

郭 豪, 刘文祥, 王超然, 等. Matlab 和神经网络法对土壤水分特征曲线 VG 模型的拟合比较[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 232–235.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.03.055

Matlab 和神经网络法对土壤水分特征曲线 VG 模型的拟合比较

郭 豪¹, 刘文祥², 王超然¹, 黄智刚¹

(1. 广西大学农学院, 广西南宁 530004; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:以山东荣成地区棕壤、风沙土为对象, 测定分析土壤剖面不同层次的容重、质地、有机质含量、水势和含水量等状况; 运用 Matlab 软件和神经网络法对土壤水分特征曲线 van – Genuchten(简称 VG) 模型进行拟合, 将 2 种拟合结果与实测数据进行对比分析。结果表明, 研究土壤不同土层含水量均随着水吸力的增加呈“快速下降 – 缓慢下降 – 基本平稳”的变化趋势; 由于受到土壤颗粒组成、容重等物理因素和有机质含量差异的影响, 棕壤和风沙土不同土层的饱和含水量和残留含水量差异较大, 其中棕壤 60 ~ 70 cm 和风沙土 10 ~ 20 cm 的土壤残留含水量最大; Matlab 软件拟合的残差平方和比神经网络预测方法低几个数量级, 说明采用 Matlab 对水分特征曲线 VG 模型拟合精度高, 拟合效果较好。

关键词:土壤水分特征曲线; VG 模型; Matlab; 神经网络预测

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)03-0232-04

土壤水分特征曲线表示土壤水能量与土壤含水量之间的关系, 是研究水分保持和运动的基本特征曲线^[1]。土壤水分特征曲线测定方法主要有张力计法、离心机法和压力膜法等直接测定法^[2]。但由于影响土壤水分特征曲线的因素复杂, 通过这些实测数据还难以从理论上获得土壤水吸力与土壤含水量的关系式。因此, 科研人员基于大量试验研究, 提出了一些经验公式来拟合实测数据^[3], 其中, 常见的有 Brooks – Corey 模型^[4]、Gardner 模型^[5]、Campbell 模型^[6]、van – Genuchten 模型^[7]和 Gardner – Russo 模型^[8]等。van – Genuchten(简称 VG) 模型由于适用土壤质地范围广、模拟线型与实测曲线吻合程度高而被广泛应用^[9]。

朱蔚利等通过 VG 模型和土壤水分特征曲线单一参数模型拟合了土壤水分特征曲线, 认为 VG 模型拟合的精度比单一参数模型高一个数量级^[10]。刘洪波等比较了 RETC 软件和 Matlab 软件对土壤水分特征曲线 VG 模型拟合效果, 表明 Matlab 软件拟合效果更好^[11]。相关研究表明, 采用 Matlab 对 VG 求参既快捷又准确, 是切实可行的方法^[12]。

前人已经做了大量关于土壤含水量与土壤水吸力拟合的研究, 特别是不同经验模型之间的比较。针对同一经验模型采用不同拟合方法的研究报道较少。本研究以棕壤和风沙土为研究对象, 采用离心机法测定土壤剖面不同深度土壤的水势和对应含水量, 运用 Matlab 软件对土壤水分特征曲线 VG 模型参数进行拟合计算, 同时基于土壤物理性质参数采用神经网络预测方法对 VG 模型求参, 然后将 2 种拟合值与实测数据进行对比, 分析 2 种方法拟合效果差异, 确定拟合研究区域土壤水分特征曲线 VG 模型的合适方法, 以期为该区域的放射性核素在土壤中迁移数值模拟研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选择山东省荣成市石岛湾核电厂周边为研究区

收稿日期: 2017-10-30

基金项目: 国家科技重大专项(编号: 2013ZX06002001); 广西自然科学基金(编号: 2016JJA130212); 广西农业科学院基本科研业务费专项(编号: 桂农科 2015YM40)。

作者简介: 郭 豪(1992—), 男, 河南郸城人, 博士研究生, 主要从事土壤学、水土保持学研究。E-mail: 18269003212@163.com。

通信作者: 黄智刚, 博士, 副教授, 主要从事土壤质量空间变异等研究。E-mail: hzg@gxu.edu.cn。

定分析[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(5): 324–327.

[9] 中国合格评定国家认可中心, 中华人民共和国浙江出入境检验检疫局. 实验室质量控制规范食品理化检测: GB/T 27404—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[10] 张丽娜, 魏成熙. 贵州北部土壤与灌溉水重金属含量及评价[J]. 耕作与栽培, 2007(6): 32–34, 58.

[11] 邱孝煊, 黄东方, 蔡顺香, 等. 福州蔬菜污染及污染源调查和治理研究[J]. 福建农业学报, 2000(1): 16–21.

[12] 国家环境保护局南京环境科学. 土壤环境质量标准: GB 15618—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[13] 农田土壤环境质量监测技术规范: NY/T 395—2000[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2000.

[14] 无公害农产品 种植业产地环境条件: NY/T 5010—2016[S].

[15] 张胜楠, 王 晶. 喀什农田灌溉水重金属污染特征分析[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2015(3): 90–93.

[16] 段改莲. 北京市昌平区农田土壤环境质量现状与评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.

[17] 食品安全国家标准食品中污染物限量: GB 2762—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

[18] 茶叶中铬、镉、汞、砷及氟化物限量: NY 659—2003[S].

域,研究土壤主要是棕壤与风沙土。土样于 2014 年 7 月取自荣成市大疃李家村(地理位置:122°30′55″E,37°13′45″N)和后海崖村(地理位置:122°31′26″E,36°55′10″N),土壤类型分别对应棕壤和风沙土。每个样地的取样深度依次为 0~10、10~20、…、60~70 cm,每种土壤类型取 3 个剖面。由于风沙土土层较浅,60 cm 以下是母质层,取样最大深度为 50~60 cm,采集样品的环刀是与高速冷冻离心机 H-1400 pF 配套的环刀,样品采集后用离心机测量土壤含水量和土壤水吸力。

1.2 测定方法

用环刀采集原状土样,在实验室于蒸馏水中浸泡 48 h,使其达到饱和状态,取出称质量。用离心机对土样进行脱湿处理,共设置了 8 个不同转速,分别为 500、1 200、2 000、2 200、3 800、4 900、6 900、8 500 r/min,每次旋转完成后都进行称质量,根据称质量数据计算出不同转速下对应的土壤含水量。每个转速对应一个土壤水吸力,然后绘制土壤含水量与土壤水吸力关系曲线,即实测土壤水分特征曲线。土壤容重、有机质含量等理化性质测定根据土壤农化分析方法^[13],土壤颗粒组成采用激光粒度仪(Microtrac S3500)测量。

1.3 分析方法

1.3.1 经验模型 van-Genuchten 模型:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^{(1-1/n)}} \quad (1)$$

式中: $\theta(h)$ 为压力水头为 h (kPa,或表示为基质势 cm,1 cm=0.1 kPa)时的土壤体积含水量,cm³/cm³; α 为尺度参数,kPa; n 为曲线形态参数。

1.3.2 土壤水吸力估算 在离心机法测定土壤水分特征曲线过程中,土壤吸力可根据角速度和与之对应的离心半径确定。压力水头以及与其对应的转速和平衡时间见表 1。

$$h = \frac{\rho_w \cdot \omega^2}{2g} (R_1^2 - R_2^2) \quad (2)$$

式中: h 为土壤吸力(压力水头),cm; R_1 为离心机轴心到土样中心的径向距离,cm; R_2 为离心机轴心到土样底部(即自由水面处)的径向距离,cm; ρ_w 为水密度,g/cm³; ω 为角速度,r/s; g 为重力加速度,cm/s²。

表 1 各压力水头所对应的转速及平衡时间

转速 (r/s)	压力 (MPa)	压力 (cm H ₂ O)	平衡时间 (min)
0	0	0	0
500	0.005	53	15
1 200	0.030	302	33.4
2 000	0.083	832	46.8
2 200	0.102	1 023	49.3
3 800	0.302	3 020	63.6
4 900	0.501	5 012	70.3
6 900	1.000	10 000	79.3
8 500	1.514	15 136	84.8

1.4 数据处理

采用函数绘图软件 Sigmaplot 12.0 绘制土壤含水量和水势关系曲线,采用 Matlab 2012a 和 Hydrus 1D 中神经网络预测对 van-Genuchten 模型进行拟合,并求解相关参数值和残差平方和。

2 结果与分析

2.1 2 种土壤的水分特征曲线比较

由图 1、图 2 可知,不同深度土壤水分特征曲线形态相似,随着土壤水吸力的增大,土壤含水量先急剧降低,随后缓慢减小,最终达到平稳状态。当土壤水吸力为零时,土壤含水量达到饱和状态;当土壤水吸力达到 1 200 cm H₂O 后,棕壤不同深度土壤含水量出现差异;随着土壤水吸力的增大,7 个层次土壤含水量减小速率出现明显差异,当水吸力增大到一定程度时土壤含水量达到稳定状态,各层土壤含水量大小顺序表现为 40~50 cm>50~60 cm>20~30 cm>30~40 cm>10~20 cm>60~70 cm>0~10 cm,最终土壤残留含水量介于 0.09~0.15 cm³/cm³之间。

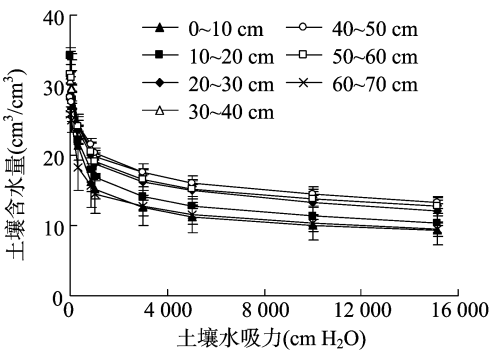


图 1 棕壤采样点不同深度水分特征曲线拟合曲线

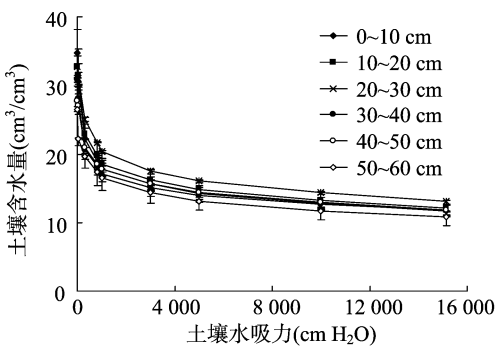


图 2 风沙土采样点不同深度水分特征曲线拟合曲线

当土壤水吸力在 0~2 000 cm H₂O 时,风沙土不同深度土壤含水量急剧下降(图 2),水吸力大于 2 000 cm H₂O 后,土壤含水量随水吸力的变化变缓。当水吸力增大到一定程度时,土壤含水量达到稳定状态,各层土壤含水量大小顺序表现为 20~30 cm>10~20 cm>40~50 cm>30~40 cm>0~10 cm>50~60 cm。除 20~30 cm 和 50~60 cm 深度土壤含水量差异较大外,其他深度土壤含水量变化基本重合。

2.2 影响土壤水分特征曲线的因素

2.2.1 土壤理化性质 由表 2 可知,除棕壤 30~40 cm 深度土壤外,2 种土壤的容重均随土壤深度的增加而增大,与表层土壤(0~10 cm)相比,2 种土壤深层(50~60 cm)容重分别增加 11.72%、11.56%。而土壤有机质含量随深度的增大呈减小趋势,但是 2 种类型土壤有机质含量均在 20~30 cm 深度时减少幅度最大(与 10~20 cm 土壤比较,均减少了约 5 g/kg)。2 种类型土壤相比,相同深度土壤的容重和有机质含量差异均较小。

表 2 研究区域土壤容重和有机质含量

采样深度 (cm)	容重(g/cm ³)		有机质含量(g/kg)	
	棕壤	风沙土	棕壤	风沙土
0~10	1.45±0.04	1.47±0.07	20.87±1.49	19.02±0.90
10~20	1.50±0.02	1.48±0.04	17.58±0.75	18.64±1.36
20~30	1.56±0.04	1.59±0.08	12.89±0.63	13.61±0.90
30~40	1.67±0.06	1.57±0.03	11.31±0.43	11.57±1.08
40~50	1.62±0.02	1.59±0.05	9.38±0.90	8.18±1.07
50~60	1.62±0.03	1.64±0.02	7.58±0.48	6.94±0.54
60~70	1.68±0.08	—	6.73±0.28	—

2.2.2 土壤颗粒组成 从表 3 可以看出,棕壤和风沙土颗粒组成以粉粒为主,其中棕壤不同深度的粉粒含量均高于 80%,风沙土粉粒含量也高达 75%~84%。2 种类型土壤中的黏粒含量均小于 10%,表明研究区域黏粒含量偏低,土壤偏沙。比较 2 种土壤颗粒组成发现,棕壤沙粒含量总体比风沙土砂粒低,而粉粒含量高于风沙土,两种土壤黏粒含量基本相同。根据美国土壤质地分类标准^[24],2 种土壤类型的质地均是壤质沙土。

2.3 VG 模型拟合求参比较

基于实测的土壤含水量和水吸力数据,采用 Matlab 软件

表 3 研究区域土壤颗粒组成

土壤类型	深度 (cm)	0.020~2.000 mm 沙粒 含量(%)	0.002~0.200 mm 粉粒 含量(%)	<0.002 mm 黏粒 含量(%)
棕壤	0~10	14.36±3.71	82.85±4.76	2.79±1.09
	10~20	14.53±1.61	83.42±1.54	2.05±0.39
	20~30	14.16±0.60	83.78±0.70	2.06±1.19
	30~40	14.24±1.78	81.17±2.94	4.59±3.59
	40~50	11.16±2.37	85.72±2.50	3.12±1.45
	50~60	13.09±2.43	84.64±3.66	2.27±1.34
	60~70	15.96±2.98	81.45±2.62	2.59±0.78
风沙土	0~10	14.88±3.57	81.81±1.34	3.31±2.48
	10~20	15.51±4.11	80.88±4.57	3.61±0.75
	20~30	13.84±1.83	83.84±1.76	2.32±0.26
	30~40	21.33±1.78	75.46±2.94	3.22±3.59
	40~50	18.97±2.37	75.68±2.50	5.36±1.45
	50~60	18.80±2.43	78.14±3.66	3.06±1.34

中非线性拟合函数 lsqcurvefit 对 VG 模型参数求解。Matlab 拟合程序为:

```
F=@(x,xdata)x(1)+(x(2)-x(1))./(1+(x(3)*
xdata).^x(4)).^(1-1/x(4));%VG 模型公式
xdata=[0 5.302 5 30.502 0 84.011 8 103.353 3
305.02 506.201 9 1 010 1 528.695 6];%含水量
ydata=[0.565 0 0.401 3 0.250 2 0.232 4 0.230 7
0.192 6 0.181 2 0.173 0];%负压
x=[0.1,0.1,0.01,1];%初始值
for l=1:5
    x=lsqcurvefit(F,x,xdata,ydata)
    x=nlinfit(xdata,ydata,F,x)
end
figure(1),clf
plot(xdata,ydata,'o','markersize',8,
'markerfacecolor','k')
hold on
x1=linspace(min(xdata),max(xdata)+500);
y1=F(x,x1);
hold on
plot(x1,y1,'r-','linewidth',3)
```

在 Matlab 拟合 VG 模型求参的同时,采用神经网络预测方法对 VG 进行拟合求参。神经网络预测是 Hydrus 1D 中 Rosetta Lite 窗口的方法,拟合时选用输入方式是土壤颗粒组成和容重,然后根据实测土壤颗粒组成和容重数据求解 VG 模型中的参数。通过 Matlab 和神经网络预测拟合值与实测

值的残差平方和比较,确定选择合适的拟合方法。

从表 4 可以看出,2 种方法求解 VG 模型参数结果差异较大。土壤残留含水量(θ_r)和饱和含水量(θ_s)拟合结果显示,预测值随土壤深度变化规律与实测值相同,不同深度的 θ_r 和 θ_s 不同。Matlab 软件对 2 种土壤 θ_r 和 θ_s 预测值均大于神经网络预测值。比较 2 种拟合方法的预测值与实测值之间的残差平方和可知,在相同深度土层,采用神经网络预测的残差平方和比 Matlab 拟合的大 2~3 个数量级,表明 Matlab 对 VG 模型拟合效果更好。

3 讨论与结论

研究发现,2 种土壤不同土层土壤含水量均随着水吸力的增加呈“快速下降-缓慢下降-基本平稳”的变化趋势。但在同一水吸力下,各土层所保持土壤水分含量有所不同。由于受到土壤颗粒组成、容重等物理因素和有机质含量差异的影响,棕壤和风沙土不同土层的饱和含水量和残留含水量差异较大,其中棕壤 60~70 cm 和风沙土 10~20 cm 的土壤残留含水量最大。

土壤水动力学参数特征受土壤结构、土壤质地及土壤有机质含量等因素的影响,土壤容重的增大导致土壤含水量减少,持水能力下降^[14];土壤黏粒含量增多,细小孔隙数量亦增多,土壤毛管持水作用增强,土壤颗粒的比表面积增大,对水分吸附力增强,从而提高了土壤持水能力^[15];土壤有机质对自然及风干状态下的土壤含水量、土壤水分特征曲线均有显著影响^[16]。本研究表明,2 种研究土壤的容重均随土壤深度增加而增大,且棕壤在土层深度达到 30~40 cm 以后、风沙土

表 4 Matlab 软件和神经网络预测 VG 求参和残差平方和

编号	深度 (cm)	Matlab				神经网络预测					
		残留 含水量 θ_r	饱和 含水量 θ_s	拟合 参数 α	n	残差平方和 SSE	残留 含水量 θ_r	饱和 含水量 θ_s	拟合 参数 α	n	残差平方和 SSE
棕壤	0~10	0.108 3	0.456 4	0.008 4	1.507 2	0.000 1	0.044 6	0.393 6	0.007 0	1.638 3	0.049 8
	10~20	0.111 3	0.515 3	0.013 1	1.394 4	0.004 9	0.042 1	0.382 6	0.007 9	1.615 8	0.091 4
	20~30	0.110 5	0.450 5	0.005 9	1.313 1	0.004 6	0.040 5	0.371 6	0.008 8	1.590 7	0.137 4
	30~40	0.091 1	0.516 7	0.010 4	1.225 4	0.020 4	0.039 9	0.350 7	0.009 9	1.530 5	0.172 8
	40~50	0.007 1	0.459 2	0.006 0	1.168 9	0.011 5	0.041 5	0.369 5	0.009 4	1.567 4	0.169 9
	50~60	0.153 0	0.517 5	0.007 9	1.380 0	0.012 3	0.039 5	0.363 4	0.009 8	1.566 5	0.171 6
	60~70	0.165 9	0.437 3	0.008 5	1.562 7	0.016 1	0.036 4	0.343 5	0.011 3	1.526 4	0.060 8
风沙土	0~10	0.106 6	0.511 1	0.021 5	1.299 2	0.000 2	0.044 4	0.388 3	0.007 0	1.631 1	0.120 9
	10~20	0.134 3	0.488 8	0.011 3	1.368 4	0.000 5	0.044 1	0.384 5	0.007 1	1.627 1	0.134 0
	20~30	0.100 5	0.524 3	0.010 2	1.260 0	0.006 6	0.040 0	0.367 0	0.009 2	1.577 6	0.182 8
	30~40	0.129 4	0.487 7	0.018 5	1.313 2	0.003 8	0.037 7	0.350 4	0.009 0	1.563 6	0.126 1
	40~50	0.110 9	0.448 0	0.011 1	1.269 5	0.005 2	0.041 1	0.354 1	0.008 3	1.567 1	0.115 1
	50~60	0.104 9	0.439 4	0.010 6	1.287 4	0.000 4	0.036 7	0.343 5	0.010 4	1.533 7	0.155 9

在土层达到 20~30 cm 以后土壤容重大小基本趋于稳定,土壤有机质含量随深度增加呈减小的趋势,而土壤的粒径组成则随着土层深度变化呈现不规律变化。影响土壤质地的决定因素是成土母质类型^[1],产生这些变化的原因可能是受到农田管理措施特别是耕作的影响。表层土壤经翻耕后,容重变小,孔隙增多,持水能力增强,这与传统耕作和免耕土壤水分特征曲线特性相同^[17]。此外,作物类型特别是根系的机械作用,也会对土壤持水特性产生不同程度的影响^[18]。本研究采样区域位于耕作区,主要种植作物是冬小麦和夏玉米,农田的耕作和作物轮作导致不同土层的土壤残留含水量和饱和含水量发生改变。

与 2 种土壤含水量的实测值相比,神经网络方法预测的残差平方和较大,这是因为本研究水分特征曲线是基于土壤质地和容重估算的,与考虑土壤饱和含水量等土壤其他理化因素的人工神经网络 ANN 预测效果^[19]相比,本研究中神经网络预测法在对 VG 模型拟合求参时精度相对于 Matlab 较低。因此,在比较 Matlab 和神经网络法对土壤水分特征曲线 VG 模型拟合求参时,当土壤含水量和水吸力易于测量时,采用 Matlab 软件拟合 VG 模型精度高且简单高效,反之,当考虑土壤饱和含水量等其他理化因素时,则可以采用神经网络预测方法获取 VG 模型参数,但在采用神经网络预测时需要考虑影响土壤结构的诸多因素。

参考文献:

[1] 吕盼忠,李保国. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2006.
[2] van Genuchten M T, Leij F J, Lund L J. Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils [J]. Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, 1989, 157 (6): 615-627.
[3] 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,2004,35(2): 68-76.
[4] 杨靖宇,屈忠义. 河套灌区区域土壤水分特征曲线模型的确定与评价[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(5): 155-159.

[5] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post-irrigation movement of soil water: I. Redistribution[J]. Water Resources Research, 1970, 6 (3): 851-861.
[6] Campell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data[J]. Soil Science, 1974, 117 (6): 311-314.
[7] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
[8] Russo D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation; on the selection of a model for the hydraulic properties [J]. Water Resources Research, 1988, 24(3): 453-459.
[9] 付 强,蒋睿奇,王子龙,等. 基于改进萤火虫算法的土壤水分特征曲线参数优化[J]. 农业工程学报,2015,31(11): 117-122.
[10] 朱蔚利,肖自幸,牛健植,等. 两种模型对土壤水分特征曲线拟合的比较分析[J]. 湖南农业科学,2011(17): 47-51.
[11] 刘洪波,张江辉,虎胆·吐马尔白,等. 土壤水分特征曲线 VG 模型参数求解对比分析[J]. 新疆农业大学学报,2011,34(5): 437-441.
[12] 魏义长,刘作新,康玲玲,等. 土壤持水曲线 van Genuchten 模型求参的 Matlab 实现[J]. 土壤学报,2004,41(3): 380-386.
[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
[14] 李 卓,吴普特,冯 浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报,2010,47(4): 611-620.
[15] 杨欣坤,王 宇,赵兰坡,等. 土壤水动力学参数及其影响因素研究进展[J]. 中国农学通报,2014,30(3): 38-43.
[16] 冯 杰,郝振纯,刘方贵. 大孔隙对土壤水分特征曲线的影响[J]. 灌溉排水,2002,21(3): 4-7.
[17] 王小华,贾克力,刘景辉,等. Van Genuchten 模型在土壤水分特征曲线拟合分析中的应用[J]. 干旱地区农业研究,2009, 27 (2): 179-183, 188.
[18] 马昌臣,王 飞,穆兴民,等. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2): 105-109.
[19] 胡振琪,张学礼. 基于 ANN 的复垦土壤水分特征曲线的预测研究[J]. 农业工程学报,2008,24(10): 15-19.