

文章编号:1007-2284(2016)07-0038-05

滨海盐渍土土壤水分特征曲线测定 及拟合模型比较

蒋名亮^{1,2}, 李 菲¹, 陈小兵², 郭建青¹, 颜 坤², 吴从稳^{2,3}, 卜凡敏⁴

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室
(烟台海岸带研究所), 山东 烟台 264003; 3. 烟台大学生命科学学院, 山东 烟台 264005;
4. 山东省滨海盐碱地水土环境工程技术研究中心, 山东 东营 257500)

摘 要: 测定滨海盐渍土的土壤水分特征曲线及相应的参数, 为研究和模拟水盐运移提供可靠的参数依据。以中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态实验站内的盐渍土为例, 使用压力膜仪测定土壤吸力和水分的关系, 根据 Brooks-Corey、Gardner 和 van Genuchten 3 种模型拟合土壤水分特征曲线, 结果表明: van Genuchten 模型拟合的精度最高, 剖面五层土壤的决定系数都大于 0.97, 与试验点土壤质地无明显相关性, 可以用于该地区的土壤水分特征曲线拟合; Brooks-Corey 和 Gardner 模型的拟合效果相似, 且精度波动都很大, 在砂性土范围内, 决定系数大小与土壤物理性砂粒含量成反比, 不适合用于由泥沙堆积而成的黄河三角洲地区的土壤水分特征拟合。van Genuchten 模型拟合结果表明: 不同土壤的水分特征曲线不同, 同一质地类型的土壤具有相似的曲线形状; 土壤颗粒的粒径组成和含盐量对土壤的持水性有很大的影响, 土壤颗粒越大土壤持水性越差, 土壤含盐量越高, 土壤持水性越好。

关键词: 滨海盐渍土; 土壤水分特征曲线; 拟合模型; 模型选择

中图分类号: S152.7; TV93 文献标识码: A

The Measurement of the Soil Moisture Characteristic Curve and the Comparison of the Fitting Models of Seashore Saline Soil

JIANG Ming-liang^{1,2}, LI Fei¹, CHEN Xiao-bing², GUO Jian-qing¹, YAN Kun², WU Cong-wen^{2,3}, BU Fan-min⁴

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong Province, China;

3. College of Life Science, Yantai University, Yantai 264005, Shandong Province, China; 4. Shandong Coastal Saline Soil and Water Environment Engineering Research Center, Dongying 257500, Shandong Province, China)

Abstract: The soil moisture characteristic curve and the homologous parameters are measured, and a reliable parameter basis is provided to study and simulate water and salt transport. The salinized soil from Yellow River Delta Ecologic Research Station of Coastal Wetland of CAS is used as a sample to measure the relationship between the soil suction and moisture by using pressure membrane method and fitting the soil moisture characteristic curve with the Brooks-Corey model, Gardner model and van genuchten model. The results show that the Van Genuchten model has the highest fitting precision, all the coefficients of determination coefficient of determination of the section's five level soils are more than 0.97, and they had no significant correlation between the soil textures of the testing point, the model could be used for fitting the soil moisture characteristic curve of this region; the imitative effects between

收稿日期: 2015-06-17

基金项目: 公益性行业(海洋)科研专项(201105020); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001); 中科院海岸研究所部署项目“黄河三角洲陆海界面过程、生态演变与修复技术”; 国家科技支撑计划项目(2009BADA3B04)。

作者简介: 蒋名亮(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: ghygza@126.com。

通讯作者: 陈小兵(1974-), 博士, 副研究员, 主要从事海岸带水土资源高效开发与农业可持续发展研究。E-mail: xbchen@yic.ac.cn。

Brooks-Corey model and Gardner model were similar and their fitting accuracies fluctuated largely, the two models' coefficients of determination were inversely proportional to the content of physical sand soil of the edaphic, so they all were not suitable for fitting the soil moisture characteristic curve of the Yellow River Delta which was heaped up by silt. The results fitted by van Genuchten model showed that different edaphic had different soil moisture characteristic curve and edaphic which had the same texture had the similar curve shape; the particle size of particles and the salt content of edaphic made a great difference on the water-binding capacity of edaphic, the bigger the soil particle was, the worse the water-binding was and the higher the salinity was, the better the water-binding.

Key words: seashore saline soil; soil moisture characteristic curve; fitting models; choosing models

土壤水分特征曲线是土壤吸力与土壤含水率间的关系曲线,亦称土壤持水曲线。它能够表征土壤水的能量与数量的关系,曲线斜率的倒数即单位基质势的变化引起的含水量变化称为比水容重,土壤水分特征曲线和比水容重是应用数学物理方法定量分析土壤中的水分运动和溶质运移的重要参数^[1]。常用的田间和实验室测定土壤水分特征曲线方法有压力膜法、负压计法、离心机法、沙性漏斗法、稳定土壤剖面法、平衡水汽压法等^[2]。试验实测数据本身实用价值不高,对土壤的水分特征没有详细的揭示意义,需要对实测点进行曲线拟合,得到水分特征曲线,从而能够直观地反映土壤的性质和特点。现在主要的拟合模型有 Brooks-Corey 模型, van Genuchten 模型^[3], Gardner 模型^[4], Campbell 模型和 Fredlund 模型,其中应用最广泛的是 Brooks-Corey 模型和 van Genuchten 模型。

黄河三角洲是山东省重要的后备土地资源,其中近一半的土地为不同程度的盐渍化土^[5]。该地区盐渍土按其成因分类属于滨海盐渍土,其土壤初期是由黄河携带的大量泥沙堆积而成,受海水的浸渍影响,含盐量非常高,脱离海水之后,由周期性积盐转为季节性脱盐^[6]。盐分以及某些离子组成对土壤及土壤水的理化性质有很大的影响:盐度会降低土壤水势^[1];土壤含盐量的增加会使土壤的持水性能增加^[7];土壤钠质化将恶化土壤的结构性质,导致土壤结构分散^[8]。为了研究盐分对土壤水分特征曲线的影响,栗现文、周金龙等将土体在不同矿化度水样中饱和,然后测定土壤的脱湿曲线,通过拟合对比,分析了不同矿化处理对土壤孔隙的影响,以及最佳拟合模型的选择^[9]。在对土壤水分特征曲线的研究中土壤吸力一般指土壤基质势,而忽略土壤溶质势^[1],但滨海盐渍土含盐量高,忽略土壤溶质势显然是不合适的。本文以此为出发点,实测黄河三角洲滨海盐渍土不同土壤层位的水分-吸力数据,利用 Origin-Pro 9.0 绘图软件用户自定义函数功能依据 Brooks-Corey、Gardner 和 van Genuchten 3 种模型拟合各层土壤的水分特征曲线,并选择出最佳的拟合方案并得到相应的拟合参数,结合土壤水分特征曲线分析土壤理化性质,为滨海盐渍土水盐运移规律的研究与数值模拟提供可靠的参数,以求科学指导黄河三角洲地区盐渍土的改良和农业的发展。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验点位于山东省垦利县的中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态实验站内(118°58'44.00"E, 37°45'52.39"N),海拔 2 m。地处暖温带半湿润大陆性季风气候带,雨热同期,四季气候变化明显,年均气温 13.1 °C,年均蒸发量和降雨量分别为

1 860.9、532.6 mm, 蒸降比达到 3.49。试验点处地下水水位埋深 1 m 左右,最深不超过 2.3 m,雨期地表常积水,平均矿化度为 27.55 g/L。试验站内地势低平,雨期涝害严重,土壤含盐量高,盐分以氯化钠为主,土地利用类型为试验田和荒地,试验田种植棉花、柽柳,荒地植被有芦苇、翅碱蓬、柽柳,实验采样点处为光板地,未生长任何植物。

1.2 试验设计

本次试验在实验站光板荒地挖一个 1 m 深的剖面,按 0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~100 cm 人为将剖面分为 5 层,每层都取少量的土样做理化性质分析;用 60 cm³ 的环刀取这 5 层的原状土做压力膜试验测定土壤的水分特征曲线,每一层都取 3 个环刀样做平行;使用小铝盒取这 5 层的土壤测定其土壤含水率,也设定 3 个重复;用 100 cm³ 的环刀取每层的原状土测定土壤的干密度。每个环刀铝盒都分别做好编号。

1.3 试验方法

(1) 土壤密度测定。将现场采集的大环刀样和铝盒土样按照国标 NY/T 1121. 4-2006 土壤检测第四部分土壤密度测定的操作步骤测定土壤水分和土壤密度。

(2) 土壤盐分、质地分析。将各层取好的土壤风干然后磨碎过 20 目的土壤筛,按照 5:1 的水土比制备土壤浸提液,使用 DDSJ-308A 电导率仪测量土壤含盐量;使用 Marlvern Mastersizer 2000F 激光粒度仪湿法进样测定土壤颗粒直径及其粒径分布,根据卡庆斯基土壤分类标准对每层土壤的质地进行分类。

(3) 土壤水分特征曲线测定。土壤水分特征曲线使用 1500F1 型 1.5 MPa 压力膜仪测定,结果为持水曲线的脱湿过程。将原状的环刀土样饱和后置于 1500F1 型 1.5 MPa 压力膜仪内已完全湿润的陶瓷压力板上,分别设置不同压力值:0.02、0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、0.9、1.2、1.5 MPa,每一压力平衡后(出水口 48 h 不再出水即认定平衡),取出土样用电子天平($d=0.01$ g)立即称重,而后放入压力膜仪继续进行下一级压力测量。完成最后一级压力取出土样称重,然后烘干,测定干土质量并计算最后一级压力下的土壤含水率,然后根据每一级压力损失的水分推出对应压力的土壤含水率。取 3 个平行样的平均值作为测量值。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质分析

表 1 为该土壤剖面不同机械分层下土壤的物理化学性质的分析结果。从表 1 中可以看出,按卡庆斯基分类标准,该剖面 0~20 cm 为沙壤土,中间 20~60 cm 两分为松沙土,底下

60~100 cm 两层为轻壤土。土壤密度从上到下依次减小,表层土壤密度最高,达到了 1.53 g/cm^3 ;80~100 cm 层最低,为 1.34 g/cm^3 。受到蒸发作用的影响,越近土壤表层土壤含水率越低,而盐分却因表聚作用而越高,但 80~100 cm 含盐量却又升高了,那是由于该层位土壤受到了浅埋深高盐地下水的影响。整个剖面含盐量均近于或大于 0.4%,按照我国土壤盐化分级指标土壤盐分分级指标的划分标准^[10]已达到强度盐渍化土的标准,而表层 0.821 5%的含盐量更是达到了盐土的范畴。

表 1 剖面不同土层土壤的物理化学性质

Tab. 1 Edaphic physical and chemical properties of different soil layers of the section

剖面 分层/ cm	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	质量 含水率/ %	含盐量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤质地 分类/ (卡庆斯基 分类法)	粒径组成/%	
					物理性 黏粒 (<0.01 mm)	物理性 沙粒 (>0.01 mm)
0~20	1.53	23.63	8.215	沙壤土	11.82	88.18
20~40	1.42	29.10	5.865	松沙土	8.75	91.25
40~60	1.38	32.45	3.975	松沙土	2.78	97.22
60~80	1.36	34.28	3.955	轻壤土	17.68	82.32
80~100	1.34	35.22	5.640	轻壤土	19.88	80.12

2.2 水分特征曲线测定结果与模型比较选定

常用于拟合水分特征曲线土壤水分一吸力实测数据且精度较高的经验模型主要有 van Genuchten 模型(1980 年), Gardner 模型(1970 年)和 Brooks-Corey 模型(1964 年),3 种模型的表达式分别为:

Brooks-Corey 模型(下文以 BC 模型表示)表达式为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h}\right)^\lambda \quad h < 0 \quad (1)$$

当 $h \geq 0$ 时, $\theta = \theta_s$

式中: θ 为体积含水率; θ_r 为残留含水率; θ_s 为饱和含水率; h_d 为空气进入土壤孔隙中所必须达到的基质吸力值,即进气压力; h 为土壤吸力,一般情况下 $h < 0$,当土壤水饱和时 $h = 0$; λ 为经验参数,能够反映土壤孔隙的分布特征。

Gardner 模型形式如下:

$$|h| = \alpha \theta^{-b} \quad h < 0 \quad (2)$$

根据试验条件调整该模型的自变量和因变量,将上式写成反函数模式:

$$\theta = A |h|^{-B} \quad h < 0 \quad (3)$$

式中: A, B 为拟合参数。

van Genuchten 模型(下文以 VG 模型表示)表达式为:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + |\alpha h|^n)^{-m} \quad h < 0 \quad (4)$$

$h \geq 0$ 时, $\theta = \theta_s$

式中: α, n 和 m 为土壤孔隙尺寸分布参数^[9],一般取 $m = 1 - 1/n$ 或 $1 - 2/n$,均为经验参数;其他符号含义同上。

采用 OriginPro 9.0 软件对表 2 的压力膜试验实测数据根据这 3 个模型进行自定义函数拟合绘图及参数计算。图 1 为剖面 5 层土壤压力膜试验实测点和模型拟合的曲线,表 3 为 3 个拟合模型相应的参数计算结果。

从表 3 可以看到使用 3 种模型对剖面上每一层土壤实测数据的水分特征曲线进行拟合的决定系数 R^2 都达到了 0.9 以上,且 VG 模型拟合结果较好,精度都大于 0.976 7,明显高于 BC 模型和 Gardner 模型,除了 20~40 cm 土层,Gardner 模型的拟合精度都稍微高于 BC 模型,但二者差距甚微。

结合表 1 中各层土壤的粒径组成可以发现,土壤中物理性砂粒含量越高,Gardner 模型和 BC 模型的拟合精度就越低(0~20,20~60 cm 土层),说明这两种拟合模型不适用与具有大孔隙的土壤的水分特征曲线拟合;而 VG 模型在拟合整个土壤剖面不同类型土壤时拟合精度无特别规律,而且拟合度都很高。

参数拟合方面,BC、Gardner、VG 模型拟合的经验参数 A, B, h_d, λ, n, m 都是随着物理性砂粒含量的增高而增加的, α 则相反。对于同为轻壤土的 60~80 和 80~100 cm 层,粒径组成相近,容重也非常接近,但是 BC、Gardner 模型对水分特征曲线的拟合精度相差较大,这是因为 80~100 cm 土壤大颗粒多于 60~80 cm 土壤[粒径分析表明按国际制土壤分类前者粉粒($2 \sim 20 \mu\text{m}$)38.52%,沙粒($>20 \mu\text{m}$)60.93%;而后者粉粒 51.41%,沙粒 48.34%],从而使土壤大直径的孔隙较多,从而使 BC、Gardner 模型拟合 60~80 cm 层精度明显大于 80~100 cm 层,虽然前者 VG 模型的拟合精度也大于后者,但相对于 BC、Gardner 模型,VG 模型精度为 0.981 6 已远远高于前者。

综上,在进行土壤水分特征曲线曲线的拟合上 VG 模型具有更广的适用性。本次压力膜试验采用 VG 模型对实测数据拟合的曲线与参数计算作为拟合结果。

表 2 剖面各层土壤吸力-水分关系测定结果

Tab. 2 Analysis results of the relationship between soil suction and moisture of each soil layer of the section

土壤水 吸力/cm	剖面层位含水率/%				
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm
203.949	39.83	43.21	38.73	37.66	46.96
509.872	37.52	40.35	36.65	30.27	44.36
1 019.740	33.37	25.64	15.10	22.51	41.24
2 039.490	30.55	23.02	10.77	14.55	39.97
4 078.980	27.38	19.40	6.55	8.42	36.22
6 118.470	24.71	18.09	5.77	7.20	32.58
9 177.700	23.43	17.20	5.30	6.76	31.39
12 236.900	21.81	16.24	4.85	6.05	28.10
15 296.200	19.68	15.28	4.59	5.67	25.38

2.3 VG 模型模拟结果分析与讨论

图 2 为剖面五层土壤实测数据点的总图和相应的 VG 模型拟合结果,结合表 2 的实测数据和表 3 的参数拟合结果,可以计算出各层土壤的田间持水率和土壤的凋萎系数,这些参数对农田灌溉计划有重要的应用价值。田间持水率为毛管力约为 10 132.5~30 397.5 Pa 时的含水率^[1],各层田间持水率分别(取 30 397.5 Pa)为 38.86%、42.38%、39.09%、35.31%和 45.57%,各层土壤凋萎系数(约为 1 519 kPa 时的土壤含水率)为 20.65%、16.83%、5.93%、5.45%和 27.21%。结合表 1 可以看

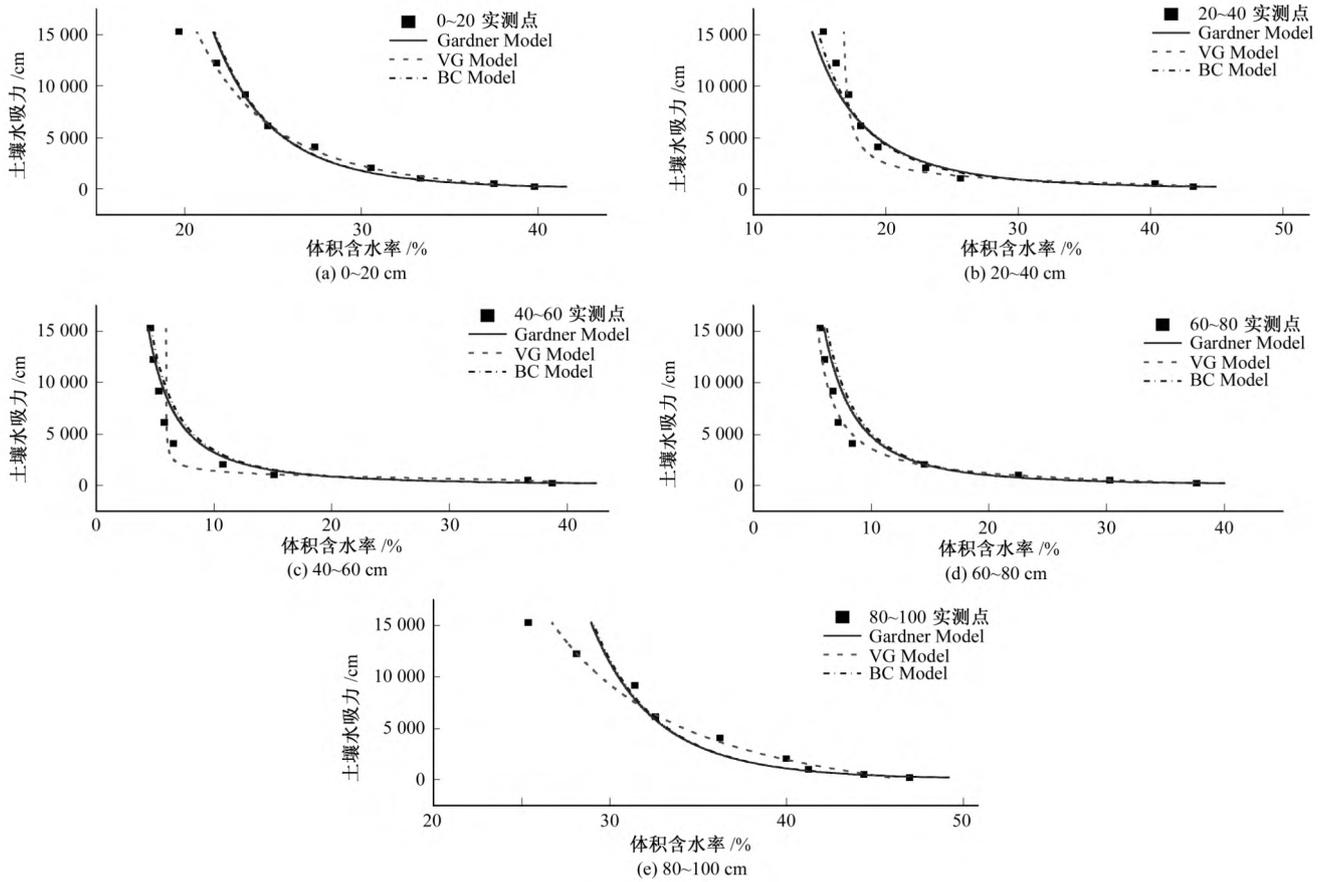


图 1 剖面各层土壤不同拟合模型下的水分特征曲线拟合

Fig. 1 Each layer soil moisture characteristics curve under different fitting models of the section

表 3 剖面各层土壤实测点不同模型拟合下的参数表

Tab. 3 Measured data parameter list of different fitting models of each soil layer of the section

土层层位/ cm	拟合 模型	决定系数 R^2	参数拟合结果								
			A	B	θ_r	θ_s	h_d	λ	α	n	m
0~20	Gardner Model	0.970 3	0.933 1	0.151 8	—	—	—	—	—	—	—
	BC Model	0.970 2	—	—	0	0.464 4	99.214 9	0.151 1	—	—	—
	VG Model	0.994 5	—	—	0	0.417 9	—	—	0.001 9	1.207 5	0.171 8
20~40	Gardner Model	0.945 5	1.782 6	0.260 9	—	—	—	—	—	—	—
	BC Model	0.946 7	—	—	0.046 1	0.500 1	140.546 1	0.316 9	—	—	—
	VG Model	0.976 7	—	—	0.166 4	0.449 1	—	—	0.001 6	2.561 1	0.609 5
40~60	Gardner Model	0.905 2	6.918 3	0.524 7	—	—	—	—	—	—	—
	BC Model	0.904 6	—	—	0	0.507 6	144.233 6	0.512 9	—	—	—
	VG Model	0.986 8	—	—	0.059 3	0.396 0	—	—	0.001 3	4.306 7	0.767 8
60~80	Gardner Model	0.969 2	4.151 3	0.439 7	—	—	—	—	—	—	—
	BC Model	0.968 7	—	—	0	0.488 1	129.217 1	0.431 1	—	—	—
	VG Model	0.998 2	—	—	0.039 9	0.394 0	—	—	0.001 7	1.974 6	0.493 6
80~100	Gardner Model	0.921 0	0.947 0	0.123 1	—	—	—	—	—	—	—
	BC Model	0.920 9	—	—	0	0.506 5	161.079 0	0.122 4	—	—	—
	VG Model	0.981 6	—	—	0	0.464 3	—	—	0.000 5	1.253 6	0.202 3

到对于相同类型的土壤,含盐量对其凋萎系数影响很大,含盐量越高土壤凋萎系数越大。模型参数 α 、 n 、 m 为土壤尺寸参数,是进行土壤水盐运移规律及模拟研究的重要参数; n 决定持水曲线的坡度, n 越大坡度越小,反之亦然^[11]。从表 3 可以看到 5 层土壤的参数 α 和 n 分别为 0.001 9、0.001 6、0.001 3、0.001

7、0.000 5 和 1.207 5、2.561 1、4.306 7、1.974 6、1.253 6,结合图 2 可以发现 n 值的大小正符合曲线坡度的反比关系。

从图 2 根据曲线形状可以将水分特征曲线分为 2 组: 20~40、40~60 cm 为一组,这两层土壤均为松砂土,土壤含水率在 0.2 MPa 压力前随压力的增加急剧减小,之后相对平缓,这是

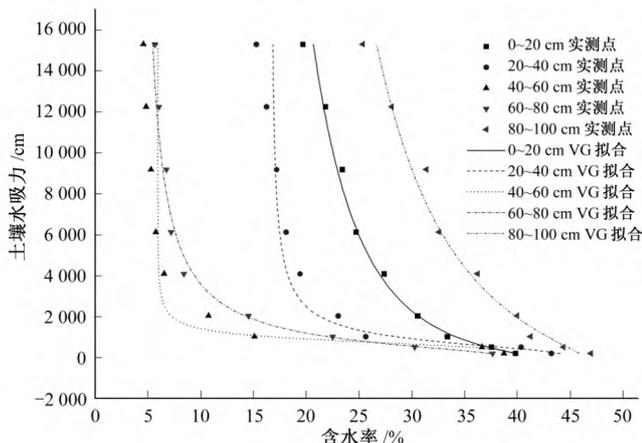


图2 剖面各层土壤压力膜实测结果分布点及VG模型拟合曲线
Fig. 2 Each layer soils data measured by pressure film and their VG-Model fitting curve of the section

因为土壤中物理性沙粒含量很高,存在大量的大孔隙水,这部分水在较小的压力下就很容易被疏干,当压力达到 0.2 MPa 时,大孔隙水基本已经流失,存在于小空隙内的水才慢慢释出,此时脱水较为困难,曲线就非常平缓,从图 2 中可以看 20~40 cm 土层的残留含水率 16.64% 明显高于 40~60 cm 的残留含水率 5.93%,换言之前者土壤保水性高于后者,其原因有二,第一前者物理性黏粒高于后者,第二前者含盐量高于后者,其中的盐分能够使土体中等大小土壤孔隙 ($0.012 \text{ mm} < d < 0.015 \text{ mm}$) 体积变小,进而使土体持水能力增强^[9]; 0~20、60~80、80~100 cm 为一组,这组土层皆为壤土,且水分特征曲线都相对比较平缓,没有明显的拐点,3 层土壤的保水性的顺序依次为: 80~100 cm > 0~20 cm > 60~80 cm, 物理性黏粒 80~100 cm (19.88%) > 60~80 cm (17.68%) > 0~20 cm (11.82%), 含盐量 0~20 cm (8.215 g/kg) > 80~100 cm (5.640 g/kg) > 60~80 cm (3.955 g/kg), 80~100 cm 物理性黏粒远高于 0~20 cm, 所以保水性更好,前者物理性黏粒和含盐量都高于 60~80 cm, 因此具更好的保水性, 0~20 cm 含盐量是 60~80 cm 的两倍多,盐分对土壤结构造成了很大的改变,故而 0~20 cm 保水性高于 60~80 cm。

3 结 论

(1) van Genuchten 模型对该试验点土壤水分特征曲线的拟合效果好于 Brooks-Corey 模型和 Gardner 模型,且拟合效果与土壤结构没有很大的相关性; Brooks-Corey 模型和 Gardner 模型的拟合效果接近,对该试验点拟合效果不稳定,土壤粒径

结构有这两种模型的拟合有很大的影响,且这两种拟合模型不适用于沙性土壤的拟合。

(2) 使用模型拟合的土壤水分特征曲线能够容易地获取土壤某些特殊点的水分-吸力数据,试验点土壤剖面各层土壤的田间持水率分别为 39.82%、43.94%、39.51%、37.37% 和 45.90%,凋萎系数则为 20.65%、16.83%、5.93%、5.45% 和 27.21%。

(3) 从 van Genuchten 模型拟合的结果可以看出不同质地的土壤具有不同的水分特征曲线形状,而同一质地的土壤具有相似的形状;土壤颗粒和土壤盐分对土壤的水分特征曲线有很大的影响,黏重土壤和高盐土壤具有很强的持水能力。

本文试验使用的压力膜仪不能测定土壤水分特征曲线的吸湿过程,所以文中的研究都是就土壤脱湿曲线来讨论的;黄河三角洲是黄河携带大量泥沙在渤海凹陷处沉积形成的冲积平原,对该地区多个位置的粒径分析表明土壤的含沙量都比较高,所以文中结论对该地区土壤持水曲线的研究具有一定的借鉴意义;文中提到的盐分以及土壤含盐量对土壤持水性的研究由于试验数据较少,未能进行更系统的研究,因此盐分、土壤粒径双重影响下的土壤水分特征曲线是之后亟需研究的内容。 □

参考文献:

- [1] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1988.
- [2] 李永涛,王文科,梁照枫,等. 砂性漏斗法测定土壤水分特征曲线[J]. 地下水,2006,(5).
- [3] Van Genuchten M T. Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5).
- [4] Gardner W, Hillel D, Benyamin I Y. Post-irrigation movement of soil water: 1. Redistribution[J]. Water Resources Research, 1970,6(3).
- [5] 孙运朋,陈小兵,张振华,等. 滨海棉田土壤盐分时空分布特征研究[J]. 土壤学报,2013,(5).
- [6] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [7] Yongjun F, Jingsong Y, Jiuhua Z. Correlation between soil water retention capability and soil salt content [J]. Pedosphere, 2000,(3).
- [8] 李小刚,曹 靖,李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报,2004,(1).
- [9] 栗现文,周金龙,靳孟贵,等. 高矿化度土壤水分特征曲线及拟合模型适宜性[J]. 农业工程学报,2012,(13).
- [10] 张蔚榛. 盐渍化土壤的冲洗改良与排水[EB/OL]. 中国水科技网,2004.
- [11] 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).

(上接第 37 页)

- [10] 龚 剑,冉 勇,杨 余,等. 珠江广州河段表层水中雌激素化合物的污染状况[J]. 环境化学,2008,27(2):242-244.
- [11] 李正炎,傅明珠,王馨平,等. 冬季胶州湾及其周边河流中酚类环境激素的分布特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2006,36(3):451-455.
- [12] Lsobe N H, Nakashima A. Distribution and behavior of nonylphenol, octylphenol, and nonylphenol monoethoxylate in tokyo

metropolitan rea: their association with aquatic particles and sedimentary distributions[J]. Environ Sci Technol, 2001, 35(6): 1041-1049.

- [13] Li D, Kim M, Shim W, et al. Seasonal flux of nonylphenol in Han River Korea [J]. Chemosphere, 2004, 56(1): 1-6.
- [14] 菁 春,陈 兵,麦碧娴,等. 洪季珠江三角洲水系统基酚污染状况研究[J]. 环境科学,2004,25(3):48-52.