

土壤颗粒分布参数模型对黄土性土壤的适应性研究

赵爱辉, 黄明斌, 史竹叶

(西北农林科技大学水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 土壤颗粒组成是土壤最基本的物理性质之一, 其分布曲线可用于估算土壤的水力学性质, 然而对于土壤颗粒分布曲线的完整表达需要借助于参数模型, 对于不同类型的土壤, 参数模型的拟合效果不尽相同。为了选择能够较好描述黄土性土壤颗粒分布状况的参数模型, 该文采用了 3 个指标——相关系数 (R), 均方根误差 ($RMSE$) 和 Akaike 信息准则 (AIC) 值, 对 3 类共 10 个参数模型 (单参数模型 2 个, 二参数模型 6 个, 三参数模型 2 个) 在黄土性土壤上的适应性进行了评价 (共 828 个土壤颗粒分析资料)。结果表明: 简化的三参数 Fredlund 模型对黄土性土壤颗粒分布的拟合效果最好, 且受质地影响较小, 二参数 Weibull 模型次之, 单参数的 Jaky 模型效果最差。三参数 Fredlund 模型是估算黄土性土壤颗粒组成的最适宜模型。

关键词: 土壤颗粒组成; 黄土性土壤; 参数模型; 黄土高原

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-1-0001-06

赵爱辉, 黄明斌, 史竹叶. 土壤颗粒分布参数模型对黄土性土壤的适应性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 1-6.
Zhao Aihui, Huang Mingbin, Shi Zhuye. Evaluation of parameter models for estimating loess soil particle size distribution [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)

0 引言

土壤颗粒组成 (PSD) 是土壤最基本的物理性质之一, 其颗粒分布曲线已被用来间接推求土壤的一些重要水力学性质, 如土壤水分特征曲线 (SWRC)、土壤饱和及非饱和导水率等^[1-4]。目前土壤颗粒分析方法已经十分成熟, 能够较精确地测定出土壤颗粒在不同粒径范围内的分布情况^[5,6], 而土壤的其他一些物理性质却难以直接测定, 有些性质 (如 SWRC 等) 在实验室条件下可以直接测定, 但费时、费力, 且精确度较低, 可重复性差^[7]。因此, 应用土壤颗粒分布曲线预测土壤的其他水力学性质已经成为相关领域的研究热点^[2,8-10]。

应用土壤颗粒组成预测土壤的水力学性质, 需要确定连续的土壤颗粒分布曲线, 而实验室测得的数据多为几个间断的粒级分布点, 这在一定程度上限制了用土壤颗粒分布来推求土壤的其他物理性质^[1,11]。为了得到连续的颗粒分布曲线, 许多研究者提出用参数模型来描述土壤的颗粒分布。目前广泛使用的描述土壤颗粒分布曲线

的参数模型主要有如下几类: (1) 单参数模型, 如 Jaky 模型^[12]等; (2) 二参数模型, 如 Gompertz 模型^[13]、Weibull 模型^[14]和 Morgan 等模型^[15]等; (3) 三参数模型, 如简化的 Fredlund 模型^[16]和 Skaggs 等模型^[17]等。单参数模型因仅含有一个参数, 难以准确描述土壤的颗粒组成, 所以其精度和实用性受到限制, 如 Hwang 等^[1]在对 7 个模型进行比较分析时发现单参数的 Jaky 模型拟合效果最差。多参数模型的拟合效果虽然有所提高, 但随着参数个数的增加, 其运算强度和对实测值的要求也有所提高, 从而降低了模型的实用性^[6], 因而并非参数越多越好。如 Munkholm 等^[18]研究表明: 基于 Akaike 信息准则 (AIC) 评价指标, 二参数 Weibull 模型的拟合效果比三参数 Weibull 模型的拟合效果更好。另外, 模型拟合效果受模型种类以及土壤质地的影响。

黄土高原土壤为典型的黄土性土壤, 土壤结构具有地带性, 由北向南分布着 4 个土壤质地带, 分别为砂壤带、轻壤带、中壤带和重壤带。颗粒组成以 0.05~0.01 mm 的粗粉粒为主, 大部分地方含量变化在 50% 左右。细砂粒含量从北向南逐渐减少, 粗粉粒含量和物理性黏粒含量从北向南逐渐增加^[19]。黄土高原土壤结构的地带性特征为利用颗粒分布曲线间接推求土壤其他物理性质奠定了基础。本研究选择目前广泛使用的描述土壤颗粒分布特征的 10 个参数模型, 采用 3 个评价指标, 利用在黄土高原采集的 828 个土壤样品的颗粒分析资料, 确定能够描述黄土性土壤颗粒分布的理想参数模型, 为今后利用

收稿日期: 2006-12-27 修订日期: 2007-10-25

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划; 国家自然科学基金 (40671083); 西北农林科技大学创新团队。

作者简介: 赵爱辉 (1981-) 女, 河南新乡人, 研究方向: 土壤物理。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100

※通讯作者: 黄明斌 (1968-), 男, 湖北钟祥人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤物理和生态水文方面的研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: hmbd@nwsuaf.edu.cn

土壤颗粒分布曲线间接估算黄土性土壤的水力学性质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 颗粒分布模型

土壤颗粒分布模型主要有参数模型和统计转换模型两大类^[1]。相比而言,参数模型有更广泛的实用性,它不仅能够完整地描述土壤颗粒分布状况^[6,11],还能对已有的

颗粒分析资料进行标准化插值,增加原有数据的利用价值^[11,13]。因此,本研究仅评价参数模型,其中单参数模型有:Jaky 模型、Skaggs 等单参数 (S1P) 模型;二参数模型有:Gompertz 模型、Weibull 模型、Morgan 等模型、Haverkamp & Parlange (HP) 模型、Lima & Silva (LS) 模型和 Skaggs 等二参数(S2P)模型;三参数模型有:简化的 Fredlund (Fred3P) 模型、Skaggs 等三参数 (S3P) 模型。各类模型的来源及其表达式见表 1。

表 1 含有不同参数的土壤颗粒分布模型

Table 1 Soil particle-size distribution(PSD) models with different parameters

模型类型	模型及来源	模型参数	
单	Jaky 模型 ^[12]	$F(d) = e^{-\frac{1}{p^2} \ln(\frac{d}{d_0})^2}$	p ($d_0=1.00$)
参	Skaggs 等 (S1P) 模型 ^[17]	$F(d) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{F_0} - 1\right) e^{-kd}}$	k
二	Gompertz 模型 ^[13]	$F(d) = e^{-e^{-k(d-u)}}$	k, u
	Weibull 模型 ^[14]	$F(d) = 1 - (1 - F_0) e^{-(kd)^n}$	k, n
	Morgan 等模型 ^[15]	$F(d) = 1 - \frac{1 - F_0}{1 + (kd)^n}$	k, n
二	Haverkamp & Parlange (HP) 模型 ^[20]	$F(d) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{d_g}{d}\right)^n\right]^m}$	d_g, n ($m = 1 - 1/n$)
参	Skaggs 等 (S2P) 模型 ^[17]	$F(d) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{F_0} - 1\right) e^{-(kd)^n}}$	k, n
数	Lima & Silva (LS) 模型 ^[21]	$F(d) = F_0 + \frac{1 - F_0}{\left[1 + \left(\frac{\delta}{d}\right)^n\right]^m}$	δ, n ($m = 1 - 1/n$)
三	简化的 Fredlund 模型 (Fred3P) ^[16]	$F(d) = \frac{1}{\ln[e + (\frac{\alpha}{d})^n]^m} \left\{ 1 - \frac{\left[\ln\left(1 + \frac{d_r}{d}\right) \right]^7}{\left[\ln\left(1 + \frac{d_r}{d_{\min}}\right) \right]^7} \right\}$	α, m, n ($d_r = 0.001$)
参	Skaggs 等 (S3P) 模型 ^[17]	$F(d) = \frac{1}{1 + \alpha \exp(-kd^n)}$	α, k, n
数			

注: $F(d)$ ——粒径为 d 的土壤颗粒累积质量百分含量; d ——颗粒粒径, mm; F_0 ——最小粒径累积质量百分含量; d_{\min} ——最小颗粒粒径, mm。

1.2 土壤样品分布与土壤颗粒组成测定方法

该研究所涉及到的 828 个土壤样品均采自黄土高原,基本包括了黄土高原的所有土壤类型、地形特征和气候区等。根据国际土壤质地分类标准,828 个土样可分为粉质壤土、粉质黏壤土、砂壤土、壤土、粉质黏土和壤质砂土 6 类(见表 2)。土壤颗粒分析方法为吸管法。

表 2 不同质地类型土壤的样本数

Table 2 Soil sample numbers of different soil textures

土壤质地类型	粉质壤土	粉质黏壤土	砂壤土	壤土	粉质黏土	壤质砂土
样本个数	678	30	5	63	7	5

1.3 统计分析

模型参数利用 SAS 系统的 NLIN（非线性）程序拟合。为了确定 10 个土壤颗粒分布参数模型对黄土性土壤的适应性，本文采用了 3 个指标——相关系数（ R ）、均方根误差（ $RMSE$ ）和 Akaike 信息准则（ AIC ）值来评价模型的拟合精度。其中 R 值越大表示拟合效果越好， $RMSE$ 和 AIC 值越小拟合效果越好。三指标的表达式如下

$$R = \frac{\sum (Y_o - \bar{Y}_o)(Y_p - \bar{Y}_p)}{\sqrt{\sum (Y_o - \bar{Y}_o)^2 \sum (Y_p - \bar{Y}_p)^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{b} \sum (Y_p - Y_o)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$AIC = b \left\{ \ln(2\pi) + \ln \left[\sum (Y_p - Y_o)^2 / (b - c) \right] + 1 \right\} + c \quad (3)$$

式中 Y_o ——测定值； Y_p ——预测值； b ——粒级个数； c ——模型参数个数。

2 结果与分析

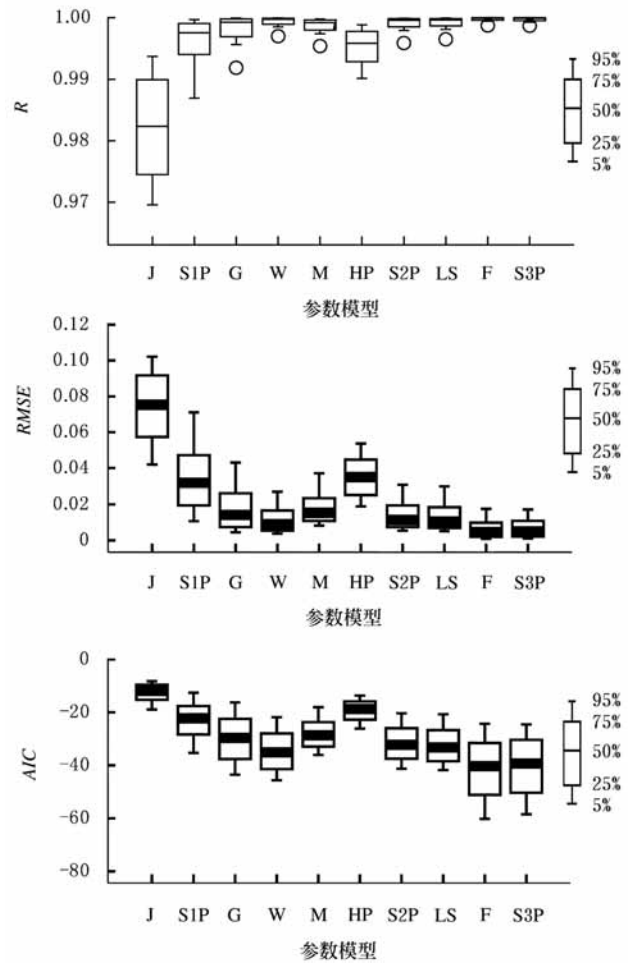
2.1 参数模型拟合效果综合比较

采用不同的标准对模型在黄土性土壤上的颗粒分布拟合效果进行分析，其变化趋势基本一致。从图 1 中可以看出，除 HP 模型外，随着参数个数的增加，模型的拟合效果逐渐提高。单参数的 Jaky 模型拟合效果最差，简化的三参数 Fredlund 模型拟合效果最好。在单参数模型中，S1P 模型的拟合效果明显好于 Jaky 模型，S1P 模型的预测值与实测值之间的相关系数分布在 0.943~1.000 之间，平均值为 0.996；而 Jaky 模型的相关系数分布在 0.955~0.998 之间，平均值为 0.982；另外，S1P 模型的 $RMSE$ 值和 AIC 值也都明显小于 Jaky 模型，其中 S1P 与 Jaky 模型的 $RMSE$ 平均值分别为 0.0342 和 0.0744， AIC 平均值分别为 -23.0 和 -12.5。

在二参数模型中，Weibull 模型的模拟效果最好，75%的 R 值大于 0.999，75%的 $RMSE$ 值小于 0.0132，75%的 AIC 值小于 -30.5， R 、 $RMSE$ 和 AIC 的平均值分别为：0.999、0.0113 和 -34.7。其他 5 个二参数模型的 R 平均值均小于 Weibull 模型， $RMSE$ 和 AIC 的平均值均大于 Weibull 模型。在 6 个二参数模型中，HP 模型的拟合效果最差，其 75%的 R 值小于 0.997，75%的 $RMSE$ 值大于 0.0284，75%的 AIC 值大于 -21.3， R 、 $RMSE$ 和 AIC 的平均值分别为：0.995、0.0356 和 -19.3。

对于三参数模型，Fred3P 模型的拟合效果略好于 S3P 模型。Fred3P 和 S3P 模型的 R 值平均值分别是 1.000、1.000， $RMSE$ 平均值分别是 0.00650、0.00727， AIC 平均值分别是 -41.1、-40.1。另外，比较 R 、 $RMSE$ 和 AIC 值的概率，也可得出同样的结论。在图 1 中，5%概率处，

Fred3P 模型的 R 值大于 S3P 模型，Fred3P 模型的 $RMSE$ 值和 AIC 值又均小于 S3P 模型。



注：J=Jaky, G=Gompertz, W=Weibull, M=Morgan, F=Fred3P（下同）

图 1 不同模型的 R 、 $RMSE$ 和 AIC 值的分布

Fig. 1 Distributions of value of R , $RMSE$, AIC of different models

比较 10 个参数模型可以发现：2 个单参数模型的拟合效果明显不如 6 个二参数模型，而 6 个二参数模型的拟合又明显低于 2 个三参数模型。因此，要提高参数模型的拟合精度，适当考虑增加模型参数的个数是必要的。本研究结果与刘建立等对封丘壤质土的研究结果是一致的^[1]。以 Fred3P 模型为标准，其他参数模型分别与其进行比较发现（图 2），各参数模型的拟合效果优于 Fred3P 模型的样本数均不足总数据的 50%，仅 S3P 模型的模拟效果与 Fred3P 模型最为接近，达到 45% 左右，这与 R 、 $RMSE$ 和 AIC 值表达的信息是一致的。Jaky 模型最差只有 1%，S1P、Morgan、HP 模型也都不足 10%，其他模型多变化在 15% 左右，效果明显低于简化的 Fredlund 模型。

由此可见，依据不同的评价标准可得出同样的结论：各模型对黄土性土壤的颗粒分布拟合效果是 Fred3P 模型 > S3P 模型 > Weibull 模型 > LS 模型、S2P 模型、Morgan 模型、Gompertz 模型 > S1P 模型 > HP 模型 > Jaky 模型。

2.2 土壤质地对参数模型拟合效果的影响

在应用参数模型对土壤颗粒大小分布状况进行预测时，其拟合效果除了受模型种类的影响外，还受到土壤本身物理性状的影响，因而，同一参数模型对不同质地土壤的模拟效果亦不尽相同。从图 3 中可以看出，各个参数模型的模拟效果都不同程度地受到土壤质地的影响。然而，对于研究的 6 种质地的土壤，三参数模型的拟合效果都比较理想。在二参数模型中，总体拟合效果

最好的 Weibull 模型，对粉质黏土的拟合效果较差；总体拟合效果最差的 HP 模型，对粉质黏土的拟合效果却非常好，仅次于三参数模型。Gompertz、LS、Morgan、S2P 模型对粉质壤土的模拟效果都比较好，Morgan 模型对粉质壤土、S2P 模型对壤质砂土的模拟效果也比较好。单参数的 Jaky 模型和 S1P 模型对 6 种质地土壤的拟合效果均很差。

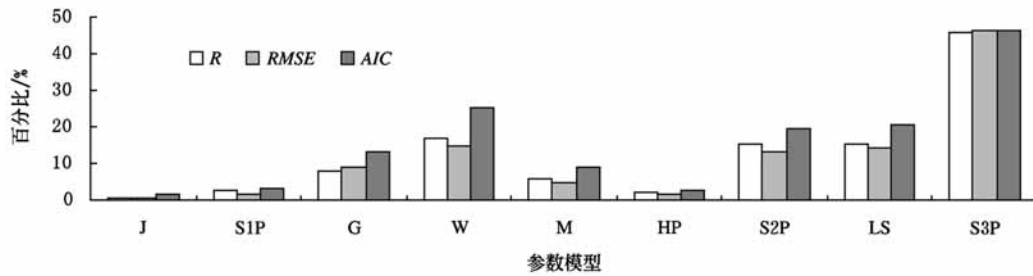
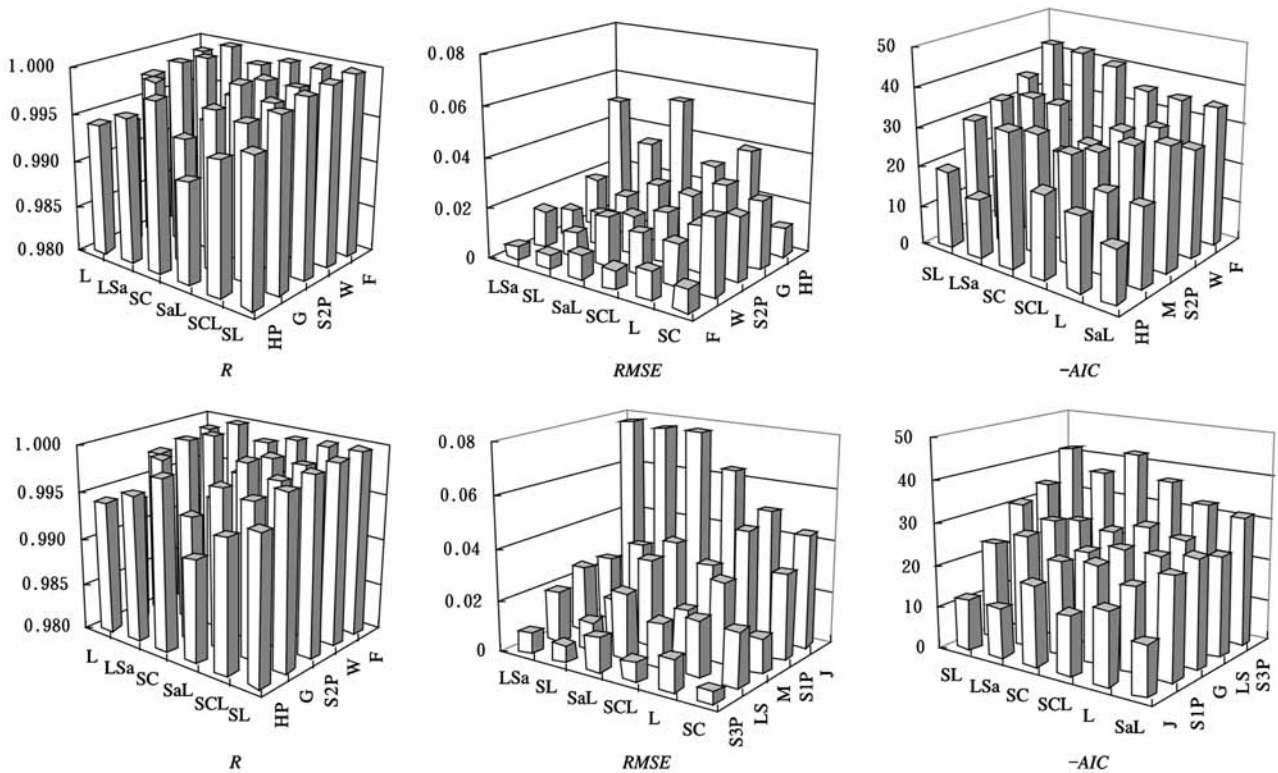


图 2 拟合效果优于 Fred3P 模型的数据占总数据的百分比

Fig.2 Percentage of the data with better fitting result than Fred3P model to total data



注：L=壤土，LSa=壤质砂土，SC=粉质黏土，SaL=砂壤土，SCL=粉质黏壤土，SL=粉质壤土

图 3 土壤质地对模型拟合效果的影响

Fig 3 Impacts of soil textures on fitting result of the models

2.3 颗粒级对模型拟合效果的影响

通过以上分析得出拟合效果最好的单参数模型是 S1P 模型，二参数模型是 Weibull 模型，三参数模型是简化的 Fredlund 模型。现对这 3 个模型在不同粒径范围内的拟合效果进行比较，以进一步检验模型的准确性和适应性。

表 3 列出了不同粒径范围内 3 个模型的预测值与实

测值的比较结果。从确定系数 R^2 可以看出，3 个模型对粒径 <0.001 mm、 $0.01 \sim 0.05$ mm、 $0.05 \sim 0.25$ mm 的拟合精度明显高于另外 3 个粒径范围： $0.001 \sim 0.005$ mm、 $0.005 \sim 0.01$ mm、 $0.25 \sim 1.00$ mm，这可能与粒径中颗粒含量的多少有关。在所分析的样本中，前 3 个粒径的颗粒含量占总含量的 80% 以上，而后 3 个粒径的颗粒含量

不足 20%。另外, 从模型预测值与实测值的比较还可以看出: S1P 模型在粒级 0.01~0.05 mm 范围内的颗粒含量预测值较测定值偏高, 其他粒级范围内颗粒含量的预测值表现为高值区偏高、低值区偏低; Weibull 模型除了在粒级 <0.001 mm 范围内预测的颗粒含量偏高外, 其他粒级范围内颗粒含量的预测值表现为低值区偏高、高值区

偏低; 而 Fred3P 模型除了在 0.005~0.01 mm 粒级范围预测的颗粒含量高于测定值外, 其他粒级范围预测的颗粒含量均小于测定值。因此, 颗粒粒级也影响模型的拟合精度, 3 个模型中, Fred3P 模型整体拟合效果偏好, 可用于模拟黄土性土壤的颗粒分布。

表 3 不同粒级范围模型预测值与测定值的比较

Table 3 Comparison between predicted and experimental value of models with different particle-size scales

粒级/mm	S1P 模型			Weibull 模型			Fredlund 模型		
	斜率	截距	R^2	斜率	截距	R^2	斜率	截距	R^2
<0.001	1.095*	-0.347*	0.994	1.113*	0.006	0.954	0.856*	0.975*	0.939
0.001~0.005	0.609*	-1.153*	0.761	0.656*	0.711*	0.914	0.768*	1.398*	0.847
0.005~0.01	1.266*	-2.569*	0.550	0.866*	2.150*	0.725	1.040*	0.232	0.796
0.01~0.05	1.012	6.791*	0.828	0.894*	4.778*	0.972	0.986*	0.488*	0.987
0.05~0.25	1.158*	-5.301*	0.928	0.953*	1.162*	0.979	0.979*	0.347*	0.991
0.25~1.0	0.696*	-0.473*	0.732	0.825*	-0.116*	0.917	0.803*	0.220*	0.922

注: *表示斜率值与 1.0 存在显著差异、截距与 0.0 之间存在显著差异 ($p < 0.05$)。

3 结 论

1) 随着参数模型参数个数的增加, 其拟合效果逐渐提高, 其中含有 3 个参数的 Fredlund 模型对黄土性土壤颗粒分布的拟合效果最好, S3P 模型次之, 单参数的 Jaky 模型拟合效果最差。在二参数模型中, Weibull 模型的拟合效果最好, HP 模型最差。

2) 对于不同质地的土壤, 三参数的 Fred3P 模型和 S3P 模型的拟合效果均比较理想, 且受质地影响很小。二参数模型的拟合效果受质地的影响较大。

3) 参数模型在不同粒级范围内对黄土性土壤颗粒分布的拟合效果不相同, S1P、Weibull 和 Fred3P 模型在粒级 <0.001 mm、0.01~0.05 mm、0.05~0.25 mm 范围内的拟合精度明显高于 0.001~0.005 mm、0.005~0.01 mm、0.25~1.00 mm 3 个粒级。

[参 考 文 献]

[1] Hwang S I, Lee K P, Lee D S, et al. Models for estimating soil particle-size distribution[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 1143-1150.

[2] Arya L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45:1023-1030.

[3] Gupta S C, Larson W E. Estimating soil-water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density[J]. Water Resour Res, 1979, 15:1633-1635.

[4] Hwang S I, Susan E P. Using Particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties[J]. Soil Science Society

of America Journal, 2003,67(4):1103-1112

[5] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978

[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[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 588-592.

[7] 刘建立, 徐绍辉, 刘 慧. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展[J]. 水利学报, 2004, (2): 68-76.

[8] van Genuchten M Th, Leij F J. On estimating the hydraulic properties of unsaturated soils[A]. In: van Genuchten M Th et al. (ed.) Proc. Int. Worksh. on Indirect Methods of Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils [C]. University of California, Riverside, CA, 1992, 1-14.

[9] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53:987-996.

[10] Zhuang J, Yan J, et al. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept[J]. Soil Science, 2001, 166: 308-321.

[11] 刘建立, 徐绍辉, 刘 慧, 等. 参数模型在壤土类土壤颗粒大小分布中的应用[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 375-379.

[12] Jaky J. Soil mechanics[M]. (In Hungarian.) Eyomda, Budapest. 1944.

[13] Nemes A, Wosten J H M, Lilly A et al. Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases[J]. Geoderma, 1999, 90:187-202.

[14] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 73:293-297.

[15] Morgan P H, Mercer L P, Flodin N W. General model

- for nutritional responses of higher organisms[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 1975, 42:4327—4331.
- [16] Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W. An equation to represent grain-size distribution[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37: 817—827.
- [17] Skaggs T H, Arya L M, Shouse P J et al. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 73: 1038—1044.
- [18] Munkholm L, Perfect E. Brittle fracture of soil aggregates: Weibull models and methods of parameter estimation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69:1565—1571.
- [19] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985,2:1—17.
- [20] Haverkamp R, Parlange J Y. Predicting the water-retention curver from particle-size distribution- I : sandy soils without organic matter[J]. Soil Science of America Journal, 1986, 142:325—339.
- [21] da Silva E M. Comparison of mathematical models for particle-size distribution curves[J]. Esq. Agropec. Bras. Abr. 2004, 39(4):363—370.

Evaluation of parameter models for estimating loess soil particle-size distribution

Zhao Aihui, Huang Mingbin, Shi Zhuye

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: The soil particle-size distribution (PSD) is a fundamental soil physical property. PSD curve is widely used as a basis for estimating soil hydraulic properties such as the water retention curve and saturated and unsaturated hydraulic conductivities. However, the disconnected experimental data of PSD sets often limit its uses, and the parameter models are needed to simulate PSD curves. Many models have been developed for simulating PSD curves, and the performances of these models varied with the soil types. To determine the optimal model to fit the PSD curves for loess soils, ten popular models (two 1-parameter models, six 2-parameter models, and two 3-parameter models) were used to fit 828-PSD data sets measured in the Loess Plateau of China. Three criteria, correlation coefficient (R), root mean square error ($RMSE$), and Akaike's information criterion (AIC) were used to evaluate the performances of ten models. The results show that the Fredlund model with three parameters presents the best performance for the majority of soils, and has little influence by the soil texture. The performance of Weibull model with two parameters is less than that of Fredlund model and better than that of others. The Jaky model with single parameter presents the worst performance in the whole models. The Fredlund model with three parameters is testified to be suitable for estimating the PSD curves of the loess soils.

Key words: soil particle-size distribution; loess soil; parameter model; Loess Plateau