

估计土壤水分特征曲线的简化分形方法

刘慧¹ 刘建立²

(1 南京大学地球科学系 南京 210093; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所) 南京 210008)

摘要 本文提出了一种简化的分形方法来根据土壤粘粒含量估计水分特征曲线。对 578 个不同质地样本的研究结果表明, 这种简化方法预测体积水分含量的均方根误差介于 0.027~0.076 cm³/cm³ 之间, 略小于采用完整颗粒分布资料的预测结果 (0.028~0.082 cm³/cm³), 其精度适合于大尺度实际问题的研究需要。

关键词 分形; 土壤; 水分特征曲线

中图分类号 S152.7

模拟非饱和带水分的动态变化首先需要确定土壤的水分特征曲线。通常采用的室内和田间试验方法有张力计法、压力膜法等。但是对于流域尺度的实际问题, 通过直接实验方法测定水分特征曲线周期很长、成本很高, 而且土壤空间的强烈变异性也使得大规模的直接测定不太现实。这时就需要一种既简单实用同时又具有一定精度的间接方法, 即利用土壤颗粒分布等容易测定的基本物理性质根据某种数学关系来间接地估计土壤水分特征曲线。

经过 20 多年来的研究, 人们已经提出了多种估计水分特征曲线的间接方法^[1, 2]。分形几何(Fractal geometry)即是其中一种相对实用、而且物理意义明确的方法。Tyler 和 Wheatcraft 最早将分形理论应用到间接方法的研究中^[3]。他们提出了一种根据土壤颗粒分布计算分形维数(fractal dimension)并预测水分特征曲线的方法。之后, 他们又对分形几何理论在土壤物理学中的应用作了进一步的完善^[4, 5]。Kravchenko 和 Zhang^[6]提出了一种利用土壤颗粒大小分布确定表面分形维数的新方法, 并用 UNSODA 数据库^[7]中的样本验证了分形模型的预测效果。刘建立等对这种方法进行了改进, 进一步提高了水分含量的预测精度。但是, 上述这些方法都需要比较完整的颗粒分析资料。而实际上, 在流域尺度的研究中要获得十分详细的颗粒大小分布往往是不现实的。本文目的在于提出一种更为简便的确定分形维数的方法, 以增强分形方法在实际应用中的可操作性。

1 确定分形维数的简化方法

Tyler 和 Wheatcraft 提出了下述关系来描述土壤颗粒质量的分形特征^[5]:

$$\frac{W(\leq R_i)}{W_T} = \left(\frac{R_i}{I_m} \right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: $W(\leq R_i)$ 为小于或等于半径 R_i 的颗粒累积质量百分含量; W_T 为样本的总质量; I_m 为表现出分形特征的固体颗粒半径上限, 通常取砂粒半径 (1 mm); D 为分形维数。利用上式根据实测颗粒大小分布即可确定分形维数。

常规的土壤调查资料中通常仅有砂粒 (半径 1 mm)、粉粒 (0.025 mm) 和粘粒 (0.001 mm) 3 个级别的颗粒分析数据。为提高分形方法的实用性, 对式 (1) 作进一步的简化, 即将粘粒和砂粒含量分别代入上式, 则有

$$\frac{W(\leq 0.001)}{W_T} = \left(\frac{0.001}{I_m} \right)^{3-D} \quad (2)$$

和

$$\frac{W(\leq 1)}{W_T} = \left(\frac{1.0}{I_m} \right)^{3-D} \quad (3)$$

综合式 (2) 和 (3), 可得

$$\frac{W(\leq 0.001)}{W(\leq 1)} = \left(\frac{0.001}{1.0} \right)^{3-D} \quad (4)$$

通常情况下, 对应于砂粒的累积质量百分含量为 1000g/kg, 上式可进一步简化为

$$W(\leq 0.001) = \left(\frac{0.001}{1.0} \right)^{3-D} \quad (5)$$

对上式两边取对数, 经整理后可得:

$$D = 2.0 + 0.1448 \ln(W(\leq 0.001)) \quad (6)$$

上式表明分形维数的最小值为 2.0, 最大值为 3.0 (对应的粘粒含量为 1000g/kg), 且取值随粘粒含量的增加而增大。式 (6) 中仅包含一个自变量——粘粒的质量百分含量, 分形维数很容易确定。

在确定分形维数之后, 将其代入分形水分持留模型中, 即可间接估计土壤水分特征曲线。根据刘建立和徐绍辉^[8]的研究结果, Perrier 等^[9]提出的 Brooks-Corey 形式的分形模型适用范围最广、预测精度最高。其形式如下:

$$q(h) = q_r + (q_s - q_r)(h/h_a)^{-(3-D)} \quad (7)$$

式中: q 为体积水分含量; h 为压力水头; q_r 和 q_s 分别为剩余和饱和水分含量; h_a 为进气压力水头。

2 材料与方法

本次研究共采用了 578 个样本的实测资料, 其中 3 个样本取自中国科学院封丘农业生态实验站, 土壤质地分别为砂壤土、粉砂粘壤土和粉砂壤土(美国制), 每种质地 4 个重复样本。在实验室内进行颗粒分析(分为 8 个级别)并用压力膜法测定土壤水分特征曲线(8 个数据点)。另外 554 个样本取自非

饱和土壤水力性质数据库—UNSODA 2.0^[7]。5 个样本资料来自文献[10]。另外 16 个样本来自文献[11]。这 578 个样本的质地类型从砂土到粘土共 12 种(表 1)。颗粒大小分布资料分为 3~21 个级别, 土壤水分特征曲线实测数据为 6~75 个。

为评价这种简化方法的预测效果, 除了用式(6)来确定分形维数 D_s 外, 还根据式(1)对整个颗粒大小分布作线性回归来确定分形维数 D_p (这里称为 PSD 方法)。此外, 还利用式(7)对实测水分特征曲线进行拟合得到一个最优的分形维数值(记作 D_b)。为提高模型的通用性, 在预测土壤水分特征曲线时, 式(7)中除了 q_s 采用实测值外, q_r 和 h_a 都采用 Rawls 等^[12]给出的不同质地土壤的典型值。

3 结果与讨论

采用 3 种方法计算得到的分形维数及预测水分含量的均方根误差见表 1。分形维数的取值基本上表现出相同的变化趋势, 即随土壤质地变粘逐渐增大, 这与已有的研究结果一致^[8]。除粉砂土外, 简化方法计算得到的分形维数均略大于 PSD 方法的结

表 1 不同质地土壤的分形维数与体积水分含量的均方根误差平均值
Table 1 Fractal dimensions and root-mean-squared errors for soils in various textures

土壤质地	样本数	分形维数			均方根误差(cm^3/cm^3)		
		D	D_s	D_p	拟合方法	简化方法	PSD 方法
砂土	139	2.142	2.403	2.312	0.040	0.071	0.078
壤砂土	52	2.616	2.569	2.516	0.029	0.053	0.057
砂壤土	87	2.747	2.685	2.666	0.027	0.062	0.064
砂质粘壤土	45	2.766	2.799	2.790	0.024	0.050	0.051
壤土	65	2.871	2.760	2.756	0.023	0.076	0.078
粉砂壤土	106	2.854	2.733	2.705	0.026	0.075	0.082
粘壤土	24	2.802	2.849	2.845	0.020	0.046	0.046
粉砂土	3	2.766	2.651	2.661	0.031	0.050*	0.046
粉砂粘壤土	23	2.844	2.856	2.829	0.018	0.043	0.048
砂质粘土	1	2.907	2.852	2.850	0.007	0.027	0.028
粉砂质粘土	13	2.876	2.875	2.874	0.025	0.043	0.046
粘土	20	2.876	2.899	2.896	0.026	0.036	0.040

注: 对式(1)改进后粉砂土的均方根误差减小为 $0.039 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

果。对于绝大多数质地的样本, 简化方法预测的体积水分含量均方差 ($0.027\sim 0.076 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 均小于 PSD 方法的预测误差 ($0.028\sim 0.082 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$); 只有粉砂土的预测误差 ($0.050 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) 略大于 PSD 方法 ($0.046 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。造成这一问题的原因在于, 简化方法仅仅考虑了粘粒和砂粒含量, 而粉砂土样本中粉粒含量很高, 得到的分形维数中未能反映出这一重要特征。为了改进简化方法的预测精度, 用粉粒代替式(1)中的粘粒来计算分形维数并预测水分特征曲线, 推导过程与前类似, 这里不再列出。改

进后的计算结果表明, 粉砂土水分含量的均方根误差平均值减小为 $0.039 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

图 1 是所有样本预测水分含量和实测值的比较。图中共有 6868 个数据点, 虚线为回归直线。可以看出, 简化方法回归分析得到的确定性系数(0.7680)稍大于 PSD 方法(0.7566)。二者效果大体相当, 没有实质性的区别。这表明与采用整个颗粒分布曲线的 PSD 方法相比, 简化的分形方法具有足够的精度。对于大尺度的实际问题而言, 由于这种简化方法仅需知道土壤的粘粒含量, 因此也更为简便、实用。

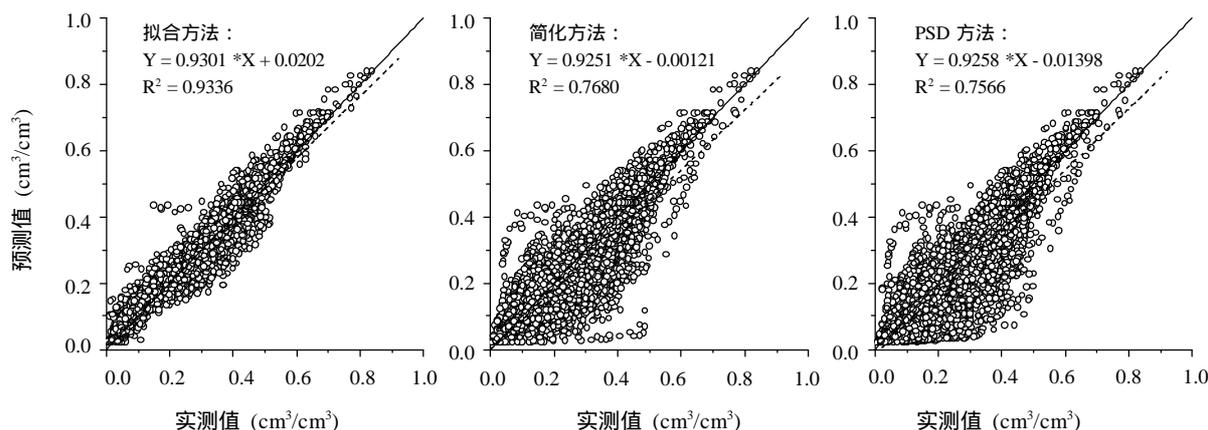


图 1 模型预测体积水分含量与实测值的比较

Fig. 1 Comparison between model-predicted and measured values of the soil water contents

参考文献

- 徐绍辉, 刘建立. 土壤水力性质确定方法研究进展. 水科学进展, 2003, 14 (4): 494 ~ 501
- 张俊, 徐绍辉. 数值反演法在确定土壤水力性质中的研究进展. 土壤, 2003, 35 (3): 211 ~ 215
- Tyler SW, Wheatcraft SW. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53:987 ~ 996
- Tyler SW, Wheatcraft SW. Fractal processes in soil water retention. Water Resources Research, 1990, 26:1047 ~ 1056
- Tyler SW, Wheatcraft SW. Fractal scaling of particle size distributions: analysis and limitations. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56: 362 ~ 369
- Kravchenko A, Zhang RD. Estimating the soil water retention from particle-size distributions: A fractal approach. Soil Science, 1998, 163: 171 ~ 179
- Nemes A, Schaap M, Leij F. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database (version 2.0). US Salinity Laboratory, Riverside, CA, 1999
- 刘建立, 徐绍辉. 根据土壤基本性质估计水分特征曲线: 分形模型的应用. 土壤学报, 2003, 40(1): 46 ~ 52
- Perrier E, Rieu M, Sposito G, de Marsily G. Models of water retention curve for soils with a fractal pore size distribution. Water Resources Research, 1996, 32: 3025 ~ 3031
- Arya LM, Paris JF. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45:1023 ~ 1030
- Geo-Slope Inc. Seep/W version 5.0 User's Guide. Alberta: Canada, 2002
- Rawls WJ, Brakensiek DL, Saxton KE. Estimation of soil water properties. Trans. ASAE, 1982, 25: 1316 ~ 1320, 1328

A SIMPLIFIED FRACTAL METHOD TO ESTIMATE SOIL WATER RETENTION CHARACTERISTICS

LIU Hui¹ LIU Jian-li²

(1 Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093; 2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008)

Abstract A simplified fractal method was proposed in the present study to indirectly estimate soil water retention characteristics based on soil clay content. Measured particle-size distribution and water retention characteristics of 578 samples were used to evaluate the predictive capability of this method. Results indicated that root mean squared errors of volumetric water content range from 0.027 to 0.076 cm³/cm³, which is slightly better than the prediction based on full particle-size distribution data.

Key words Fractal, Soil, Water retention characteristics