Van Genuchten 模型在土壤水分特征曲线拟合分析中的应用

王小华[1],贾克力[1],刘景辉[2],李立军[2]
(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018;
2.内蒙古农业大学农学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要:利用 Matlab 软件的非线性拟合和非线性回归函数,对传统耕作和免耕耕作两种方式下土壤水分特征曲线进行分析,建立相应的 Van Genuchten 模型,并对模型进行检验和应用。结果表明,非线性回归较非线性拟合适应性高;Van Genuchten 模型适应性好,可以应用于不同耕作条件下的土壤水分分析。

关键词:土壤水分特征曲线;Van Genuchten 模型;耕作,非线性拟合,非线性回归函数
中图分类号:S152.7 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-7601(2009)02-0179-05

土壤水分特征曲线表征土壤中水的含量与势能之间的关系,是研究包气带土壤水分的保持能力和运移所用到的基本特性曲线[1]。它定义了压力水头与土壤水分含量之间的函数关系,是模拟水分和溶质在非饱和土壤中运移的关键参数,是非线性的函数,受到多种环境和土壤因素的影响。目前人们已提出了许多经验公式来描述土壤水分特征曲线,比较常用的有:Brooks—Corey 模型、Gardner 模型、Van Genuchten 模型和 Gardner—Russo 模型[2~5]。徐绍辉等[6]对此 4 个模型的适应性进行了分析,认为 Van Genuchten 模型无论是对粗质地土壤,还是较黏质地的土壤,其拟合效果均较好;夏卫生等[7]通过对国内外土壤水动力学参数研究结果进行分析也得出,该模型不仅拟合效果较好,并能和土壤的机械组成和容重等联系起来,从土壤本身特性上找到其含义。因此,在所有描述土壤水分特征曲线的众多模型中,Van Genuchten 模型以其线型与实测数据曲线拟合程度好而得到广泛应用。

本文通过野外试验,分析了免耕耕作和传统耕作条件下的土壤水吸力和对应的土壤含水量数据。采用实测数据分别建立了这两种条件下的 Van Genuchten 模型;利用 Matlab 软件,得出了 Van Genuchten 模型的 4 个参数值。模拟结果表明 Van Genuchten 模型适应性好,可以应用于不同耕作条件下的土壤水分分析。

1 Van Genuchten 模型

1.1 土壤水分特征曲线 Van Genuchten 模型的具体表达形式

$$\theta = \theta_r + (\theta_S - \theta_r)/[1 + (\alpha \cdot h)^n]^m$$

式中:θ 是土壤体积含水量(cm^3/cm^3);h 是压力水头(−cm);θ_r 和 θ_S 分别代表土壤的剩余体积含水量和饱和体积含水量(cm^3/cm^3);$\alpha(cm^{-1})$ 和 n 是经验拟合参数(或曲线性状参数),而 $m = 1 - 1/n$。为适于目前土壤水分测定方法的习惯,本文以土壤水吸力值(+) 代替压力水头(−),以重量含水量(g/g) 代替体积含水量(cm^3/cm^3) 来研究此模型的参数求解。由于本文的目的在于研究 Van Genuchten 模型求参的方法,因此不受所选单位的影响。

1.2 Van Genuchten 模型参数的求解

对于 Van Genuchten 模型中 θ_r、θ_S、α、n 四个参数的推导,Matlab 软件提供了相应的函数可以直接实现。一是最优化工具箱里的非线性拟合函数 lsqcurvefit;二是概率论和数理统计工具箱里的非线性回归函数 nlinfit 函数和 nlintool 函数。两工具箱的函数各有优势,本文分别利用这两工具箱的函数对 Van Genuchten 模型中 4 个参数进行求算,并对其进行比较和评述。

1.3 Van Genuchten 模型参数的检验

求参效果的好坏,需要对得到的拟合或回归方

收稿日期:2008-09-28
基金项目:国家科技支撑课题"农牧交错风沙区保护性耕作技术集成研究与示范"(2006BAD15B05)
作者简介:王小华(1983—),女,内蒙古乌兰察布市人,在读硕士,主要研究方向为水文与水资源。E-mail:nmgxiaohua@sohu.com。
通讯作者:贾克力(1958—),男,内蒙古呼和浩特市人,教授,主要研究方向为水文与水资源。E-mail:kelijia58@yahoo.com。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

程进行显著性检验。显著性检验有多种，但比较适合于非线性模型的检验有残差分析。

2 试验方案及研究方法

2.1 背景资料

试验实施地点是内蒙古武川县上秃亥乡，位于内蒙古中部，阴山北麓，该地区适宜种植一年一熟生育期较短的作物，主要有：马铃薯、小麦、燕麦和油菜等。试验设传统耕作(conventional tillage)、免耕(zero tillage)两个处理。油菜－燕麦－大豆轮作。土壤质地为砂壤土。

1) 传统耕作：作物收获后至冻结前三耕两耱

2) 免耕：播种前有上一季作物秸秆(直立)自然分布于农田，采用免耕播种机一次性完成秸秆部分打断、播种、施肥和镇压作业。免耕播种机为大小行播种。

2.2 数据采集

分别在传统耕作与免耕两种耕作方式下按其不同自然剖面层次用环刀(体积为 100 cm^3)取土。每层取 3 个土样，共 54 个土样，分别进行编号。采用压力膜仪进行测定，对 0～10 cm，10～30 cm 土层的土壤进行了分析，其它土层分析方法与此相同。

3 土壤水分特征曲线 Van Genuchten 模型

建模过程包括模型参数的求解、模型参数的检验、模型的应用。

3.1 参数的求解

3.1.1 *非线性拟合函数* 运用非线性拟合函数求得的参数结果如表 1 所示。

3.1.2 *非线性回归函数* 运用非线性回归函数求得的参数结果如表 2 所示。

表 1 运用非线性拟合函数求得的参数结果

Table 1 Result through nonlinear curve fitting

耕作方式 Type	土层 Depth(cm)	θ_S	θ_r	α	n
传统耕作 CT	0～10	0.4636	0.1510	0.0158	1.6314
免耕耕作 ZT	0～10	0.4435	0.1443	0.0189	1.5609
传统耕作 CT	10～30	0.4303	0.1662	0.0020	2.2949
免耕耕作 ZT	10～30	0.4912	0.1446	0.0018	3.0017

表 2 运用非线性回归函数求得的参数结果

Table 2 Result through nonlinear regression function

耕作方式 Type	土层 Depth(cm)	θ_S	θ_r	α	n
传统耕作 CT	0～10	0.4632	0.1541	0.0150	1.6716
免耕耕作 ZT	0～10	0.4435	0.1479	0.0177	1.6032
传统耕作 CT	10～30	0.4210	0.1821	0.0014	6.6527
免耕耕作 ZT	10～30	0.4829	0.1558	0.0016	6.3629

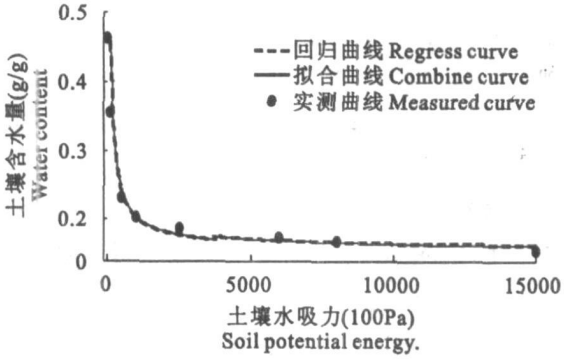

图 1 传统耕作下 0～10 cm 土层的土壤水分特征曲线

Fig.1 0～10 cm soil moisture characteristic curve under conventional tillage

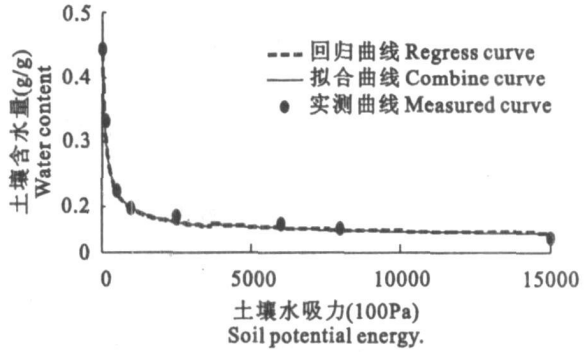

图 2 免耕耕作下 0～10 cm 土层的土壤水分特征曲线

Fig.2 0～10 cm soil moisture characteristic curve under zero tillage

图 1 与图 2 结果显示，两种方法所得模型的曲线基本上还是重合的。由此可见，两者对该模型参数的推导都非常成功，但要真正辨出两种求参方法效果的差异，还需进行检验分析。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 3 与图 4 结果显示,两种方法所得模型的曲线基本上还是重合的。但是从图中可以看出非线性回归较非线性拟合的适应性高,非线性拟合与非线性回归的最大差异点是在土壤水吸力为 1 bar 的拐点处。当土壤水吸力为 1 bar 时,这时作物因供水不足,是生长受到阻滞,因此,视其为有效水的转折点。称此时的土壤含水率为毛管断裂含水率。用非线性拟合求得的毛管断裂含水率要明显高于实测值。分析其原因可能与 n 这个参数有关,用非线性拟合与非线性回归两种方法求得的参数中差异最大的是参数 n 的取值。用非线性拟合求得的 n 值较小,所以曲线形状较缓。用非线性回归求得的 n 值较大,所以曲线形状较陡。n 值决定土壤水分特征曲线的坡度。

3.2　参数的检验

残差分析。求参效果的好坏,需要对得到的拟合或回归方程进行检验。检验方法是残差分析,即求参结果所建立的模型计算值与实测值之间的残差平方和,可用以分析判断拟合和回归结果适应性的高低,残差平方和越小越好。

对于传统耕作下 0～10 cm 土层的残差分析得知两者的残差平方和,分别为 0.0001255 和 0.000118,均小于 0.0005。即两者的显著水平均高于 0.0005。对于免耕耕作下 0～10 cm 土层的残差分析得知两者的残差平方和,分别为0.0001545和 0.0001449,均小于0.0005。即两者的显著水平均高于 0.0005 从而得出了两者的误差均非常小,但非线性回归较非线性拟合的误差小。即非线性回归较非线性拟合的适应性高。

同理对于传统耕作下 10～30 cm 土层的残差分析得知两者的残差平方和,分别为 0.0003917 和 0.0002678,均小于 0.0005。即两者的显著水平均高于 0.0005。对于免耕耕作下 10～30 cm 土层的残差分析得知两者的残差平方和,分别为0.0003910和 0.0002719,均小于 0.0005。即两者的显著水平均高于 0.0005。从而得出了两者的误差均非常小,但非线性回归较非线性拟合的误差小。即非线性回归较非线性拟合的适应性高。

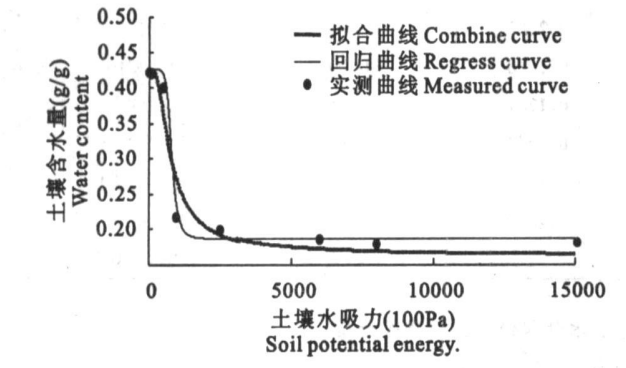

图 3　传统耕作下 10～30 cm 土层的土壤水分特征曲线

Fig.3　10～30 cm soil moisture characteristic curve under conventional tillage

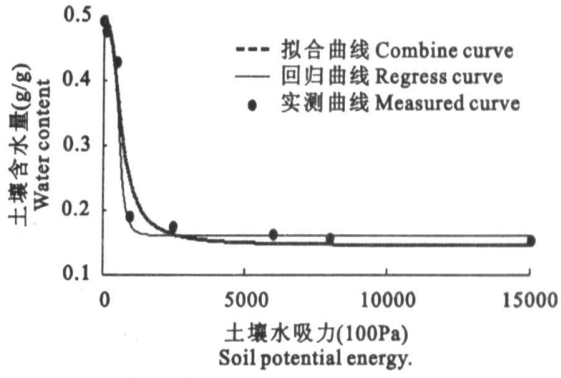

图 4　免耕耕作下 10～30 cm 土层的土壤水分特征曲线

Fig.4　Zero tillage 10～30 cm of soil moisture characteristic curve

表 3　传统耕作下 0～10 cm 土层水分非线性拟合残差分析

Table 3　Residual error analysis of 0～10 cm soil layer under conventional tillage

方法 Method	土壤水吸力(100 Pa) Soil water and potential energy	土壤含水量(g/g) Water content		残差 Residual error	残差平方 Residual error sum of square
		实测值 Measured	计算值 Calculated		
非线性拟合 Nonlinear curve fitting	0	0.4653	0.4636	0.0017	2.89×10^{-6}
	100	0.3546	0.3525	0.0021	4.41×10^{-6}
	500	0.2311	0.2346	−0.0035	1.225×10^{-5}
	960	0.2024	0.2069	−0.0045	2.025×10^{-5}
	2500	0.1868	0.1817	0.0051	2.601×10^{-5}
	6000	0.1732	0.1686	0.0046	2.116×10^{-5}
	8000	0.1679	0.1657	0.0022	4.84×10^{-6}
	15000	0.1551	0.1609	−0.0058	3.364×10^{-5}
					0.0001255

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4 传统耕作下 0～10 cm 土层水分非线性回归残差分析

Table 4 Residual error analysis of 0～10 cm soil layer under conventional tillage

方法 Method	土壤水吸力(100 Pa) Soil water and potential energy	土壤含水量(g/g) Water content		残差 Residual error	残差平方 Residual error sum of square
		实测值 Measured	计算值 Calculated		
非线性回归 Nonlinear regression function	0	0.4653	0.4632	0.0021	4.41×10^{-6}
	100	0.3546	0.3537	0.0009	8.1×10^{-7}
	500	0.2311	0.2329	−0.0018	3.24×10^{-6}
	960	0.2024	0.2054	−0.0030	9.0×10^{-6}
	2500	0.1868	0.1812	0.0056	3.14×10^{-5}
	6000	0.1732	0.1691	0.0041	1.68×10^{-5}
	8000	0.1679	0.1665	0.0014	1.96×10^{-6}
	15000	0.1551	0.1622	−0.0071	5.04×10^{-5}
					0.000118

表 5 免耕耕作下 0～10 cm 土层水分非线性拟合残差分析

Table 5 Zero tillage 0～10 cm analyze residual error

方法 Method	土壤水吸力(100 Pa) Soil water and potential energy	土壤含水量(g/g) Water content		残差 Residual error	残差平方 Residual error sum of square
		实测值 Measured	计算值 Calculated		
非线性拟合 Nonlinear curve fitting	0	0.4434	0.4436	−0.0002	4.0×10^{-8}
	100	0.3332	0.3313	0.0019	3.61×10^{-6}
	500	0.2248	0.2283	−0.0035	1.225×10^{-5}
	960	0.1970	0.2030	−0.006	3.6×10^{-5}
	2500	0.1837	0.1787	0.005	0.000025
	6000	0.1708	0.1654	0.0054	2.916×10^{-5}
	8000	0.1644	0.1622	0.0022	4.84×10^{-6}
	15000	0.1503	0.1569	−0.0066	4.356×10^{-5}
					0.0001545

表 6 免耕耕作下 0～10 cm 土层水分非线性回归残差分析

Table 6 Zero tillage 0～10 cm analyze residual error

方法 Method	土壤水吸力(100 Pa) Soil water and potential energy	土壤含水量(g/g) Water content		残差 Residual error	残差平方 Residual error sum of square
		实测值 Measured	计算值 Calculated		
非线性回归 Nonlinear regression function	0	0.4434	0.4435	−0.0001	1.0×10^{-8}
	100	0.3332	0.3324	−0.0008	6.4×10^{-7}
	500	0.2248	0.2264	−0.0016	2.56×10^{-6}
	960	0.1970	0.2012	−0.0042	1.764×10^{-5}
	2500	0.1837	0.1779	0.0058	3.364×10^{-5}
	6000	0.1708	0.1656	0.0052	2.704×10^{-5}
	8000	0.1644	0.1628	0.0016	2.56×10^{-6}
	15000	0.1503	0.1581	−0.0078	6.084×10^{-5}
					0.0001449

3.3 模型的应用

应用求得的回归方程，绘制了非线性回归后的土壤水分特征曲线。图 5 结果显示，0～10 cm 土层低吸力段传统耕作的持水能力要高于免耕耕作。分析其原因是与土壤结构和紧实度有关。免耕耕作表土层没有秸秆覆盖而且没有经过耕翻，所以表土层土壤紧实，土壤大孔隙相对减少许多，变成了中等大小的孔隙，所以持水能力下降了。相应的传统耕作由于经过了耕翻，土壤疏松，土壤大孔隙增多，所以持水能力较高。10～60 cm 土层低吸力段时，免耕

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

耕作的持水能力要高于传统耕作,分析其原因是与土壤有机质含量有关,在土壤质地相差不大时,有机质含量较高,所以持水能力较高;另外一种原因是因为免耕不翻动土壤,减少了对土壤的作业次数,所以免耕土壤保持了持续稳定的土壤孔隙度,这种良好的土壤结构,有利于土壤上下层的水流运动和气体交换。作物根系以及土壤结构没有受到扰动,其持水性也高于受到扰动的;再者是因为表土土壤紧实,抑制了土壤水分的蒸发,所以保持了较高的含水量。60～80 cm 土层传统耕作与免耕耕作的差异性较 0～60 cm 土层在减小,即随着土层深度的增加传统耕作与免耕耕作之间的差异越来越小。耕作方式对土壤的影响,主要表现在耕作层,但是随着土层深度的增加影响将减小。

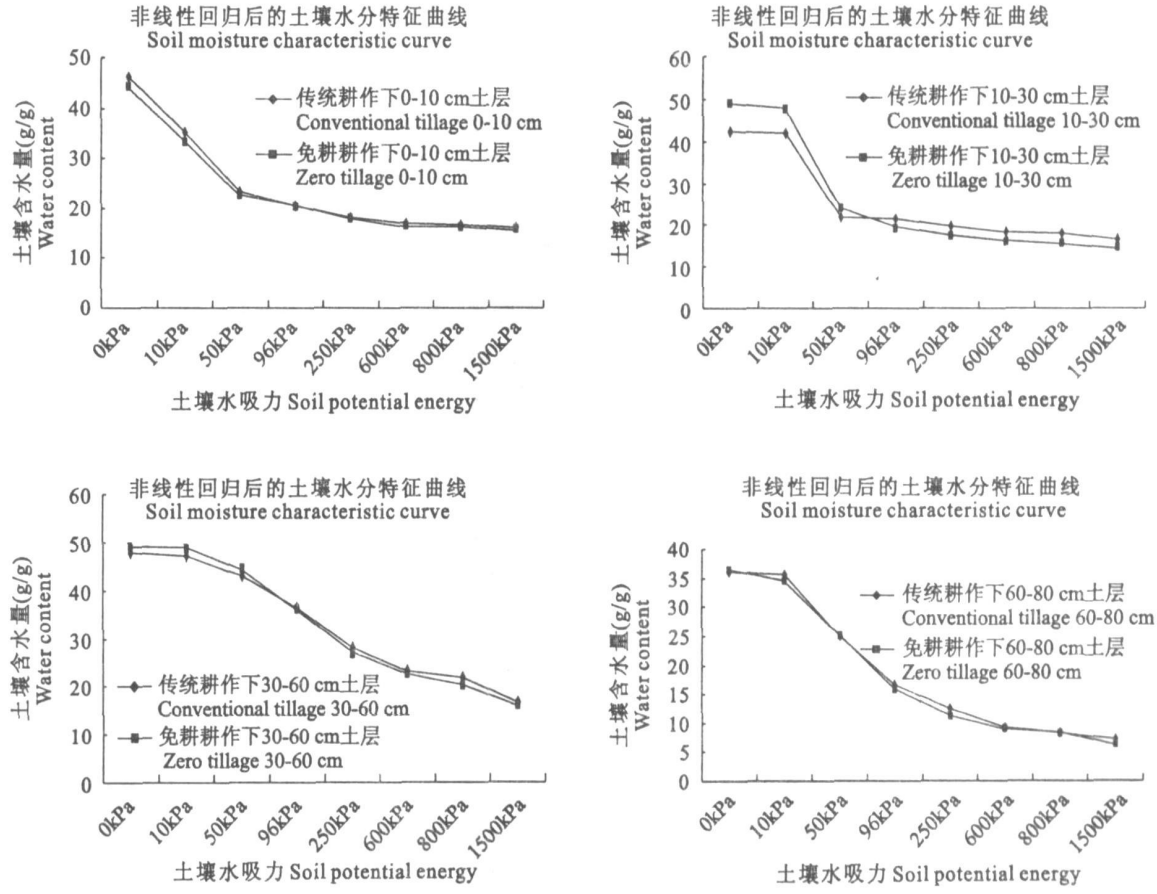

图 5　土壤水分特征曲线

Fig. 5　Soil moisture characteristic curve

4　结　语

本文利用 Matlab 软件中的非线性拟合函数(lsqcurvefit)和曲线回归函数(nlinfit 和 nlintool),实现了不同条件下土壤水分特征曲线 Van Genuchten 模型的建立与模拟,并分别利用野外实测数据进行了验证。两种求参方法相比,其中非线性回归法优于非线性拟合法。模拟结果表明 Van Genuchten 模型适应性好,可以应用于不同耕作条件下的土壤水分分析。

参 考 文 献:

[1]　魏义长,刘作新,康玲玲,等. 土壤持水曲线 Van Genuchten 模型求参的 Matlab[J]. 土壤学报,1980,44:380－386.

[2]　李春友,任　理,李保国. 利用优化方法求算 Van Genuchten 方程参数[J]. 水科学进展,2001,12(4):473－478.

[3]　Huang G H, Zhang R D, Huang Q Z. Modeling soil water retentioncurve with a fractal method[J]. Pedosphere, 2006,16(2):3－12.

[4]　姚其华,邓银霞. 土壤水分特征曲线模型及其预测方法的研究进展[J]. 土壤通报,1992,23(3):142－145.

[5]　Van Genuchten MTh. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Sci Soc Am J, 1980,44(5):892－898.

[6]　徐绍辉,刘建立. 土壤水力性质确定方法研究进展[J]. 水科学进展,2003,14(4):494－501.

[7]　夏卫生,雷廷武,潘英华,等. 土壤水动力学参数研究与评价[J]. 灌溉排水,2002,21(1):72－75.

(英文摘要下转第 188 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

The spatio variability of soil water-fertilizer coupling in Guanzhong area

XU Hai, WANG Yi-quan, LIU Jun
(*College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: This trail is designed to monitor the process of the temporal and spatial of soil moisture and nutrients variation during wheat growth period by testing the 0～100 cm soil layer, and has got the main conclusion as: (1) Moisture and nutrients concentrated in the 0～50 cm profile in the soil, a mass of moisture and nutrients are needed during wheat growth stages of regreening, jointing, grain filling, thus, radical change of soil moisture and nutrients on the profile occurred, and the variation of moisture and nutrients happened synchronically. Available phosphorus was stable during early stages, variation amplitude of available phosphorus was a little bigger after regreening, while available potassium content kept a high level during tillering stage and reduced significantly during heading stage. (2) The variation of soil moisture and nutrients was different on different profile. The variation of soil moisture content on the 0～10 cm profile was the most significant, which was hard to assure soil moisture, and this profile was the most dangerous to crop growth; soil moisture was stable on the profile beneath, which could meet the need of crop growth; the max variation of nitrate nitrogen and alkaline nitrogen occurred on 0～10 cm profile, which proved that plant uptake available N and the process of N element tranformation occurred on this profile, and the variation got smaller as the depth increased; variation amplitude of available phosphorus had the max on 0～30 cm profile, while variation amplitude of available potassium was not obvious. There was the problem of soil moisture and nutrients spatial inconsistency, we suggested deep application of fertilizer according to soil moisture so as to relive soil moisture and nutrients spatial inconsistency.

Key words: available nutrient; soil moisture; spatio-temporal variability; water-fertilizer coupling

---

(上接第 183 页)

Application of Van Genuchten model to analysis of soil moisture characteristic curve

WANG Xiao-hua[1], JIA Ke-li[1], LIU Jing-hui[2], LI Li-jun[2]
(1. *College of Water Conservency and Civil Engineering, Huhhot, Inner Monggolia* 010018, *China*;
2. *College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Monggolia* 010018, *China*)

Abstract: Two useful functions of Matlab software are used, namely, nonlinear curve fitting and nonlinear regression function. The soil moisture characteristic curves under zero tillage and conventional tillage are analyzed. Van Genuchten model is used to model the soil characteristic curves under the conditions of zero tillage and conventional tillage. The results show that the nonlinear regression function has better adaptability. Van Genuchten model can be used in soil moisture analysis under different tillage conditions.

Key words: soil moisture characteristic curve; tillage; Van Genuchten model; nonlinear curve fitting; nonlinear regression function

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net