

参数模型在壤土类土壤颗粒大小分布中的应用*

刘建立¹ 徐绍辉¹ 刘慧² 郭飞²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(2 南京大学地球科学系, 南京 210093)

摘要 颗粒大小分布是土壤的基本物理性质之一, 可以用来预测其它难以直接测定的土壤性质。采用参数模型描述土壤的颗粒大小分布有许多优点。本文利用河南封丘地区三种壤土类土壤共 300 个样本的颗粒分析资料, 研究了五种参数模型的适用情况。结果表明, 包含四个参数的 Fred4P 模型对三种土壤颗粒大小分布的模拟效果最为理想; 三参数的 Fred3P 和 MLog 模型对砂壤土的描述效果较差, 对另外两种质地土壤的模拟效果与 Fred4P 模型相当。四参数的 Gomp 模型计算误差大于 Fred3P 和 MLog 模型。在这五种参数模型中, MVG 模型的误差最大, 不能精确描述封丘地区壤土类土壤的颗粒大小分布。

关键词 土壤; 颗粒分布; 参数模型; 河南封丘

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

土壤颗粒大小分布 (Particle-size distribution) 是指不同粗细级别的土壤颗粒质量所占的比数, 常用颗粒直径与对应的累积百分含量来表示。颗粒大小分布是基本的土壤物理性质之一, 其中的砂粒、粉粒和粘粒含量通常作为土壤分类的依据。土壤颗粒分布强烈影响着其它一些重要的土壤物理性质 (如水力性质)。目前, 人们已经提出了多种方法利用颗粒分布来间接估计这些难以直接测定的土壤性质^[1~3]。但是, 这些间接方法通常都需要比较完整的土壤颗粒分布曲线, 而土壤颗粒分析的结果往往仅有少数的几个数据点, 这极大地限制了间接方法的预测精度及其实用性。因此研究土壤颗粒大小分布模型具有重要的意义。

描述土壤颗粒分布的模型可以分为两类, 即参数模型和非参数模型。所谓参数模型就是表征累积质量百分含量与颗粒直径之间关系的包含一个或多个形状参数的数学表达式。非参数模型中不包含形状参数, 通常是采用一些统计学指标 (如几何平均粒径、标准偏差等) 来描述颗粒分布曲线^[4]。相对而言, 采用参数模型来描述土壤颗粒分布具有很多优点。首先, 根据参数模型可以方便地得到整个颗粒分布曲线, 便于在估计土壤水力性质的间接方法中加以应用, 并提高预测结果的精度^[5,6]; 其次, 利用

参数模型可以对不同来源的颗粒分析资料进行标准化插值^[7]; 另外, 参数模型在实际应用中也比较灵活, 如利用形状参数可以找出数据库中相似的样本, 甚至可以直接利用形状参数来进行土壤分类^[5]。

在实际研究中, 最为常用的非参数颗粒分布模型是对数正态分布^[8]。但是 Buchan 的研究表明, 对数正态分布模型仅适用于大约一半的土壤质地类型 (包括粉砂粘土、粉砂粘壤土、粉砂壤土等), 而对于砂质粘壤土、砂质粘土等其适用效果很差^[9]。后来的一些研究也得出了类似的结论, 同时还表明在多数情况下参数模型的模拟效果优于不同形式的非参数模型^[5~7,10]。但是到目前为止, 已有的研究仅限于参数模型与非参数模型之间的对比, 而对不同参数模型的相对优劣和适用情况的评价尚不多见。有鉴于此, 本次研究中我们利用河南封丘地区 3 种壤土类土壤的颗粒分析资料对几种参数模型的适应性进行了评价, 以便为今后采用间接方法估计该地区的土壤水力性质提供科学的依据。

1 描述土壤颗粒大小分布的参数模型

1.1 改进的 van Genuchten 模型

van Genuchten^[11] 提出了一个描述土壤水分特征

* 国家自然科学基金项目 (编号 49971041 和 40271059) 资助

作者简介: 刘建立 (1973~), 男, 河北高邑人, 副研究员, 从事地下水流与溶质运移数值模拟研究。E-mail: jlliu@issas.ac.cn

收稿日期: 2003-01-08; 收到修改稿日期: 2003-05-20

曲线的经验公式,在土壤水研究中得到了广泛的应用。经改进后,该公式可以用来描述土壤颗粒大小分布。改进后的公式如下^[6]

$$C = C_{\min} + \left(1 - C_{\min}\right) \left[1 + (aD)^b\right]^{-1 + 1/b} \quad (1)$$

式中, C 是对应于颗粒直径 D 的累积质量百分含量, a 和 b 是曲线的形状参数, C_{\min} 是对应于最小实测粒径 D_{\min} (通常是粘粒粒径) 颗粒的累积百分含量。为了与 van Genuchten 水分特征曲线模型区分, 这里将其称作改进的 van Genuchten 模型(简称 MVG 模型)。

1.2 改进逻辑生长模型

改进的逻辑生长模型(Modified logistic growth model, 简称 MLog 模型)形式如下^[6]:

$$C = \frac{1}{1 + a \exp(-bD^c)} \quad (2)$$

其中, a 、 b 和 c 都是形状参数。与常用的逻辑生长模型相比, 式(2)中多了一个指数参数 c 。

1.3 Gompertz 模型

Nemes 等^[7]首先将 Gompertz 模型(简称 Gomp 模型)应用到土壤颗粒分布的插值研究中, 其表达式如下:

$$C = a + b \exp\left\{-\exp[-c(D-d)]\right\} \quad (3)$$

Gompertz 模型中有 4 个形状参数, 即 a 、 b 、 c 和 d , 其中 $c < 0$ 。

1.4 Fredlund 模型

Fredlund 等^[5]提出了一个包含 4 个待定参数的

公式来描述土壤颗粒分布曲线, 其表达式如下:

$$C = \left\{ \ln \left[\exp(1) + \left(\frac{a}{D} \right)^b \right] \right\}^{-c} \left\{ 1.0 - \frac{\ln \left[1 + \frac{d}{D} \right]}{\ln \left[1 + \frac{d}{D_{\min}} \right]} \right\}^7 \quad (4)$$

式中, a 、 b 、 c 和 d 为形状参数。Fredlund 等^[5]指出, 参数 $d = 0.001$ 时的描述结果通常具有足够的精度, 因此这里分两种情形进行研究, 即 $d = 0.001$ (简称为 Fred3P 模型) 和 d 为变量的情形(Fred4P 模型)。上述五种模型都是非线性的, 其中的形状参数需要根据颗粒分析资料通过非线性最小二乘法确定。

2 材料与方法

采用的土壤样本来自中国科学院封丘农业生态试验站。封丘地区的地貌类型属黄淮海冲积平原区, 土壤质地共分 3 种类型, 即砂壤土、粉砂粘壤土和粉砂壤土。每种质地的土壤各采集了 100 个样本, 在实验室内用吸管法分析这 300 个土样的颗粒大小分布。共分为 8 个级别, 即 1、2、5、10、50、100、250、500 μm 。从分析结果可以看出这 3 种壤土类土壤的颗粒分布具有较大的差别(见图 1), 适合于评价不同参数模型的适用情况。

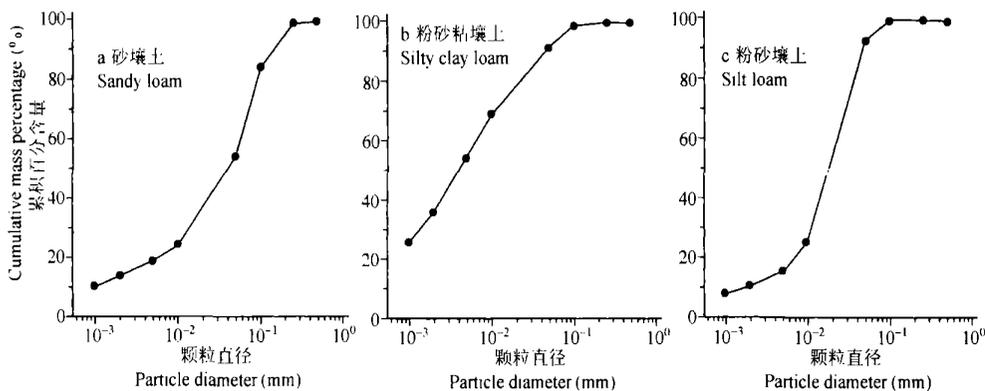


图 1 中国科学院封丘生态试验站三种质地土壤的算术平均颗粒分布曲线(各 100 个样本平均值)

Fig 1 Arithmetic average particle-size distributions of sandy loam, silty clay loam, and silt loam at the Fengqiu Experimental Station, CAS

模型中形状参数的最优估计通过一个改进的 Levenberg-Marquardt 非线性最小二乘法子程序^[12]来完成。为比较不同参数模型的计算效果, 这里采用了两个指标, 即实测百分含量与计算值之间的均方根误差(Root mean squared error, RMSE)和确定性系数 R^2 (Coefficient of determination)。

3 结果与讨论

五种参数模型对 300 个样本的总体模拟效果见表 1。从表中可知, 模型计算得到的累积质量百分含量均方根误差和确定性系数的变化趋势是一致

的,即:除了 Gomp 模型之外,随着模型中参数个数的增多,模拟的效果明显提高。其中,两参数的 MVG 模型效果最差,对于 300 个土壤样本其均方根误差平均值为 4.244,确定性系数平均值为 0.983。含有 4 个参数的 Fred4P 模型均方根误差平均值为 0.897,确定性系数平均为 0.999,而且其均方根误差和确定性系数的标准差在这五种模型中是最小的,因此其总体效果是最佳的。MLog、Fred3P 和 Gomp 模型的计算结果介于 MVG 和

Fred4p 模型之间。其中, Fred3P 模型效果好于 MLog 模型,而 MLog 模型的效果优于 Gomp 模型。相对于 Fred4P 模型,减少了一个形状参数的 Fred3P 模型总体效果仅略微变差。值得注意的是, Gomp 模型中虽然包含 4 个形状参数,但其计算结果明显比三参数的 Fred3P 和 MLog 模型差。这说明参数多的模型其模拟效果不一定更好,同时增加的参数会影响到模型的简单性并提高对实测数据点个数的要求。

表 1 参数模型计算结果的均方根误差和确定性系数(300 个样本)

Table 1 Root mean squared errors (RMSE) and coefficients of determination (R^2) of the calculations by the five parametric models (for 300 soil samples)

模型 Models	均方根误差 RMSE(%)				确定性系数 R^2			
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
MVG	1.061	9.685	4.244	1.538	0.896	0.999	0.983	0.0172
MLog	0.072	3.691	1.133	0.757	0.989	1.0	0.998	0.0020
Fred3P	0.053	3.500	0.996	0.617	0.988	1.0	0.999	0.0017
Gomp	0.069	7.137	1.754	1.244	0.957	1.0	0.995	0.0068
Fred4P	0.044	2.653	0.897	0.466	0.992	1.0	0.999	0.0013

由于河南封丘地区 3 种壤土类土壤的颗粒大小分布差异很大,我们还比较了不同参数模型对这 3 种质地土壤颗粒分布曲线的模拟结果(表 2)。根据均方根误差和确定性系数这两个指标,可以知道 Fred4P 模型对 3 种质地土壤的计算结果都是最理想的。特别是对砂壤土,100 个样本的均方根误差平均值为 0.598,远远小于其它几种模型的计算误差。

这显示了 Fred4P 模型具有极强的灵活性和适用性。Gomp 模型对粉砂粘壤土和粉砂壤土的模拟效果仅优于两参数的 MVG 模型,比包含 3 个参数的 MLog 模型和 Fred3P 模型差。MLog 模型和 Fred3P 模型对粉砂粘壤土和粉砂壤土的模拟结果与 Fred4P 模型十分接近。同前面的分析一样,两参数的 MVG 模型对 3 种土壤颗粒大小分布的描述效果是最差的。

表 2 参数模型对不同质地土壤计算结果的均方根误差和确定性系数

Table 2 Root mean squared errors(RMSE) and coefficients of determination (R^2) of the calculations by the five different parametric models of three soils different in textures

模型 Models	均方根误差 RMSE(%)			确定性系数 R^2		
	砂壤土 Sandy loam	粉砂粘壤土 Silty clay loam	粉砂壤土 Silt loam	砂壤土 Sandy loam	粉砂粘壤土 Silty clay loam	粉砂壤土 Silt loam
MVG	4.492	5.608	2.634	0.988	0.964	0.996
MLog	1.648	1.288	0.446	0.998	0.998	1.000
Fred3P	1.156	1.361	0.471	0.999	0.998	0.999
Gomp	1.686	2.828	0.747	0.997	0.989	0.999
Fred4P	0.598	1.212	0.438	1.000	0.998	1.000

图 2 是 3 种质地土壤的典型样本用参数模型计算的结果与实测值的对比。从图中可以得到与前面同样的结论,即 Fred4P 模型对这 3 种差异较大的土壤颗粒分布模拟效果都很理想。Fred3P 和 MLog 模

型对于粉砂粘壤土和粉砂壤土的模拟效果与 Fred4P 模型十分接近,无明显区别。而对于砂壤土,这两个模型在颗粒分布曲线的细颗粒段($< 0.05 \text{ mm}$)存在一定的误差,计算结果偏离了实测曲线。Gomp 模型除

了存在上述问题之外,对粉砂粘壤土的粗颗粒段也存在较大的误差。在3种土壤颗粒分布曲线的0.01~

0.1 mm段,两参数MVG模型的计算结果均存在较大的偏差,无法准确描述颗粒分布曲线的形状。

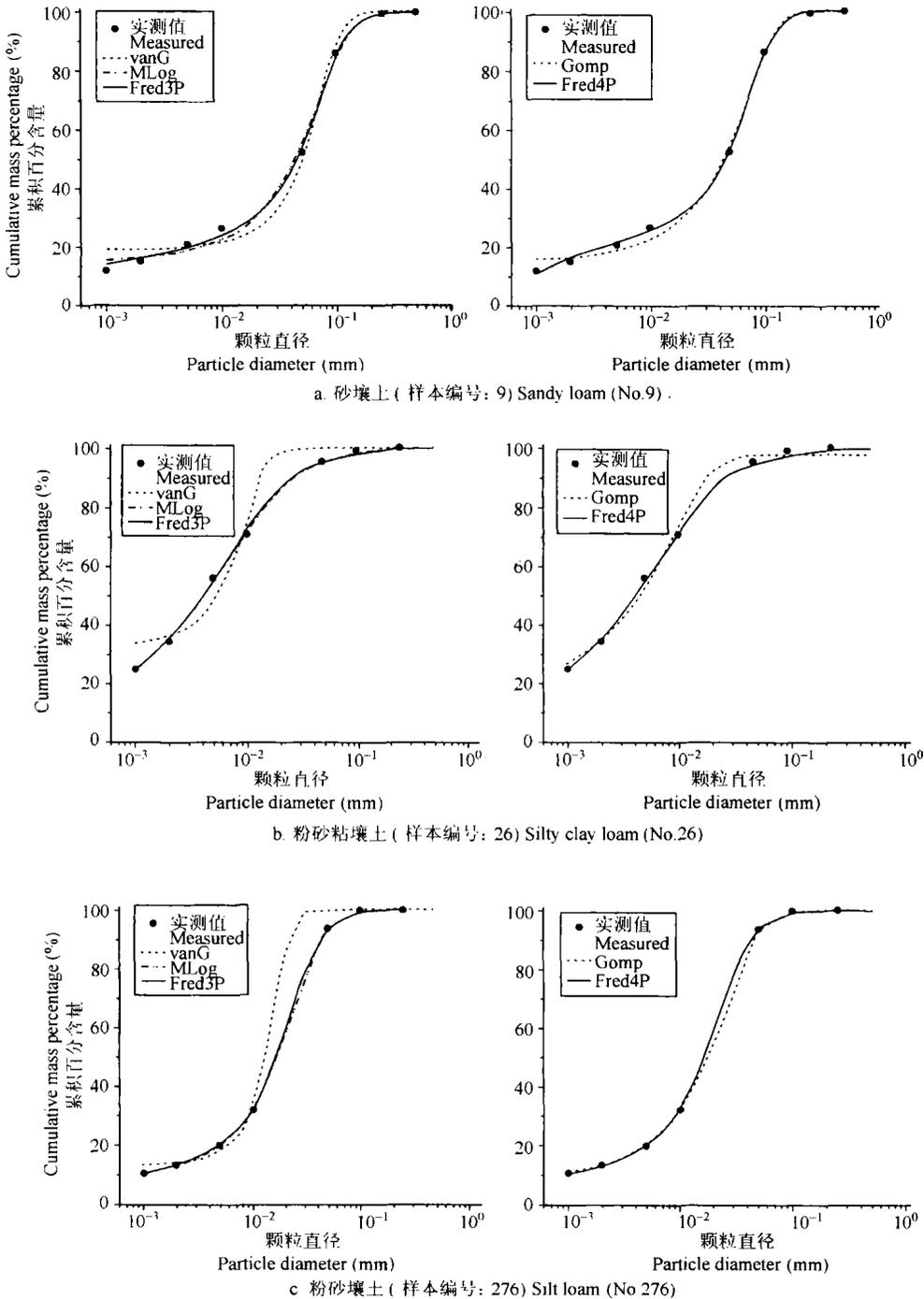


图2 参数模型计算结果与实测颗粒分布的对比

Fig.2 Comparison between measured and model-calculated particle-size distributions

4 结论

综上所述,对河南封丘地区3种壤土类土壤颗粒分析资料的研究表明,包含4个参数的Fred4P模

型对3种质地土壤的模拟结果最为理想,尤其是对砂壤土细颗粒段其效果要优于三参数的Fred3P模型和MLog模型。对于粉砂粘壤土和粉砂壤土,这3种模型的计算结果无明显差别,效果都很理想。四参数的Gomp模型效果相对较差,这说明增加模型

中的参数个数并不一定能提高模型的描述效果。相对于其它几种参数模型, MVG 模型的形式虽然最为简单, 但其计算误差相对较大, 不能精确地描述封丘地区的土壤颗粒分布。颗粒大小分布资料常被用来间接估计土壤的水力性质, 其结果的精度在很大程度上取决于所采用的土壤颗粒分布模型。因此, 本文的研究结果对于在该地区采用间接方法估计土壤的水力性质和进行水分与溶质运移模拟具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Arya L M, Paris J F. 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: 1 023~ 1 030
- [2] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 987~ 996
- [3] Zhuang J, Yan J, Miyazaki T. Estimating water retention characteristic from soil particle size distribution using a non-similar media concept. *Soil Science*, 2001, 166: 308~ 321
- [4] Campbell G S. *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil-Plant Systems*. Amsterdam: Elsevier, 1985
- [5] Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W. An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37: 817~ 827
- [6] 刘建立, 徐绍辉, 刘慧. 几种土壤累积粒径分布模型的对比研究. *水科学进展*, 2003, 14(5): 588~ 592. Liu J L, Xu S H, Liu H. Investigation of different models to describe soil particle-size distribution data(In Chinese) . *Advances in Water Science*, 2003, 14(5): 588~ 592
- [7] Nemes A, Wstén J H M, Lilly A, *et al.* Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. *Geoderma*, 1999, 90: 187~ 202
- [8] Shirazi M A, Boersma L. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 142~ 147
- [9] Buchan G D. Applicability of the simple lognormal model to particle-size distribution in soils. *Soil Science*, 1989, 147: 155~ 161
- [10] Hwang S I, Lee K P, Lee D S, *et al.* Models for estimating soil particle size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66: 1 143~ 1 150
- [11] van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 892~ 898
- [12] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, *et al.* *Numerical Recipes in Fortran 77*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992

APPLICATION OF PARAMETRIC MODELS TO DESCRIPTION OF PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION IN LOAMY SOILS

Liu Jianli¹ Xu Shaohui¹

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Liu Hui² Guo Fei²

(*Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

Abstract Particle-size distribution is a fundamental soil physical property, which may be used as the basis to determine other soil properties such as water retention characteristics. Describing soil particle-size distribution by parametric models has various advantages. In the present study, suitability of five parametric models is evaluated based on the data of particle-size analysis of 300 samples of three different type soils collected at Fengqiu Experimental Station, Chinese Academy of Sciences. Results indicate that the four-parameter Fred4P model shows the best representation of particle-size distributions of the three types of soils. The three-parameter Fred3P model and MLog model produce comparative results for silty clay loam and silt loam soils, but results not as good for sandy loam soils. Gomp model is even worse than Fred3P and MLog models in calculation error. The two-parameter MVG model yields the largest errors among the five models, and therefore is not suitable for describing soil particle-size distributions in Fengqiu area.

Key words Soil; Particle-size distribution; Parametric model; Fengqiu