

不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征*

胡云锋 刘纪远 庄大方 曹红霞 闫慧敏

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

FRACTAL DIMENSION OF SOIL PARTICLE SIZE DISTRIBUTION UNDER DIFFERENT LAND USE / LAND COVERAGE

Hu Yunfeng Liu Jiyuan Zhuang Dafang Cao Hongxia Yan Huimin

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

关键词 土地利用/土地覆盖; 风力侵蚀; 粒径分布; 分形维

中图分类号 S152 文献标识码 A

自相似和分形是许多自然事物和现象的客观特征之一^[1]。土壤是一种具有自相似结构的多孔介质, 因此可以利用分形几何学来研究土壤的性状特征。研究者可以通过分形维(分维)来描述、刻画土壤颗粒的粒径及孔隙分布状况, 由此可进一步研究土壤的其他物理化学性状及其对周边生态环境的指示意义^[2~6]。研究表明: 土壤粒径分布分维数不仅能够表征土壤粒径大小, 还能反映质地的均一程度以及土壤的通透性^[7]; 分形维数与土壤水稳性团聚体含量有着明显对应关系, 可以表征土壤的肥力状况^[8]; 分形维数与表征沙质荒漠化的土壤有机质含量以及指示植物的重要值显著相关^[9]; 土壤分形维还可以用来模拟和预测土壤水分特征^[10]。

本文计算和对比了我国北方农牧交错带、内蒙古太仆寺旗境内耕地和草地样点中土壤粒径分布的分形维数, 试图阐明不同土地利用/土地覆盖下的土壤粒径分布的分形特征及其形成机制。

1 模型与方法

目前, 可用于计算土壤颗粒粒径分布的分形维模型有很多^[10~15]。Turcotte 首先建立了基于不同粒

径组土壤颗粒频数分布的分维计算模型^[10], 杨培岭等则改进得到基于不同粒径组土壤重量分布的分维计算模型^[11]。事实上, 基于土壤颗粒个数统计得到的分维存在尺度效应, 它与土壤容重以及计算时所用的粒径大小都密切相关。而基于不同粒径组重量分布的分维计算方法的尺度效应并不明显, 更适于对野外真实土壤的研究^[9]。杨培岭等建立的基于不同粒级重量分布的分维模型可表为^[11]:

$$\left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{(3-D)} = \frac{W_{\delta < d_i}}{W_0}$$

其中, d_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) 为土壤颗粒直径, d_{\max} 为土粒最大粒径, D 为分形维数, δ 为土壤颗粒的粒径变量, $W_{\delta < d_i}$ 为粒径小于 d_i 的土粒重量, W_0 为分析土壤样品的全重。

计算分维时, 首先由实测粒径及其重量数据计算 $\lg \frac{W_{\delta < d_i}}{W_0}$ 和 $\lg \frac{d_i}{d_{\max}}$, 而后以 $\lg \frac{W_{\delta < d_i}}{W_0}$ 为纵坐标, $\lg \frac{d_i}{d_{\max}}$ 为横坐标, 使用最小二乘法进行直线拟合, 计算其斜率, 最后由斜率推算得到分维数 D 。

* 国家重点基础研究发展规划项目“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制研究”(2002CB412500)资助

作者简介: 胡云锋(1974~), 男, 博士研究生, 主要从事地理信息技术、全球变化与陆地生态系统碳循环研究

E-mail: huyf@reis.ac.cn; Tel: 010-64889038

收稿日期: 2004-04-07; 收到修改稿日期: 2004-09-03

2 样区概述及样品分析

土壤样品于 2003 年 11 月采于内蒙古太仆寺旗境内, 该地区属于我国北方农牧交错带, 主要的土壤侵蚀过程为风力侵蚀。根据中国科学院资源环境数据中心提供的 2000 年土地利用现状图以及国家水利部完成的 2000 年中国土壤侵蚀(风力侵蚀) 数据, 选择了三处草地和两处耕地样点, 它们分别代表了无侵蚀、微弱侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀以及强度侵蚀区。其中, 草地共有 3 个样区, 分别为低、中、高覆盖, 分别对应了风力侵蚀的轻度侵蚀(2 号样区)、微弱侵蚀(3 号样区) 和无侵蚀区(4 号样区); 耕地共有两个样区, 对应了风力侵蚀的中度侵蚀(1 号样区) 和强度侵蚀(5 号样区)。侵蚀等级的划分符合《土壤侵蚀分类分级标准》要求^[16], 土地覆盖的分类以及草地覆盖的分级标准可参见文献[17] 和[18]。

采样时, 每个样区各采两个剖面, 除 1 号样区按每 5 cm 采一个层样外, 其余每个样区均按每 2 cm 采一层样, 1、3、5 号样区采样深度为 30 cm, 2、4 号样区采样至 32 cm。在同一样区内, 将两个剖面上对应层位上的土壤样品混合均匀后, 过 2 cm 筛, 用 4 分法, 取出粒度分析样, 合计共 68 个样品, 样品送中国科学院地理科学与资源研究所土壤理化分析室测试。土壤的机械组成使用英国马尔文公司生产的 Master Size 2000 型激光粒度仪测定。共测试了 2 μm 、3 μm 、5 μm 、10 μm 、15 μm 、20 μm 、30 μm 、50 μm 、63 μm 、100 μm 、200 μm 、250 μm 、300 μm 、400 μm 、500 μm 、750 μm 、1 000 μm 、1 500 μm 以及 2 000 μm 等 19 个粒级的重量百分含量。由粒径分析结果可以得到的上述 68 个样品的分形维数 D 。

3 结果与讨论

3.1 分维与土壤粒径组关系

通过统计软件 SPSS 可以进一步计算得到上述 68 个样品的粒径分布分维与各粒径组含量之间的相关性(相关系数)。我们发现, 土壤粒径分布分维与细颗粒物质的含量呈强正相关关系。其中 $\delta < 10 \mu\text{m}$ 粒组(以下记为 PM10: particle matter, $d < 10 \mu\text{m}$) 含量与分维关系最为密切(图 1), 其相关系数达到 0.973, 该相关关系通过 $p < 0.01$ 双尾检验。

需要指出的是, 由于 PM10 粒组含量并非是完全独立变量, 它与相邻的其他粒组在数量上存在包

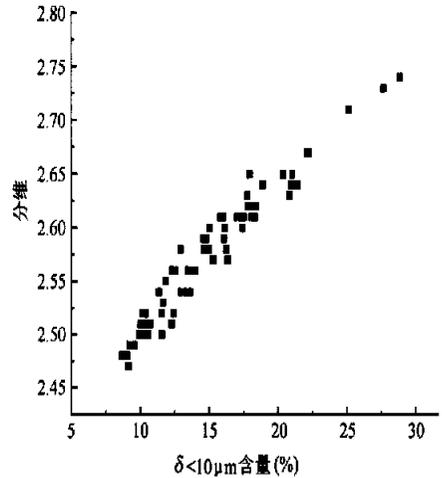


图 1 $\delta < 10 \mu\text{m}$ 粒组含量与分维的关系

含或被包含关系, 因此不能根据这种统计上的强正相关而下断言: 不论 PM10 粒组含量变动多大, PM10 粒组含量都与土壤粒径分布分维存在严格的数学对应关系。但是, 考虑到土壤颗粒粒径分布存在的自相似性^[19], 在 PM10 粒组含量的变动如果不是太大的情况下(如将上下波动限制在本文研究中 PM10 粒组含量的值域范围之内, 也即 $\pm 10\%$), 可以认为, 土壤颗粒的粒径分布分维受细颗粒物含量影响: 细颗粒物越多, 分维越大; 细颗粒物越少, 分维越小。具体到本研究区, 分维反映了 PM10 组分含量的高低。

3.2 分维与土地利用/ 土地覆盖的关系

我们对土壤颗粒粒径分布的分维按土地利用类型进行分类统计, 在同种土地利用类型内部, 则根据其土地利用历史和植被覆盖程度进行对比分析, 结果如图 2 所示。

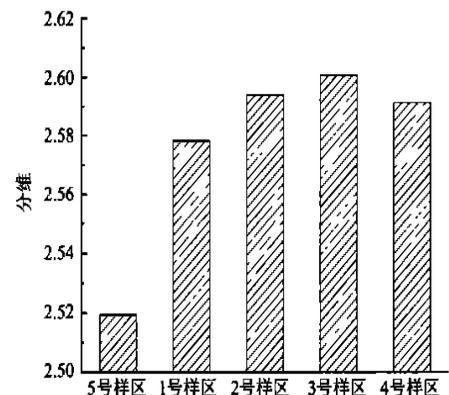


图 2 不同土地利用/ 土地覆盖下的土壤粒径分维

形成这种变化趋势的原因主要有两个:

(1) 土地利用/土地覆盖以及与之相关的风力侵蚀的影响。在我国农牧交错带上,耕地的风力侵蚀通常要高于草地的风力侵蚀;而在草地内部,低覆盖草地(2号样区)相对于更高覆盖的草地(3号样区、4号样区),其风力侵蚀强度相应要高;而对于耕地,现耕地(5号样区)的风蚀强度要比已撂荒耕地(1号样区)风蚀强度高^[20]。由于土壤颗粒粒径分布分维与土壤细颗粒物含量间表现出强烈的正相关关系,而这部分的细颗粒物(尤其是PM10)又恰恰是风蚀悬移物的主体^[21]。因此,风蚀强度越高,风蚀年限越久,土壤细颗粒物含量(PM10)损失得就越多,土壤颗粒粗化得越厉害,土壤粒径分布分维就越小。

(2) 土壤团聚体自身演化过程的影响。对土壤结构的图像分析表明^[22],在自然无干扰状态下,随着时间的推移,土壤中团聚体将由小变大,土体逐渐趋于紧实;小团聚体和小孔隙减少,而大团聚体和大孔隙增加。因此,对高覆盖、无风蚀的草地(4号样区)而言,在长期少干扰状态下,由于小颗粒物含量逐渐减小,土壤粒径分布分维相对于中等覆盖的

草地(3号样区)土壤分维反而会略有下降,但它仍要高于耕地和低覆盖草地土壤中土壤分维。

由上可见,土壤粒径分布分维随土地利用/土地覆盖的不同而发生规律性改变,其总体趋势是:植被覆盖度越高,土壤分维越大;风蚀强度越大,土壤分维越小。土壤团聚体自身的演化过程也有局部的、次要的作用。

3.3 分维在垂直剖面上的特征

在土壤垂直剖面上(图3),耕地剖面(5号样区、1号样区)上的土壤颗粒的粒径分布分维变化很小,值域(最大值减最小值)分别为0.13和0.08。对于低覆盖草地(2号样区),土壤分维在剖面分布于耕地相似,在不同层位上基本保持不变,其值域也仅有0.15。以上三个样区(5号、1号、2号)的土壤颗粒粒径分布分维从上部到下部,分维有轻微增加的趋势。对于中覆盖草地(3号样区)和高覆盖草地(4号样区),分维变化较大,值域达到0.19和0.26;在趋势上,呈现随深度增加分维逐渐降低。从表层的2.65以上降低至2.55以下,和耕地、低覆盖草地深部土壤分维基本一致,甚至还略有降低。

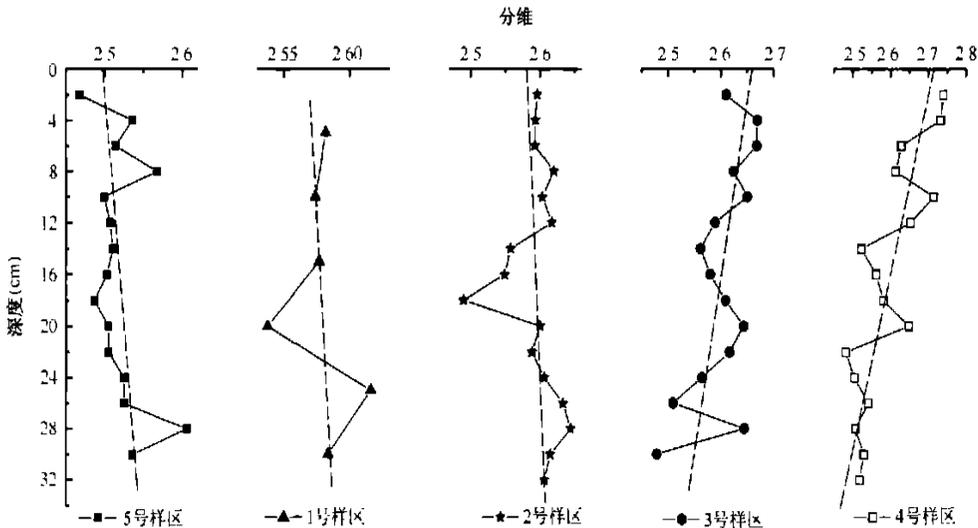


图3 土壤粒径分维沿土壤剖面深度的变化

影响土壤粒径分布分维在土壤垂直剖面上分布的主要过程有:

(1) 对于耕地(5号样区、1号样区),农耕活动将犁底层(内蒙古样区的犁耕层深度一般为25~30 cm)以上的土壤翻动、混合,造成土壤上下部均质化,因此耕地土壤的分维变化很小。另一方面,在每

年土壤未翻动之前,深部土壤未受到风蚀,能保留比表层土壤更多的细粒物质,因此深部的土壤分维还能有稍微的升高。

(2) 对于草地(2、3、4号样区),牧草能将风力侵蚀带来并沉降下来的微细尘埃、粘粒和粉沙质固定,成为自身土壤的一部分,由此造成了草地表层土壤

粒径分布分维比草地深部土壤以及耕地表层土壤粒径分布分维要高。另一方面, 对于草地样点深部的土壤而言, 由于扰动较少, 土壤处于自然演化状态; 因此, 随着时间的推移, 土壤中团聚体将由小变大, 土体逐渐趋于紧实; 小团聚体和小孔隙减少, 而大团聚体和大孔隙增加。因此, 这也造成了深部土壤分维比表层土壤分维要小, 甚至可能小于同一深度耕地土壤的粒径分布分维。

4 结 论

研究表明土壤粒径分布分维可以指示土壤粒度组成状况、进而反映本区盛行的土壤风力侵蚀状况。主要结论有:

1) 土壤的粒径分布分维主要受细颗粒物含量的影响: 细颗粒物越多, 分维越大; 细颗粒物越少, 分维越小。在本研究区, 小于 10 μm 粒径的土壤颗粒 (PM10) 含量对土壤分维影响最大, 其相关系数达到 0.973。

2) 土壤粒径分布分维随土地利用/ 土地覆盖的不同而发生规律改变, 其总体趋势是: 植被覆盖度越高, 土壤分维越大; 风蚀强度越大, 土壤分维越小。造成这种趋势的主要原因可归结到土壤风力侵蚀对土壤颗粒的选择性侵蚀上。因此, 在我国农牧交错带风蚀地区, 土壤分维的测算对风蚀程度的评估具有一定的指示意义。

3) 在土壤剖面上, 耕地土壤分维在各个层面上基本不变, 值域较小; 而草地土壤的分维在剖面上变化较大, 且随深度增加分维逐渐变小。这种剖面上的分布特点是农耕活动形成的土壤均质化、风力侵蚀过程的空间再分配作用、植物的固沙吸尘过程以及土壤团聚体的自然演化等多种过程的综合结果。

致 谢 野外工作得到内蒙古太仆寺旗公路段马勇同志的协助, 样品测试由中国科学院地理科学与资源研究所土壤理化室杨京蓉女士完成。

参 考 文 献

[1] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: Freeman, 1982

[2] Wu Q, Borkovec M, Sticher H. On particle-size distributions in soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57 (4): 883~ 890

[3] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil-water properties. 1. Theory. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55 (5): 1 231~ 1 238

[4] Rieu M, Sposito G. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil-water properties. 2. Applications. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55 (5): 1 239~ 1 244

[5] Perfect E, Kay B D. Applications of fractals in soil and tillage research: A review. Soil & Tillage Res., 1995, 36 (1/2): 1~ 20

[6] Anderson A N, McBratney A B, Crawford J W. Applications of fractals to soil studies. Adv. Agron., 1998, 63: 1~ 76

[7] 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

[8] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征. 土壤学报, 2002, 39(6): 811~ 877

[9] 张世熔, 邓良基, 周倩等. 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~ 226

[10] Turcotte D L. Fractals and Fragmentation. J. Geophys. Res., 1986, 91(B2): 1 921~ 1 926

[11] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1 896~ 1 899

[12] Perrier E, Bird N, Rieu M. Generalizing the fractal model of soil structure: The pore-solid fractal approach. Geoderma, 1999, 88 (3/4): 137~ 164

[13] Rasiiah V, Kay B D, Perfect E. New mass-based model for fractal dimensions of soil aggregates. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57 (4): 891~ 895

[14] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distribution-analysis and limitations. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56 (2): 362~ 369

[15] Kozak E, Pachepsky Y A, Sokolowski S, *et al.* A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60 (5): 1 291~ 1 297

[16] 水利部水土保持监测中心. 全国土壤侵蚀遥感调查工作报告 (2001 年 4 月). <http://www.swcc.org.cn>

[17] 刘纪远主编. 国土资源环境遥感宏观调查与动态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996

[18] 刘纪远, 庄大方, 张增祥等. 中国土地利用时空数据平台建设及其支持下的相关研究. 地球信息科学, 2002, (3): 3~ 7

[19] Taguas F J, Martin M A, Perfect E. Simulation and testing of self-similar structures for soil particle-size distributions using iterated function systems. Geoderma, 1999, 88 (3/4): 191~ 203

[20] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方等. 土地利用动态与风力侵蚀动态对比研究——以内蒙古自治区为例. 地理科学进展, 2003, 22 (6): 1~ 8

[21] 朱震达, 陈广庭等. 中国土地沙质荒漠化. 北京: 科学出版社, 1994. 157~ 179

[22] 李德成, Velde B, Delene J F 等. 免耕制度下耕作土壤结构演化的数字图像分析. 土壤学报, 2002, 39(2): 214~ 220