范围内的海岸线来说,它具体由河流入海口和其它部分海陆交界线所组成,但以往对海岸线的分形研究,是忽视河流入海口这一界门存在的,通过一定的河口处理原则,将其视为海岸线的一部分,再用计盒法等来计算其分维.这类相关的研究成果的确深化了对海岸线特征的认识,是对传统研究方法的一种升华,但值得提出的是,河流入海口实际上是海岸线的不连续区,是海洋系统与陆地系统之间进行物质、能量、信息交换的主要场所,所以,海岸线的这些“中断”,即界门的出现,除去功能与结构的原因之外,是否还受某种随机因素的控制?这些含有“中断”(界门)的自相似形的数学内涵是什么,能否构造出相应的数学模型?这些问题对数学和地学而言,都是很有吸引力的新领域.其实,对城市边界的分形研究来说也存在着类似的问题,以往这一方面的分形研究也是忽略了基于物质、能量、信息而定义的各个界门的存在的.总之,在运用分形理论对海岸线、城市边界线等系统边界进行研究的基础上,再运用界壳论来深化已有研究成果,这一方面丰富了分形理论和界壳论本身,另一方面也进一步深化了问题,提出了新的有待解决的命题.

(7)进行地理现象为何具有分形性质的机理研究.这既是地学中分形理论应用研究的根本目的之所在,也是推动地学向前深入发展的关键.在对地理事物或现象的原有认识的基础上,结合新的分形认识,必将能逐渐达到对地理事物或现象的更加全面而深刻的认识.例如,大量研究虽然揭示出了粒度、山系、水系、断层系等众多地貌现象是具有分维的,但是目前的研究还不能够解释或说明为什么从宏观到微观的地貌现象都存在着一定标度域内的分形性质,究竟是什么因素控制或导致了如此的结局,其最终的机理究竟是什么?再者,有研究认为分维可以作为水系、城镇等体系演化的指标,但是为什么分维可以成为系统演化或优化的量度指标?这些都是有待进一步深入研究的课题.所以,对于进行分形机理研究,笔者认为一是不可操之过急,在目前对大量自然和人工分形体分维存在的具体意义尚不明确现状前提下,根本谈不上对其内在成因机制的深入认识,所以应在加强对地理现象分形性质普遍发现或揭示的基础上,遵循现象与本质之间的辩证关系,渐进进行地理现象的分形机理研究.例如,对于海岸线的分形研究来说,不可能一下子就涉及所谓的分形机理问题,这固然是研究的最终目的,但是盲目提及这样的目标会造成研究目标的偏差或迷失,目前该做的应是积极深化对海岸线已有的分形认识,并将之拓展到对海岸带不同潮滩分界线的分形认识,进而深入探讨海岸带物质组成、岩性、构造以及海陆动力等对海岸线分维的具体影响,这样才可能渐进对海岸线的分形机理研

究.二是应加强分形理论的地学应用对深化自然界和人类社会自组织结构或现象的意义的研究.因为分形是系统自组织的客观量度,所以可通过分形理论在认知地理现象分形性质中的应用,来发现规律性的东西,进而来丰富系统自组织理论,并反过来进一步指导地学实践.例如,在灾害学领域,大量研究已经揭示出了旱涝灾害的发生、地震的发生等都是具有分形性质的,那么是什么因素使得人地复杂巨系统中各个因子的相互作用结果是符合分形规律的?这对于深化对自然界的自组织现象的认识有何裨益?这一方面已有的一些研究结论较为简单.实际上,以上这两个方面是紧密相连的,前者是基于学科应用分形理论的最终应用目的的思考,而后者主要是一种基于哲学高度的思考,前者往往对后者的深化和升华具有启发作用,而后者又能在方法论的高度上对前者予以必要的指导.

总之,大量地理现象的分形性质无疑是客观存在的,同时分形理论的产生和发展,为深入进行地学研究,探索自然界的时空复杂性提供了新的理论工具,可以预见在不远的将来,随着大量地学工作者对它的逐渐了解和熟悉,分形理论必将在地学中取得更广泛、更深入的应用,并为地学的创新与持续发展做出重要的贡献!

致谢:本文的完成参考了 121 篇相关研究文献,但鉴于篇幅,未能一一列出,在此特予以说明并表示深深的谢意.

## Some Thinking about the Application of Fractal Theory in Geography

Zhu Xiaohua ,Wang Jian ,Lu Juan

(School of Geographical Science ,Nanjing Normal University ,Nanjing 210097 ,PRC )

**Abstract** Since Mandelbrot presented the concept of fractals in 1970 's ,it has been applied widely in various study fields ,including geography .Based on many papers which are about applications of fractal theory in geography ,the methodological significance of fractal theory to deepen studies of geography is summarized briefly in this paper .At the same time ,the conditions of application of fractal theory in geography are also summarized .According to all as above ,it is suggested that the correlation between geography and modern fractal theory is a trend which is to be .Further more ,some aspects and its prospect which are about the application of fractal theory in geography are discussed too .

**Key words** fractal ;fractal theory ;geography

[ 责任编辑 陆炳新 ]