DOI:10.13758/j.cnki.tr.2007.05.001

分形理论在土壤肥力研究中的应用与前景①

蒋先军 [1]， 李 航 [1]， 谢德体 [1]， 魏朝富 [1]， 熊海灵 [2]

(1 西南大学资源环境学院，重庆 400716； 2 西南大学计算机与信息科学学院，重庆 400716)

摘 要： 分形理论的提出对于定量描述复杂的、高度不规则的系统特征与机理提供了方法。本文从土壤腐殖质、土壤微生物、土壤团聚体等方面回顾了分形理论在土壤肥力研究中的主要结果：土壤腐殖质胶体在不同条件下形成不同分形特征的聚合物；同一种微生物可能形成具有不同分形特征的结构；土壤中的有机无机胶体在不同条件下凝聚成不同的团聚体，从而形成不同的土壤结构并对其肥力功能产生影响。我们认为分形理论在探索土壤的形成过程和肥力功能上将具有重要的应用前景：如团粒结构体的形成可能是由土壤胶体分形凝聚而成；土壤中的活性有机质有逐渐老化的现象，可能和腐殖质胶体由结构疏松的分形结构向普通团聚体过渡的过程有关；土壤微生物在不同微环境下具有不同的分形特征，可以推测在各种土壤过程（包括物理、化学以及生物化学过程）中它们的功能也可能是不一样的。此外，土壤结构的开放程度决定孔隙、水分以及空气的分布，从而决定了微生物的生存空间。所以土壤结构体对微生物空间分布的影响也是将来该领域值得研究的内容之一。

关键词： 分形特征；土壤有机质；土壤微生物；土壤结构；土壤肥力

中图分类号： X131

1967 年，Benoit B. Mandelbrot 在《Science》上发表了“How long is the coast of Britain”的论文，首次提出了分形理论。1977 年和 1982 年又发表了《Fractal: Form Chance and Dimention》、《The Fractal Geometry of Nature》两部专著。Mandelbrot 突破了传统的欧几里德空间几何，如欧氏几何中有一维（线）、二维（面）、三维空间（体），Mandelbrot 则提出了分形（Fractal）的概念来研究具有自相似性（self-similarity）的自然碎片或不规则结构，认为物体的空间维数不仅可以是整数（欧氏空间），也可以是分数。一个分形物体最主要的特征是它的“不规则程度”(the degree of irregularity)，与尺度的大小无关，即具有自相似性：该结构可以按不同尺度被分解成许多个部分，每个部分都和整体结构相似 [1-2] 。

在非平衡态热力学条件下，当系统经历非线性的动力学过程时，可形成具有分形特征的结构体。而将分形理论应用于具有非平衡、非线性特性的土壤学领域，是土壤科学发展的新动向[3-5]。本文围绕土壤肥力，从土壤有机质、土壤生物以及土壤结构的分形研究等方面加以总结讨论，并提出一些研究思路，对分形理论在土壤肥力研究中的前景进行展望。

1 土壤有机质的分形

腐殖质是土壤有机质最稳定的活性组分，包括胡敏酸（humic acid，HA）、富里酸（fulvic acid，FA)、胡敏素（humin)；是由各种大小分子和团聚体构成的混合物。腐殖质的典型特征如下：①缺乏离散的结构组织以及在分子和超分子水平上的无序性；②各种桥、键、功能团的随机组合以及具有大分子侧链；③在尺度和形态上存在较大的差异，意味着在固体或胶体态下分子结构有不同的构象、孔隙度和紧实度；④在液态介质中发生复杂的团聚和分散现象；⑤表面的不规则和粗糙程度各异。

由于以上特点，腐殖质代表了土壤中自然形成的一类可以用分形的概念和方法来描述的物质。常用的研究方法有：可见光或激光散射（visible or laser light scattering），小角度 X 射线散射（small-angle X-ray scattering，SAXS)，以及小角度中子散射法(small-angle neutron scattering，SANS)。

Österberg 等[6]在实验中测定了 HA 溶液在不同条件下的分形维数 D：HA 溶液在 11℃ 时 $D = 2.3 + 0.1$，而在 4℃ 时 $D = 1.85$。在 22℃下，D 值随着时间的增加而增大，1 h 后 $D = 1.85$，11 h 后 $D = 2.15$，34 h 后 $D = 2.30$，60 h 后 $D = 2.35$。D 值为 1.85 表明最初的团聚过程是快速的由扩散控制的多级聚集 (diffusion-limited cluster-cluster aggregation，DLCA) 过程，形成松散结构并包含大量的束缚水。在较高温度（22℃）下 D 值较高，并随时间的增加而增加。这表明最初松

①基金项目：国家自然科学基金（40501033）和重庆市教委科学技术研究项目（自然科学类）(KJ050205）共同资助。

作者简介：蒋先军（1970—），博士，教授，主要从事土壤肥力与生态、土壤生物与生物化学的研究。E-mail: jiangxianjun@swu.edu.cn

散的结构群通过慢速的由反应控制的多级聚集（reaction-limited cluster-cluster aggregation，RLCA）过程，经过结构重组后变得紧密，并将最初束缚的水分子释放出来。温度的增加可以增加 HA 微粒的动能，这种动能增加可以克服 HA 微粒中带负电荷的羧酸盐的相互作用力从而使结构重组和吸附聚合作用更容易发生。作者总结出 HA 的平均半径为 40 ~ 50 nm 的团聚体由半径＜2.5 nm 的构造单元组成。另一个采用 SANS 做的实验中，土壤 HA 的溶液浓度为 C 15 mg/ml、pH 值为 7.0，在这种条件下，D 值为 2.99 和 2.46，这表明 HA 的相对紧密的结构是存在的[7]。

采用动态光散射（DLS）和动态标度理论（dynamic scaling theory），Ren[8] 和 Tombácz[9]等研究认为土壤和泥煤 HA 组分是一种弱的多分散相，因此其分形维数可以用 SAXS 数据直接计算。由于指数 $\alpha \leqslant 3$，散射粒子的质量分维 $D_m = \alpha$ [10]。随着浓度的增加，泥煤 HA 大颗粒组分的质量分维 Dm 轻微增加，由 $D_m = 1.09$ 增加到 $D_m = 2.23$ [9]。在低浓度条件下，松散、海绵状的分形结构在高浓度下空隙减少，从而形成大的结构单元 (50 ~ 100 nm)。泥煤 FA、泥煤 HA、土壤 FA 和土壤 HA 的 D_m 值分别是 2.2、2.5、2.3 和 2.6[11]。采用质量分形维数的值可以描述土壤中 HA 的分形凝聚，这是一个慢速的 RLCA 过程，因为多级聚合的 HA 胶体必须要克服可能是由腐殖质颗粒的负电荷之间产生的斥力才能形成较大的聚合物[8,11]。

Rizzi[12]采用高清晰度 TEM 显微图对几种土壤和泥煤的HA溶液在不同条件下的分形特征进行了研究，发现：在所有的实验条件下，HA 聚合物的质量与大小的对数图象为直线，该直线的斜率为分形维。当 pH 为 3，经过 4 ~ 10 h 的平衡后，HA 聚合物的分形维数 D = 1.7 ~ 1.8，与反映快速聚集过程的 DLCA 模型相吻合。当 pH 值为 6，平衡时间较长（28 h 以上）时，D 值约为 1.95，与 RLCA 模型吻合，为更紧密的聚合物。pH 值为 3 时，HA 的功能团质子化程度较高，降低了 HA 颗粒负电荷之间的斥力从而导致了快速聚合过程的发生；pH 值为 6 时，HA 大量酸性功能团的去除质子化导致 HA 颗粒之间以静电斥力为主，表现为慢速聚合过程。

综上所述，腐殖质胶体的聚合过程受环境条件的控制，在不同条件下形成不同分形特征的聚合物；并可能对胶体的性质和功能产生影响。采用不同粒径来分组土壤有机质的研究也表明，在不同粒径分布的有机质供应 N 的能力也不相同 [13]。土壤中的活性有机质有逐渐老化的现象，可能也和腐殖质胶体由结构疏松的分形结构向普通团聚体过渡的过程有关。

2 土壤微生物分形

土壤中有着各种各样的微生物。在大多数土壤中，真菌的生物量远多于其他种类的微生物，但细菌、放线菌等这些在数量上不占优势的微生物在 C 和矿质元素循环中却起着很大的作用。在过去 20 年中，土壤微生物生态学家主要在研究怎样定量描述微生物的量，研究结果已经可以知道“微生物有多少”，但难以说明某一种微生物在一些重要的土壤过程中究竟起什么作用[14]。

生物的繁殖方式是确定其生态作用的主要因素。按此可分为 2 种有明显区别的种类：一种为以高等动物为代表的单一固定的繁殖方式；另一种为结构相似性增长方式：包括苔藓虫、珊瑚虫、海鞘类、植物、真菌和细菌等，这类生物具有分支结构，而且没有固定的生殖模式，其子代甚至可以附着在母体上生长直到能成为独立的个体[15]。和自然界中许多不规则的结构一样，结构相似性增长的生物结构通常可以用分形几何来描述[2,16-17]。有些生物个体内部结构紧密，只表现为表面分形，而有些生物在结构内部有空隙，有菌落，表现为质量分形。因此可以用质量分维（Dm）和表面分维（Ds）来分别描述其分形特征[18]。

现有的工作从两个方面对微生物在自然界中的分形特征进行了研究。①采用数学模型研究不同浓度底物下微生物的生长模式，例如：真菌[19-21]，细菌[22-23]；②应用分形几何学来定量描述微生物在不同的环境中特定的菌落之间及其内部的形态变化。真菌和细菌的形态在传统的人工培养基上很容易观察，但在土壤和一些不透明的介质中直接观察其形态还很困难。

2.1 细菌

细菌和酵母的菌落在不同的环境下表现出不同的形态特征，如培养基的固化程度、营养物质浓度以及温度变化等[22,24-26]。如枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*）的菌落生长模式为菌落呈圆形生长，有着紧密的分支结构。菌落生长成紧密的环状结构或分形结构取决于琼脂或营养的浓度[26]。研究表明在较低的营养浓度下更容易出现分形结构[25-26]，可能是因为分形结构因具有最大的开放度而更有利于微生物吸收营养物质。在琼脂培养基中，鼻克雷伯氏杆菌（*Klebsiella ozaenae*）的 Dm 值在 1.6 左右[27]，枯草芽孢杆菌，大肠杆菌（*Escherichia coli*），鼠伤寒沙门氏菌（*Salmonella typhimurium*），肺炎克雷伯氏杆菌（*Klebsiella pneumoniae*）以及黏质沙雷氏菌（*Serratia marcescens*）的 Dm 为 1.7 ~ 1.8[25,28]。 以上研究结果说明了在不同环境条件下多个细菌可以聚集在一起形成具有不同分

形特征的结构体。

2.2 真菌

真菌在琼脂上可以产生分形菌落，真菌的分形特征在不同种类，或同种不同基因型之间相差很大，而且与环境条件以及生长时间有关。通常在芽孢萌发初期，D 值较低，然后会上升。如蜜环菌（*Armillaria gallica*）在芽孢萌发 72 h 后，D 值在 1.05 ~ 1.20 之间，116 h 后 D 值在 1.47 ~ 1.57 之间[29]。

在土壤生态学研究中，较多地采用真菌的分形维数来描述土壤中的菌丝系统。在多数研究中，考虑到菌丝多在二维而不是三维的空间生长，都将压缩过的土壤放在培养皿里以保证菌丝只能在土壤表面生长，便于拍照和分析[30-31]。这样的研究方法虽然和正常的土壤环境有区别，但是由于在土壤和植物根系以及凋落物界面，真菌菌丝很难生长成大的群落，这种简单的模式是一个良好的开端。采用反应-扩散（reaction-diffusion）模型的研究表明，真菌菌丝的生长在三维空间和在二维空间有很大的差别[32], 而且有实验显示菌丝在土壤表面的生长速率远远大于在土体中的生长[33]。因此，将来的研究应该在三维空间的非压缩土壤里进行，如可以采用破坏性的连续分段采样。

不同种类的菌丝真菌具有不同的分形特征，如黄金菇（*Hypholoma fasciculare*），以及球盖菇属的 *Stropharia caeruler* 和 *S. aeruginosa*，在初期生长阶段表现为表面分形，而其他的一些如田头菇属（*Agrocybe gibberosa*），鬼伞属 （*picaceus*），阳物像（*impudicus*），普哈哈特属 *velutina* 和 *Resinicium* 则表现为质量分形[30,34-35]。此外，真菌菌落的分形维数随时间而改变：在较长的生长时期内，当菌丝发展到可以覆盖较大的面积（几个cm^2）的时候, 其分形特征从最初的表面分形越来越趋近于质量分形[31,34-35]。

土壤中的微生物属于低等生物，繁殖方式多样，从而产生了不同的结构。在不同的环境条件下，不同的生长时期，同一种微生物可能具有不同分形特征的结构，也可能对其功能产生影响。所以，在研究各种土壤生理生化过程时，考虑微生物结构的分形特征的影响应该是值得研究的内容之一。

3 土壤肥力与土壤团粒结构的分形凝聚假设

侯光炯院士[36]认为：土壤肥力是土壤在气候周期性变化的影响下，土层中水、热、气、肥动态自动协调植物生理营养要求的能力。熊毅先生[37]也提出，土壤肥力的特点不仅在于土壤供应水肥的能力，更重要的是协调这些的能力。这种综合观点，强调土壤营养条件、环境条件与植物生长三者的统一，扩展了只以土壤养分为内涵的土壤肥力概念[38]。侯光炯院士[39]的研究发现：具有同样物质组成的两种紫色土的肥力差异很大的原因在于土壤胶体的品质和数量差异较大，而根本的原因又在于土壤的结构存在很大的差异。熊毅先生[40]认为，土壤结构是土壤肥力的重要基础，土壤结构的含义，不仅指土壤中那些大小不一、形状各异的团聚体，也包括这些团聚体的稳定性和孔隙性。ВМЛЪяМС (1974)[37]对黑钙土的研究认为土壤中＞0.25 mm水稳性团聚体的含量达到700 mg/kg就是有结构的土壤（指有团粒结构），但是红壤中＞0.25 mm 水稳性团聚体的含量也很高，却未能形成良好的结构。另外，我国很多肥沃的土壤，特别是水稻土，并没有多少＞0.25 mm 水稳性团聚体。所以，研究土壤的结构性不仅要研究土壤团聚体大小的分布，更要研究团聚体的本身性质[40]。陈恩凤先生[41-42]认为，土壤微团聚体及其适宜的组合是土壤肥力的物质基础，并提出土壤中＜10 μm 和 ＞10 μm 团聚体数量的比例可成为评价土壤肥力水平的一个综合指标。

采用分形几何对土壤结构的研究已初步表明土壤颗粒、结构与孔隙的分布具有分形特征[43-55]。但目前的研究主要集中在土颗粒、结构或孔隙等的分形特征的描述上，而对土壤分形结构的产生条件和机理则研究很少。因而难以从土壤中发生的物理、化学或生物过程来解释土壤的分形特征究竟说明了什么问题或者可以说明什么问题。例如，任何一种土壤结构体，我们都可以计算出它的分形维，而不管其中有没有分形凝聚过程产生。有时候我们通过研究得到的仅仅是由于土壤颗粒表面的粗糙所表现的分形特征，甚至是实验误差。

土壤中的团粒结构与普通团聚体不仅在形式上，而且在形成过程与功能上都存在着根本性的区别。在形式上，团粒结构是由大小不同的、具有大尺度自相似形态的各级微团聚体所构成，所以其结构体十分疏松而多孔。而普通团聚体是由胶体颗粒以最紧密方式直接聚合而成，结构内部没有多级微团聚体，所以这种仅仅因胶粒表面的粗糙所表现的自相似性[56-57]必定是小尺度的，因而结构体内部也是致密的。在形成过程方面，由于团粒结构由胶粒经多级聚合而成，这就要求先有最小的微团聚体，然后才有较大的微团粒，最后才有更大的团粒结构体（类似于凝聚动力学的 claster-claster-aggregation 聚合过程），所以团粒结构并非大的土块经外力破碎而成。而普通团聚体的形成，必须先经胶粒的一次性聚合形成大块，然后在外力作用下被破碎成型。在功能方面，由于团粒结构是多级聚合形成的多级结构，因此它比单级结构更具备大尺

度上的有序，从而使前者具有比后者强得多的肥力功能和生态功能。实际上，多级结构的大尺度有序性可能是任何系统表现出“功能”的前提。比如从氨基酸到蛋白质到细胞再到生物个体和群落，都可看成是氨基酸构成的多级结构；同样，由砖块到房间、通道到建筑群、街道再到一座城市，也可看成是由砖块堆积成的多级结构，而且这种大尺度有序的多级结构比由砖块以最紧密方式堆积而形成的、仅具小尺度有序的单级结构的功能更大。

在老一辈土壤科学家的思想启发下，根据分形理论我们提出如下假设：土壤中同时存在两种团聚体，普通团聚体和分形团聚体；这两种团聚体不仅在其形成条件与机理上存在本质的区别，而且它们具有完全不同的肥力属性。正如天空中的水分子不仅可以凝结成致密的冰雹（类似于普通团聚体），而且还可以凝结成具有疏松多孔的和大尺度结构自相似性特点的雪花。

4 土壤结构体的分形特征对微生物空间分布的影响

在农业以及环境领域里，微生物活动对许多过程有重大的影响，如：N 的矿化，反硝化，生物固 N，C、N 循环，土壤结构的稳定性以及土壤中有机污染物的降解等。土壤中的微生物居住在一个由土壤颗粒控制的环境里，这些土壤颗粒的特性、形状和大小各异，并且具有高度复杂的空间分布与组成。了解土壤物理结构对微生物活动的影响对于预测这些过程的发生以及反应速率是至关重要的[58]。土壤物理结构对微生物分布的影响主要包括两个方面：①吸附，土壤颗粒或胶体具有较大的表面积和表面电荷对微生物的分布产生影响；②土壤颗粒的空间几何分布决定了孔隙的分布模式以及孔隙内水分和空气的分布，从而决定了微生物的生存空间与生存环境，此外还对微生物与有机底物（食物源）的可接近程度以及对捕食生物（微小动物或微生物）的暴露程度产生影响[58-59]。

在该研究领域里，对土壤物理性质多采用质地[60]、土壤微团聚体的分级 [61]和土壤颗粒物理分级[62-63] 的方法进行研究。对微生物的分布则采用个体数量如细菌、放线菌、真菌的数量，微生物的生物量（C、N、P）等指标来描述。Hassink 等[64]的研究认为黏土和壤土中细菌数量大于砂土，并发现土壤中直径＜6 μm 的孔隙数量同细菌的生物量有很好的相关性。Monrozier 等[59,62]发现具有同样黏粒含量的土壤，有较多孔隙的微团聚体（20 ~ 2 μm）中微生物生物量 C 较高。Kabir 等[63]采用吖啶橙（acridine orange）标记，电子显微镜直接计数法的研究认为：在根际和非根际土壤中细菌的数量多集中在＜2 μm 的粒径范 围内，而微生物的生物量 C 则以＞2000 μm 的大团聚体中较多。Mendes 和 Bottomley[65]采用荧光标记电子显微镜直接计数法研究了单株细菌 *Rhizobium leguminosarum* 在不同粒径的土壤中的分布，结果表明该细菌在不同的采样时期在土壤粒径（从＜0.25 mm 到 5.0 mm 共分为 5 个粒级）的分布各不相同。其他采用电子显微镜以及土壤物理分级的研究证明在从厘米到微米级水平内土壤微生物的分布是不均衡的[66-68]。

虽然在这方面已有大量的研究，由于对土壤结构单元没有明确的定义，难以阐明土壤结构中决定微生物分布的因子。需要更多、超越简单描述性的研究来确定土壤微生物的空间分布[58]。正确定义土壤结构单元的前提是要正确认识土壤的结构特征，尤其是结构的开放程度决定了微生物分布的空间大小、水分以及空气的分布。

分形理论认为，空间的量随度量的尺度变小而增加，就意味着如果土壤的孔隙或团聚体是一分形结构，那么对于小的微生物种群而言，就有更多的生存空间(在团聚体内由于存在不同尺度的多级孔隙)。由于真菌的个体＞＞放线菌＞＞细菌，从物理空间分布的角度得出在土壤中细菌的数量＞＞放线菌＞＞真菌。土壤结构的分形特征影响到结构的开放程度，从而影响到土壤内部水分和空气的分布，并直接影响微生物与环境间的物质能量交换。

有研究认为几何空间对微生物来说不是限制因子，因为土壤中的微生物只占据很小的一部分空间，如细菌的体积是土壤孔隙的 0.32% ~ 0.79%，在土壤水势为 −0.01 MPa 时，细菌的体积占土壤孔隙的 0.95% ~ 2.42% [58]。同样有研究表明，当土壤团粒中孔隙在微米或纳米水平时，由于细菌和真菌难以进入而导致有机质的矿化受到影响[69-72]。

土壤颗粒的空间分布决定了孔隙的分布，从而决定了微生物的生存空间、生存环境。所以土壤结构体的分形特征对微生物空间分布，以及对微生物的生命活动与生物效应的影响是将来该领域值得研究的内容之一。

5 结语

目前的分形理论在土壤科学中的应用基本局限于对土壤某些性质的分形特征的描述上，所以分形理论在土壤学中的应用实际上才刚刚开始。分形理论并非仅仅提供一个几何描述方法，它的真正意义在于：分形理论为我们研究土壤这一复杂系统中的肥力过程

（包括产生条件与机理）提供了一个全新的概念、全新的视觉、全新的理论和方法。如前所述，一个经多级聚合而形成的团粒结构体，一定是一种具有自相似特征的分形结构体，这种结构体与其他结构体在形成上将具有完全不同的热力学条件和动力学机制，传统的胶体聚合理论和结构成型理论都无法对此做出正确的解释。土壤物理结构、土壤腐殖质以及土壤微生物在不同微环境下具有不同的分形特征，可以推测在各种土壤过程（包括物理、化学以及生物化学过程）中它们的功能也可能是不一样的。候光炯教授曾提出了土壤肥力的生物热力学观点，这个观点与分形理论的基本思想是不谋而合的。因此，我们认为分形理论在探索土壤的形成过程和肥力功能上将具有重要的应用前景。

参考文献：

[1] Mandelbrot B. Form Chance and Dimention. San Francisco, Freeman, 1977: 1−234

[2] Mandelbrot B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco, Freeman, 1982: 45−256

[3] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望. 土壤学进展, 1994, 22: 1−10

[4] Lal R. Methods for Assessment of Soil Degradation. New York: CRC Press, 1997

[5] Baveye P, Parlange JY, Stewart BA. Fractal in Soil Science. New York: CRC Press, 1998

[6] Osterberg R, Szajdak L, Mortensen K. Temperature-dependent restructuring of fractal huminc acids: A proton-dependent process. Environ. Int., 1994, 20: 77−82

[7] Homer VJ, Baveye P, Parlange JY, Stewart BA. Fractal probes of humic aggregation: Scattering techniques for fractal dimendion determinations // Baveye P, Parlange JY, Stewart BA. Fractals in Soil Science, Boca Raton, USA: CRC Press, 1998: 75−112

[8] Ren SZ, Tombacz E, Rice JA. Dynamic light scattering from power-law polydisperse fractal:Application of dynamic scaling to humic acid. 1990, 53: 2980−2988

[9] Tombacz E, Rice JA, Ren SZ. Fractal structure of polydisperse humic acid particles in solution studie by scattering methods. Models Chem., 1997, 134: 877−885

[10] Schmidt PW. Use of scattering from fractal dimension//Avnir D. The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry: Surfaces, Colliods, Polymers. Chichester: John Wiley & Sons, 1989: 67−73

[11] Rice JA, Tombacz E, Malekani K. Applications of light and X-ray scattering to characterise the fractal properties of soil organic matter. Geoderma, Special Issue, 1999, 88: 251−259

[12] Rizzi FR, Stoll S, Senesi N, Buffle J. A transmission electron microscopy study of the fractal properties and aggregation processes of humic acids. Soil Science, 2004. 169(11): 765−775

[13] Vanlauwe B, Nwoke OC, Sanginga N, Merckx R. Evaluation of methods for measuring microbial biomass C and N and relationships between microbial biomass and soil organic matter particle size classes in West-African soil. Soil Biology & Biochemistry. 1999, 31: 1071−1082

[14] Ritz K, Dighton J, Giller KE. Beyond the Biomass. Chichester: John Wiley & Sons, 1994: 387−395

[15] Andrews JH. Comparative Ecology of Microorganisms and Macroorganisms. New York: Springer-Verlag, 1991: 245−252

[16] Richardson LF. The problem of contiguity: An appendix of statistics of deadly quarrels. Gen. Syst., 1961, 6: 193−200

[17] Morse DR, Lawton JH, Dodson MM, Williamson MH. Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lenths. Nature, 1985, 314: 731−735

[18] Obert M, Pfeifer P, Sernetz M. Microbial growth patterns described by fractal geometry. Bacteriol., 1990, 172: 118−125

[19] Patankar DB, Liu TC, Colman TA. Fractal model for thecharacterization of mycelial morphology. Biotechonl. Bioeng., 1993, 42: 571−580

[20] Jones CL, Lonergan GT, Mainwaring DE. Acid-phosphatase positional correlations in solid-surface fungal cultivation−A fractal interpretation of biochemical differentiation. Biochem. Biophys. Res. Commun., 1995, 208: 1159−1164

[21] Regalado CM, Crawfprd JW, Ritz K, Sleeman BD. The origins of spatial heterogeneity in vegetative mycelia: A reaction diffusion model. Mycol.Res., 1996, 100: 1473−1480

[22] Kawasaki K, Mochizuki A, Matsushita M, Umeda T, Shigesada N. Modelling spatio-temporal patterns generated by *Bacillus subtilis*. Theoret.Bio., 1997, 188: 177−186

[23] Golding I, Kozlovsky Y, Cohen I, Benjacob E. Studies of bacterial branching growth using reaction-diffusion models for colonial development. Physica A: Statistical and Theoretical Physics, 1998, 260: 510−520

[24] Senesi N, Stotzky G, Bollag JM, Marcel D. Fractals in general soil science and in soil biology and biochemistry. Soil Biochemistry, 1996, 19: 415−420

[25] Matsuyama T, Matsushita M. Fractal morphogenesis by a bacterialcell population. Microbiol., 1993, 19: 117−122

[26] Fujikawa H. Diversity of the growth-patterns of Bacillus subtilis colonies on agar. FEMS Microbiol., 1994, 19: 117−125

[27] Das I, Kumar A, Singh UK. Nonequilibrium growth of koebsiella ozaenae on agtar plates. Indian J. chem., 1997, 36: 197−204

[28] Matsuyama T, Matsushita M. Self-similar colony morphogenesis

by Gram-negative rods as the experimental model of fractal growth by acell population. Appl. Environ, Microbilo., 1992, 58: 1227−1234

[29] Mihail JD, Obert M, Bruhn JN, Taylor SJ. Fractal geometry of diffuse mycelia and rhizomorphs of Armillaria species. Mycol. Res., 1995, 99: 81−88

[30] Donnelly DP, Wilkins MF, Boddy L. An integrated image analysis approach for determining biomass, radial extent and box-count fractal dimension of macroscopic mycelial systems. Binary, 1995, 7: 19−26

[31] Donnellly DP, Boddy L, Wilkins MF. Image analysis−A valuable tool for recording and analysising development of mycelial systems. Mycologist, 1999, 13: 120−125

[32] Rayner ADM, Ramsdale M, Watkins ZR. Origins and significance of genetic and epigenetic instability in mycelial systems. Can. J. Botany, 1995, 73: 1241−1249

[33] Otten W, Gilligan CA. Effect of physical conditions on the spatial and temporal dynamics of the soil-borne fungal pathogen *Rhizoctonia solani*. Ewphytol., 1998, 138: 29−637

[34] Boddy L, Wells JM, Culshaw C, onnelly DP. Fractal analysis in studies of mycelium in soil. Geoderma, 1999, 8: 01−307

[35] Boddy L. Saprotrophic cord-forming fungi: Meeting the challenge of heterogeneous environments. Mycologia, 1999, 91: 13−22

[36] 侯光炯. 对农业土壤学的一点初步认识. 农业土壤学. 2000: 76−81

[37] 熊毅. 有机无机复合与土壤肥力//中国科学院南京土壤研究所编. 熊毅文集. 北京: 科学出版社, 2003: 289−296

[38] 周健民. 熊毅教授与我国土壤科学的发展. 土壤学报, 2002, 39(6): 769−779

[39] 侯光炯. 紫色土肥力研究五十年. 农业土壤学, 2000: 96−102

[40] 熊毅. 土壤有机无机复合//中国科学院南京土壤研究所编. 熊毅文集. 北京: 科学出版社, 2003: 307−374

[41] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评判土壤肥力中的作用. 土壤学报, 1994, 31(1): 18−28

[42] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 颜丽, 王铁宇, 张继宏, 周礼恺, 陈利军, 李荣华. 土壤特征团聚体的组成比例与肥力评价. 土壤学报, 2001, 38(1): 49−53

[43] Bartoli F, Philippy R, Dorisse M, Niquet S, Dubuit M. Structure and self-similarity in silty and sandy soil: The fractal approach. Soil Sci., 1991, 42: 167−175

[44] Young IM, Crawford JW. The fractal structure of soil aggregates: Its measurement and interpretation. Soil Sci., 1991, 42: 187−194

[45] Perfect E, Kay BD. Fractal theory applied to soil aggregation. Soil Sci., 1991, 55: 1552−1558

[46] Filgueira RR, Pachepsky YA, Fournier LL. Comparison of fractal dimensions estimated from aggregate mass-size distribution and water retention scaling. Soil Sci., 1999, 64: 217−226

[47] 李德成, Velde B, Delerue JF, 张桃林. 土壤孔隙质量分维 Dm 二元图象分析及其影响因素研究. 土壤通报, 2002, 33: 256−264

[48] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征. 地理研究, 2002, 6: 700−706

[49] 张世熔, 邓良基, 周倩, 伍国锋. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系. 土壤学报, 2002, 39(2): 221−229

[50] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方, 曹红霞, 闫慧敏. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征. 土壤学报, 2005, 42(2): 336−339

[51] 骆东奇, 侯春霞, 魏朝富, 谢得体, 朱波. 不同母质发育紫色土团粒结构的分形特征研究. 水土保持学报, 2003, 17(1): 131−134

[52] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用. 土壤学报, 2002, 39(4): 490−497

[53] 刘建立, 徐绍辉. 根据颗粒大小分布估计土壤水分特征曲线: 分形模型的应用. 土壤学报, 2003, 40(1): 46−52

[54] 姜娜, 邵明安, 雷廷武. 水蚀风蚀交错带坡面土壤入渗特性的空间变异及其分形特征. 土壤学报, 2005, 42(6): 904−908

[55] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 高明. 岩溶山区植被被破坏前后土壤团聚体分形特征研究. 土壤通报, 2006, 37(1): 51−55

[56] Mandebrot B, Passaja DE, Paulley AJ. Fractal character of fracture surfaces of metals. Nature, 1984, 308: 21−22

[57] Van Damme H, Levitz P, Gatineau L, Alcover JF, Fripiat JJ. On the determination of the surface fractal dimension of powders bygranulometric analysis. J. Colloid Interface Sci., 1988, 122: 1−8

[58] Chenu C, Stotzky G. Interactions between microorganisms and soil particles: An overview. Interactions between soil particles and microorganisms: Impact on the terrestrial ecosystem. Chichester: John Wiley & Sons, 2002, 8: 3−12

[59] Van Gestel M, Merckx R, Vlassak K. Spatial distribution of microbial biomass in microaggregates of a silty-loam soil and their relation with the resistance of microorgnisms to soil drying. Soil Biol. Biochem., 1996, 28: 503−509

[60] Hassink J, Bouwman J, Brussaard LB. Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils. Soil Biol.Biochem., 1993, 25: 47−54

[61] Hattori T. Soil aggregates as microhabitats for microorganisms. Tohoku Univ., 1988, 37: 23−29

[62] Monrozier LJ, Ladd JN, Ffitzpatrick RW, Foster RC, Raupach M. Components and microbial biomass content of size fraction in soils of contrasting aggregation. Geoderma, 1991, 50: 37−62

[63] Kabir M, chotte JL, Rahman M, Bally R, Jocteur ML.

Distyibution of soil fractoins and location of soil bacteria in vertisol under cultivation and perenial grass. Plant Soil, 1994, 163: 243−259
[64] Hassink J, Bouwman J, Brussaard LB. Relationships between habitable pore space, soil biota and mineralization rates in grassland soils. Soil Biol., 1993, 1: 15−26
[65] Mendes IC, Bottomley PJ. Distribution of population of Rhizobium leguninosarum by trifolii among different size classes of soil aggregates. Appl. Microbiol., 1998, 64: 970−976
[66] Tessier D, Chenu C. Importance of clay fanrics in soils, an approach by ekectron microscopy, Geol. Carpathicam, 1997, 6: 55−62
[67] Chotte Jl, Villemin G, Guillore P, Jocteur ML. Morphyological aspects of microorganism habitats in a vertisol. In soil Micromorphology. Working Meeting on soil micromorphology, 1994, 22: 395−402
[68] Fost RC. Microenvirronwents of soil microorganisms. Biol. Fertil. Soils, 1988, 6: 189−197
[69] Barlett JR, Doner HE. Decomposition of lysine and leucine in soil aggregates: Adsorption and compartmentalization. Soil Biol. Biochem., 1988, 20: 755−760
[70] Hatzinger PB, Alexander M. Biodegradation of organic compounds sequestered in organic solids or in nanopores within silicaparticles. Environ. Tolicol. Chem., 1997,16: 2215−2222
[71] Nam K, Alexander M. Role of nanoporosity and hydrophobicity in sequestration and bioavailability: Tests with model solids. Environ. Soil Sci. Technol., 1998, 32: 71−84
[72] Scow KM, Alexander M. Effect of diffusion on the kinetics of biodegradation: Experiment results with synthetic aggregates. Soil Sci. Soc.Am.J,. 1992, 56: 128−132

Application and Prospect of Fractal Theory in Study on Soil Fertility

JIANG Xian-jun[1], LI Hang[1], XIE De-ti[1], WEI Chao-fu[1], XIONG Hai-ling[2]

(1 *College of Resources and Environment, Southwest University*, *Chongqing* 400716, *China;*

2 *Faculty of Computer & Information Science, Southwest University, Chongqing* 400716, *China*)

Abstract: Fractal geometry provides an approach to quantitative description of complex, highly irregular systems. A review of researches in these aspects was presented here. A number of essential processes in soil are strongly influenced by microenvironment, such as: soil humic colloids form aggregates different in fractal characteristics in different microenvironments; the same micro-organisms may have structures different in fractal characteristics; and soil organic-inorganic colloids make up different aggregates, thus forming different soil structures that lead to difference in soil fertility in different microenvironments. Openness of soil structure defines pore, moisture and air distribution that are habitats of soil microorganisms. So, to understand how soil structure controls spatial distribution of microorganisms is a topic worth studying in the future.

Key words: Fractal, Soil humus, Soil microorganisms, Soil structure, Soil fertility