

古尔班通古特沙漠南缘丘间地土壤水分特征曲线及模拟

董义阳^{1,2}, 赵成义¹, 于志同³, 王丹丹^{1,2}, 班春广^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875)

摘要: 为研究干旱荒漠地区土壤水分特征的变化规律并探讨土壤水分特征曲线拟合模型的适宜性, 以古尔班通古特沙漠南缘丘间地为研究对象, 应用压力膜仪测定了丘间地剖面各土层(0—150 cm)的土壤水分特征曲线, 结合土壤容重、颗粒分布及饱和含水率等性质, 分析了丘间地不同土层水分特征和孔隙大小的分布状况, 明确了 Gardner 模型和 van Genuchten 模型拟合的适用性。结果表明: (1) 丘间地剖面砂质土壤释水量伴随吸力呈规律性变化, 低吸力段(0~100 kPa)各土层水分特征曲线走势陡直, 释水性强; 中高吸力段(100~1 500 kPa)曲线趋于平缓, 持水性强。水分曲线特征与其物理性质一致, 各土层物理性质差异较小, 曲线的差异也较小。(2) 丘间地剖面各土层大孔隙由上到下不断增加且 20—40 cm 土层的小孔隙最多, 有助于春季积雪融化迅速入渗到土壤里贮存, 对植物吸收利用水分有重大意义。(3) 两模型都能很好地拟合丘间地的土壤水分特征曲线, VG 模型的拟合效果优于 G 模型, 但 G 模型形式简单、参数少且易于求解, 更便于实际应用。

关键词: 土壤水分特征曲线; 模型拟合; 古尔班通古特沙漠; 丘间地

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0166-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.028

Characteristic Curves and Models Analysis of Soil Water in Interdune at the Southern Edge of Gurbantunggut Desert

DONG Yiyang^{1,2}, ZHAO Chengyi¹, YU Zhitong³, WANG Dandan^{1,2}, BAN Chunguang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: In this paper, we evaluated the variations of soil water and explored the suitability of the soil water characteristic curve fitting model in interdune lowland at the southern edge of Gurbantunggut Desert. Using the pressure membrane apparatus, we measured the soil water characteristic curves at different soil depths (0—150 cm) in desert land. Combined with bulk density, grain size and saturated water content, the distributions of soil water characteristics and pore size in different soil layers were analyzed, and the applicability of Gardner model and van Genuchten model fitting was defined. Our data showed that the sandy soil release rate varied regularly with soil water suction rate in interdune lowland. Soil water characteristic curves in different soil layers showed a steep trend and strong water release in low suction range (0—100 kPa), while they presented a smooth and slow trend, with a high water holding ability in high suction range (100—1 500 kPa). The soil moisture characteristic curve was consistent with its physical properties. The distribution of soil pore size varied regularly, with increasing the proportion of large pores from the top to the bottom soil layer and the small pores held the biggest ratio in 20—40 cm soil layer, which was conducive to the rapid infiltration of the spring snow melt into the soil. In addition, our results found that both the two models fitted well with the measured data in this region. The VG model was better than G model in fitting the soil water characteristic curve in interdune lowland, but G model was simple in form, with few parameters and easy solving, which was much more convenient for practical application.

Keywords: soil water characteristic curve; fitting model; Gurbantunggut Desert; interdune

土壤水分特征曲线是描述土壤水吸力与土壤含水率之间关系的曲线,反映了土壤水的能量和数量之间的关系,在确定土壤孔隙大小的分布、分析不同质地土壤水分的持水性和有效性、土壤水分运动的定量模拟及探讨水分的运移机理和状况等方面有广泛应用^[1-2]。目前,众多学者已在土壤水分特征曲线的研究方法^[3-5]、影响因素^[6-11]、模型拟合分析^[12-18]及其应用^[19-22]等方面开展了大量研究,但以上研究多集中在湿润与半湿润地区,而在干旱荒漠地区的同类研究^[15]则相对较少,特别是对干旱荒漠地区丘间地砂质土壤水分特征曲线的研究鲜有报道。

古尔班通古特沙漠南缘荒漠化问题严重,植被格局与荒漠化息息相关,而土壤水分是主要的生态限制因子,植被的演替与水文过程相互作用,植物—土壤水分关系是干旱沙区生态重建和恢复的核心科学问题^[23]。为了实现区域荒漠化防治,用模型量化描述植物—土壤水分关系是必要的手段,而此中之关键是土壤水分特征曲线。本文应用压力膜仪测定了丘间地 0—150 cm 范围各土层的水分特征曲线,结合土壤容重、颗粒分布及饱和含水率等性质,对丘间地不同土层水分特征曲线和孔隙大小的分布状况进行了分析,并比较了 Gardner 模型和 van Genuchten 模型拟合的结果,旨在揭示古尔班通古特沙漠南缘丘间地不同深度的土壤水分曲线特征及其最优拟合模型,为荒漠区植物—土壤水分关系研究及区域荒漠化防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于古尔班通古特沙漠南缘北沙窝(44°22.42′ N,87°55.20′ E),是新疆北部典型的干旱荒漠生态系统。地貌为梁窝状沙垄,沙垄近似南北走向,高度 10~25 m,垄间距 200~300 m;沙垄西坡长而缓,坡长 28~36 m,坡度 7°~9°;东坡短而陡,坡长 21~24 m,坡度 15°~19°^[24]。年均气温 7.2℃,极端

最高气温 41.5℃,极端最低气温 -37.0℃,年降水量为 70~150 mm,主要集中在 5—9 月,占全年降雨量的 70%~80%,20 cm 蒸发皿年蒸发量 2 000 mm 以上,一般在 11 月上中旬至翌年 3 月上中旬有 20~30 cm 深的稳定积雪覆盖,稳定积雪日数为 100~160 d^[24-25]。植被以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)为主,还包括蛇麻黄(*Ephedra distachya*)、角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)以及众多的短命植物,在丘间地上,种类较丰富,盖度可达到 40%~60%,部分地表覆盖有荒漠结皮^[26-27]。土壤为典型沙漠风沙土,干容重为 1.52~1.65 g/cm³,丘间地地下水埋深大于 8 m^[24]。

1.2 样品采集与分析

于 2016 年 4 月,在古尔班通古特沙漠南缘北沙窝研究区的丘间地,挖一土壤剖面(长×宽×深:2.0 m×1.5 m×1.5 m),在距土壤表面 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—150 cm 的不同深度处用环刀(容积为 100 cm³)采取土样,重复 6 次,同时,取鲜土样品置于样袋。用环刀法测定土壤饱和含水率及容重等,用 MasterSizer 2000 激光粒度分析仪测定土壤的颗粒组成。丘间地剖面的土壤物理性质见表 1。

土壤水分特征曲线测定:于 2016 年 5—7 月采用美国 SOILMOISTURE 公司生产的压力膜仪测定不同土层的水分特征曲线。将环刀土样置于水中(保证水位距环刀顶部 1~2 mm),浸泡 24 h 至土壤饱和,再置于压力膜仪内由低压到高压进行脱水测试,压力依次设定为 0.2×10⁵,0.4×10⁵,0.6×10⁵,0.8×10⁵,1.0×10⁵,1.5×10⁵,2.0×10⁵,3.0×10⁵,5.0×10⁵,7.0×10⁵,1.0×10⁶,1.5×10⁶ Pa。每次加压后至水不再流出时即达到平衡,之后取出土样,迅速称重;再将土样重新放入,重复上述过程,直至最后一个压力,取出土样测定其土壤含水率。

表 1 丘间地剖面土壤物理性质

土层深度/ cm	容重/ (g·cm ⁻³)	饱和含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	自然含水率/ (cm ³ ·cm ⁻³)	颗粒组成/%		
				粘粒 (0~0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	砂粒 (0.05~2 mm)
0—20	1.581	0.417	0.061	1.076	5.761	93.163
20—40	1.582	0.403	0.088	1.625	12.314	86.061
40—60	1.577	0.421	0.069	1.097	6.902	92.000
60—80	1.531	0.425	0.031	1.212	7.066	91.723
80—100	1.561	0.423	0.034	1.226	7.066	91.710
100—150	1.501	0.430	0.031	1.331	8.791	89.878
平均值	1.554	0.420	0.052	1.261	7.983	90.756

1.3 模型与数据分析

Gardner 模型(简称 G 模型):

$$\theta = ah^{-b}$$

van Genuchten 模型(简称 VG 模型):

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (2)$$

土壤水分特征曲线的斜率即单位基质势或吸力变化引起的含水量变化,称为比水容量 $C(\theta)$,可通过对式(1)求导得到:

$$C(\theta) = -\frac{d\theta}{dh} = a \cdot b \times h^{-(b+1)} \quad (3)$$

式中: θ 为体积含水率 (cm^3/cm^3); h 为土壤水吸力 (Pa); θ_r 为残留含水率 (cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水率 (cm^3/cm^3); $C(\theta)$ 为比水容量 ($1/\text{Pa}$); a, b, α, n, m 为经验拟合参数; $m = 1 - 1/n (n > 1)$ 。

采用均方根误差 (RSME) 定量评价模型拟合的效果,其表达式为:

$$\text{RSME} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \theta_i)^2}{N}} \quad (4)$$

式中: N 为设定压力值的总个数; P_i 为与第 i 个压力值所对应土壤含水率的模拟值; θ_i 为与第 i 个压力值所对应土壤含水率的实测值。RMSE 定量描述了模型模拟值与实测值之间的误差,其值越大,表明模型拟合效果越差;反之,越好。

应用 Excel 2013 进行基本的统计并制表,应用 OriginPro 9.0 绘制相应的图,应用 MATLAB R2012b 软件求解 G 模型参数值,应用 RETC 软件求解 VG 模型参数值。

2 结果与分析

2.1 实测土壤水分特征曲线

丘间地不同土层的水分特征曲线(图 1)显示,低吸力段(0~100 kPa),曲线陡直,土壤水含量随着吸力的增大而急剧下降,土壤排水主要在大孔隙中进行,土壤释水容易;中高吸力段(100~1 500 kPa),曲线变化平缓,土壤水含量随着吸力的增大而缓慢下降且趋于稳定,土壤排水在毛管孔隙中进行,土壤颗粒表面对水分具有强吸持能力,小孔隙里的水分很难被释放出来,水分变化幅度很小,土壤释水困难。由于丘间地土壤质地和容重等(表 1)很相近,故各土层曲线及走势几乎一致;0~20 cm 颗粒组成中砂粒含量较多,粉粘粒含量较少,释水性略大于其他土层,故曲线位置最低;20~40 cm 颗粒组成中砂粒含量较少,粉粘粒含量较多,持水能力略大于其他土层,故曲线位置最高。研究指出,土壤的颗粒组成是决定土壤孔隙结构的主要因素之一,而孔隙的形态和分布情况直接影响土壤中水分运动和溶质迁移过程^[2]。砂质土中,绝大部分孔隙容量集中在很窄孔径范围的孔隙内,一旦达到一定吸力,这些孔隙中水分会很快排空,土壤水含量急剧下降,仅存留少量的水,曲线呈现较小吸力下陡直,一定吸力以后平缓^[1-2]。土壤中粘粒

含量增多会使土壤中的细小孔隙增多,表面能较大,能吸持较多的水分,一般粘粒含量越高的土壤,任何吸力下土壤含水量都较大^[2]。

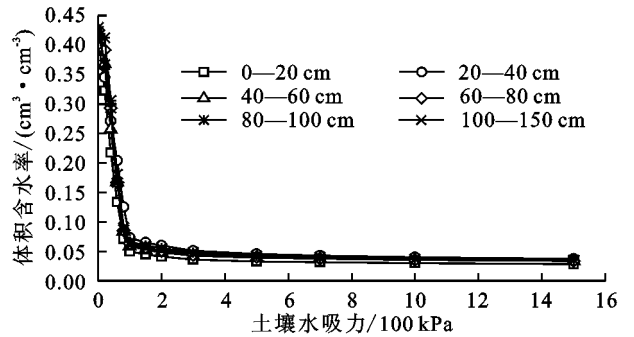


图 1 丘间地不同土层土壤水分特征曲线

2.2 土壤孔隙大小的分布

依据毛细管理论,土壤水分特征曲线可反映土壤的孔隙大小分布状况,用于分析土壤中水分的保持和运动及不同质地土壤的持水性和有效性^[1-2]。现将土壤中的孔隙设想为各种孔径的圆形毛管,那么土壤水吸力 s 和毛管直径 d 的关系可简单的表示为:

$$s = 4\sigma/d \quad (5)$$

式中: σ 为水的表面张力系数,室温条件下一般为 $7.5 \times 10^{-4} \text{ N/cm}$ 。若吸力 s 的单位为 Pa,孔径直径 d 以 mm 计,则孔径直径 d 与吸力 s 的关系可以用 $d = 300/s$ 表示。区别于真实孔径,将 d 称为当量孔径。若土壤含水率 θ_1 对应的当量孔径为 d_1 ,含水率 θ_2 对应的当量孔径为 d_2 ,则土壤中孔径在 d_2 与 d_1 之间的孔隙所占体积与孔隙总体积之比为 $\theta_1 - \theta_2 (\theta_1 > \theta_2)$ ^[1]。

把土壤水吸力分为低吸力段(0~100 kPa)、中吸力段(100~500 kPa)和高吸力段(500~1 500 kPa),对应当量孔径为大于 $3.0 \mu\text{m}$, $0.6 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 和 $0.2 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 。从表 2 可知,0~150 cm 范围各土层的当量孔径大于 $3 \mu\text{m}$ 的孔隙占孔隙总体的比例整体差距较小,除 100~150 cm 土层,由上到下基本呈逐渐增加的趋势; $0.6 \sim 3 \mu\text{m}$ 的孔隙占孔隙总体的比例与 $0.2 \sim 0.6 \mu\text{m}$ 的类似,0~20 cm 土层所占比例最小,20~40 cm 土层所占比例最大,其他土层的差距较小,但与当量孔径大于 $3 \mu\text{m}$ 所占比例的规律不一致。当量孔径大于 $3 \mu\text{m}$ 的孔隙所占比例由上到下逐渐增大,即大孔隙不断增加,水分较容易入渗到下层土壤,与邓羽松等^[12]对鄂东南崩岗研究中得到的结果一致,这有助于春季积雪融水迅速入渗到土壤里贮存。100~150 cm 土层的大孔隙较上层有所减少,会减小入渗速率,有助于土壤水分在 0~100 cm 土层的保持;20~40 cm 土层当量孔径在 $0.2 \sim 0.6$, $0.6 \sim 3 \mu\text{m}$ 范围所占比例最大,即细孔隙最多,可以吸持较多的水,与土壤剖面观察的短命植物根系多分布在 20~40 cm 土层一致,有助于短命植物利用该层土壤

水分,与蔡飞等^[13]在对天津滨海绿地土壤水分特征曲线的研究中得到的结果一致,土层的有效水含量高,该层的根系分布也较多,以适应干旱的气候环境。由上可知,土壤中孔隙大小的分布对植物吸收利用水分有重大意义,特别是对短命植物而言。

表 2 不同土层当量孔径分布比例				单位: %
土层	当量孔径/ μm			
深度/cm	>3.0	$0.6\sim3.0$	$0.2\sim0.6$	
0—20	27.310	1.690	0.440	
20—40	27.200	2.760	0.850	
40—60	30.950	1.970	0.550	
60—80	32.860	2.270	0.660	
80—100	34.660	2.340	0.700	
100—150	30.550	2.080	0.530	

2.3 G 模型的拟合分析

G 模型对各土层曲线拟合的参数(表 3)存在较小差异,拟合曲线与实测曲线的决定系数 R^2 的取值在 0.920~0.952 之间,表明 G 模型拟合数据与实测数据吻合,可用于描述丘间地土壤水分特征曲线。0—20 cm 土层的拟合精度最高, R^2 达到 0.952,40—60 cm 土层的拟合精度稍低;100—150 cm 土层的拟合精度最低, R^2 为 0.920;20—40,60—80,80—100 cm 土层的拟合精度处于中间, R^2 相差较小。

表 3 2 种土壤水分特征曲线模型拟合结果

土层深度/ cm	VG 模型						G 模型				
	θ_r	θ_s	α	n	R^2	RMSE	a	b	$a\times b$	R^2	RMSE
0—20	0.028	0.394	0.003	2.912	0.997	0.010	0.081	0.877	0.071	0.952	0.022
20—40	0.040	0.384	0.002	3.086	0.990	0.011	0.119	0.695	0.083	0.936	0.028
40—60	0.034	0.423	0.003	3.179	0.995	0.011	0.097	0.846	0.082	0.945	0.027
60—80	0.040	0.408	0.002	4.142	0.998	0.006	0.103	0.855	0.088	0.935	0.031
80—100	0.043	0.431	0.002	4.222	0.997	0.007	0.107	0.864	0.092	0.934	0.033
100—150	0.038	0.407	0.002	3.822	0.997	0.011	0.107	0.801	0.086	0.920	0.033

2.4 VG 模型的拟合分析

VG 模型对各土层曲线拟合的参数结果如表 3 所示,拟合曲线与实测曲线的决定系数 R^2 的值均在 0.990 以上,最高可达 0.998;饱和含水率(θ_s)的取值范围为 0.384~0.431 cm^3/cm^3 ,均值为 0.408 cm^3/cm^3 ,符合砂质土壤饱和体积含水率的范围(0.30~0.50 cm^3/cm^3)^[2],且与表 1 中的实测值很接近;实际应用中,一般取凋萎点处的含水率作为残留含水率(θ_r)^[15],曲线拟合得到 θ_r 的取值范围为 0.028~0.043 cm^3/cm^3 ,均值为 0.037 cm^3/cm^3 ,与实测的凋萎系数(1 500 kPa)的均值 0.034 cm^3/cm^3 很接近。以上表明 VG 模型拟合精度很高,可用于描述丘间地土壤水分特征曲线。

参数 α 是与进气吸力相关的参数,一般认为是进气吸力值的倒数,在土壤水分特征曲线的高吸力段,(2)式中 $(ah)^n$ 远大于 1,可将式中右边分母中的 1 忽略,就得到与 Brooks-Corey^[13]模型一样的形式,则参

数 a 是 G 模型中土壤水吸力为 100 kPa 时的土壤含水率,决定了曲线的高低,即持水能力大小, a 值越大,持水能力越强。表 3 中,参数 a 的取值范围为 0.081~0.119,变化较小,各土层持水能力相当,比较各土层参数 a 的大小,可知 0—150 cm 范围各土层持水性由强到弱依次为 20—40,100—150,80—100,60—80,40—60,0—20 cm。参数 b 表征土壤含水率随吸力增加而下降的速度,决定曲线的走向和坡度^[13,22], b 值越大,曲线在较低土壤吸力范围内的坡度越陡,在较高土壤吸力范围内的走向越趋于平缓,取值自上而下依次为:0.877,0.695,0.846,0.855,0.864,0.801,与图 1 中各土层曲线的走向和坡度一一对应。式(3)中,当 $h=100$ kPa,比水容量 $C(\theta)=a\times b$, $a\times b$ 值越大,持水性越强,与用参数 a 评价土壤持水性具有一致性^[13,15]。各土层参数 a 和 $a\times b$ 值变化基本一致,表明参数 a 和 $a\times b$ 表征的土壤持水能力基本一致,但二者表征的各土层持水能力差异程度不一样, $a\times b$ 值表征的持水性差异较 a 值的小,这与丁新原等^[15]在塔里木沙漠公路的研究结果一致,出现这种情况是由于 $a\times b$ 值不只是表征持水性,还表征曲线的形状,而参数 a 只表征持水性。

数 α 与进气吸力值(h_d)满足 $\alpha=1/h_d$ 的函数关系^[2]。参数 n 在一定程度上可表征曲线的坡度,曲线越陡对应的 n 值越小,反之,则越大,但又不完全合理^[15],如图 2 所示,20—40 cm 的曲线坡度最缓,与之对应的 n 值(3.086)却并非最大,最大 n 值(4.222)对应是 80—100 cm 的曲线,故邵明安等^[2]认为其表征的是曲线的形状系数。一些学者发现 VG 模型中的参数 α 随土壤粘粒含量增加呈增大趋势, n 随土壤粘粒含量增加呈减小趋势^[28],但本研究中参数 α 和 n 没有与土壤基本物理性质呈现一定的相关关系,关于土壤经验模型拟合参数与土壤物理性质之间具体的相关关系仍有待于进一步探究。

2.5 两种模型的比较

将丘间地剖面土壤水分特征曲线实测值与采用 VG 模型和 G 模型拟合所得的模拟值进行比较发现(图 2),两模型的拟合度都很高,但存在差异,实测点几乎全部落在 VG 模型的拟合曲线上,有相当一部分

未落在 G 模型的拟合曲线上,特别是在中高吸力段。低吸力段(0~100 kPa),实测点都落在两模型的拟合曲线上;中高吸力段(100~1 500 kPa),实测值与对应的 VG 模型的拟合值之间的误差很小,G 模型在 300 kPa(20—40 cm 土层在 500 kPa)对应的拟合值与实测值很接近外,其他点均未落在曲线上,小于 300 kPa(20—40 cm 土层在 500 kPa)时实测点多落在 G 模型的拟合曲线下方,大于 300 kPa(20—40 cm 土层在 500 kPa)时实测点位于 G 模型的拟合曲线上方,实测点与模型的拟合曲线相差较大。由上可知,采用 VG 模型拟合丘间地的土壤水分特征曲线较合适。由表 3 知,VG 模型拟合的决定系数 R^2 全部在 0.990 以上,最高达到 0.998,而 G 模型拟合的 R^2 在 0.920~0.952 之间,VG 模型的拟合精度显著高于 G 模型。通过两模型在同一土壤吸力下含水率的模拟值与实测值之间的 RMSE 对比分析拟合效果,由于 G 模型表达式属于幂函数,不能拟合 $h=0$ 时的饱和含水率, $h=0$ 不加入计算。各土层 VG 模型的含水率模拟值与实测值之间的 RMSE 的取值范围为 0.006~0.011;各土层 G 模型的含水率模拟值与实测值之间的 RMSE 的取值范围为 0.022~0.033,其

值大于前者。由上可知,VG 模型对丘间地的实测土壤水分特征曲线的拟合效果优于 G 模型,但两拟合方程的误差均在允许的范围内,故均能很好地拟合出各土层含水率与土壤水吸力之间的关系。

综上可知,两模型均能很好地拟合实测的水分特征曲线,VG 模型对实测水分特征曲线的拟合效果优于 G 模型,G 模型形式简单、参数少且易于求解,更便于实际应用,模型中参数 a 和 $a \times b$ 均可反映土壤的持水性能,可用于土壤水分有效性的研究。关于两模型的比较与适用性,在鄂东南崩岗区^[12]、天津滨海绿地^[13]及塔里木沙漠公路防护林地^[15]等区域已有较多研究,结果表明两模型均能很好地拟合本地区的水分特征曲线,VG 模型的拟合效果整体上优于 G 模型,本研究结果与其一致,可知两模型在湿润区、半湿润区及干旱区均适用。G 模型形式简单,参数少,易于求解,宋孝玉等^[20]及贾宏伟等^[29]基于实测数据建立了区域的 G 模型,取得良好效果,可用于区域性问题的研究;孙迪等^[18]、邓羽松等^[21]及李娇等^[22]应用 G 模型研究了土壤的持水性及土壤水分有效性,得到了较好结果;VG 模型与 G 模型在应用时各有优缺点,因此,需考虑实际情况选用模型。

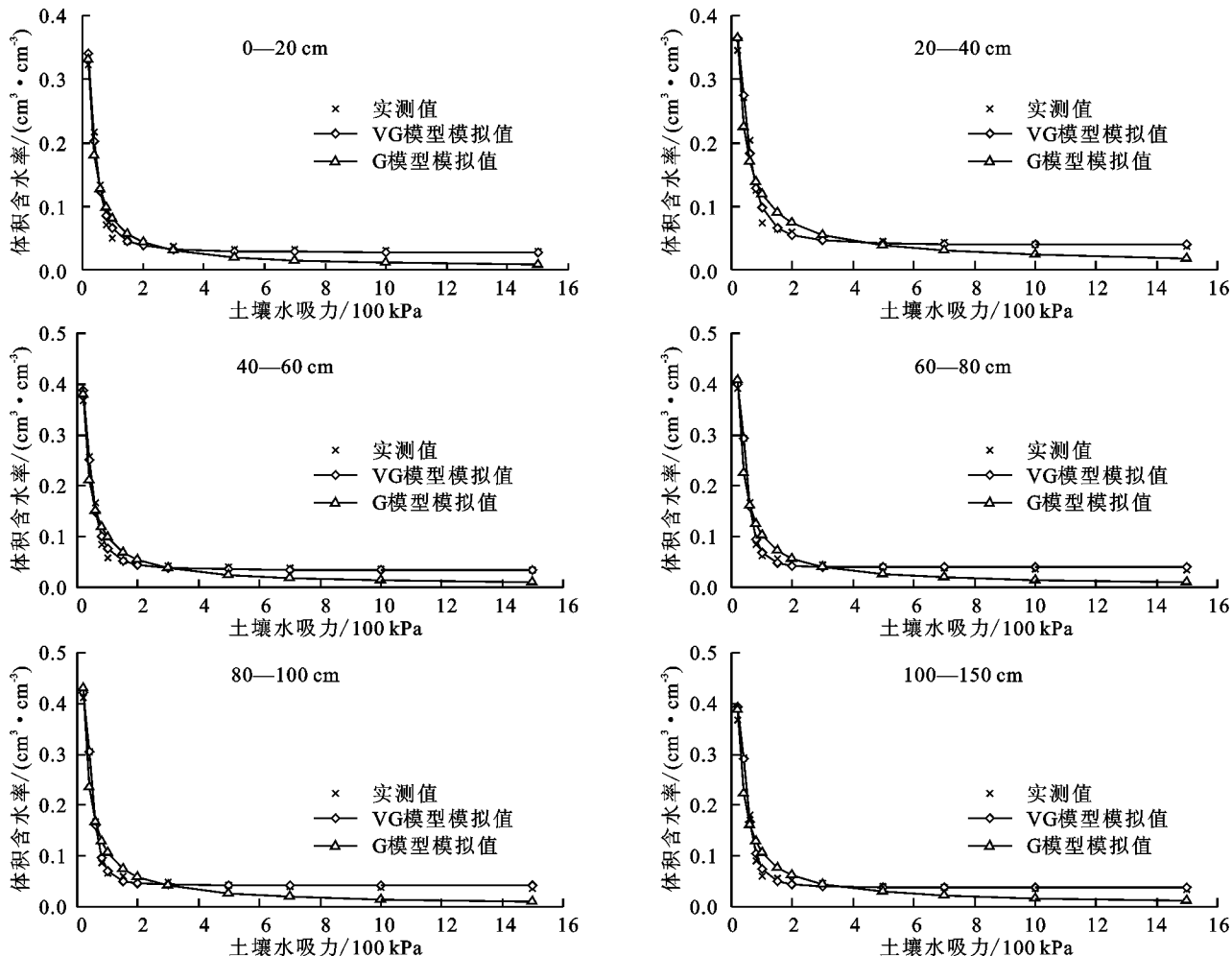


图 2 丘间地剖面水分特征拟合曲线

3 结论

(1)丘间地砂质土壤释水量伴随吸力呈规律性变化,低吸力段曲线走势陡直,释水性强;中高吸力段曲线趋于平缓。水分曲线特征与其物理性质相一致,粉粘粒含量较多的土层对应的持水性较强,反之则持水性较弱;各土层物理性质差异较小,曲线的差异也较小。

(2)利用实测的水分特征曲线,引入当量孔隙分析土壤中孔隙大小的分布,发现丘间地剖面大孔隙由上到下不断增加,有助于春季积雪融化迅速入渗到土壤里贮存,对植物吸收利用水分有重大意义。

(3)经验证明,两模型都能很好地拟合丘间地的土壤水分特征曲线,VG模型的拟合效果优于G模型,但G模型形式简单、参数少且易于求解,便于实际应用,需考虑实际情况选用模型。

参考文献:

- [1] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988:18-24.
- [2] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:67-74.
- [3] 程冬兵,蔡崇法,彭艳平,等.根据土壤粒径分形估计紫色土水分特征曲线[J].土壤学报,2009,46(1):30-36.
- [4] 韩祥伟,邵明安,王全九.简单入渗法在确定 Brooks-Corey 水分特征曲线模型参数中的应用研究[J].土壤学报,2006,43(3):506-508.
- [5] 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.
- [6] Saxton K E, Rawls W J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5):1569-1578.
- [7] Thyagaraj T, Rao S M. Influence of osmotic suction on the soil-water characteristic curves of compacted expansive clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(12):1695-1702.
- [8] 刘继龙,马孝义,张振华.不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J].农业机械学报,2010,41(1):46-52.
- [9] 吕殿青,邵明安,潘云.容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J].水土保持学报,2009,23(3):209-213.
- [10] 高红贝,邵明安.温度对土壤水分运动基本参数的影响[J].水科学进展,2011,22(4):484-494.
- [11] 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.
- [12] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等.鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟[J].土壤学报,2016,53(2):355-364.
- [13] 蔡飞,邵孝侯,王振宇,等.天津滨海绿地土壤水分特征曲线的拟合与比较分析[J].地球信息科学学报,2010,12(3):336-341.
- [14] Nadarajah R, Shada H K. A flexible model for moisture-suction relationship for unsaturated soils and its application[J]. International Journal of Geosciences, 2011, 2(3):204-213.
- [15] 丁新原,周智彬,雷加强,等.塔里木沙漠公路防护林土壤水分特征曲线模型分析与比较[J].干旱区地理,2015,38(5):985-993.
- [16] 郑健,王燕,蔡焕杰,等.植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析[J].农业机械学报,2014,45(5):107-112.
- [17] 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,2012,28(13):135-141.
- [18] 孙迪,夏静芳,关德新,等.长白山阔叶红松林不同深度土壤水分特征曲线[J].应用生态学报,2010,21(6):1405-1409.
- [19] 程冬兵,蔡崇法.两种非饱和导水参数推求方法在紫色土上的应用[J].水土保持学报,2007,21(6):143-146.
- [20] 宋孝玉,李亚娟,李怀有,等.土壤水分特征曲线单一参数模型的建立及应用[J].农业工程学报,2008,24(12):12-15.
- [21] 邓羽松,丁树文,刘辰明,等.鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J].水土保持学报,2016,29(4):132-137.
- [22] 李娇,牛健植.北京西山侧柏林和刺槐林土壤水分研究[J].水土保持研究,2013,20(1):98-101.
- [23] 李新荣,张志山,黄磊,等.我国沙区人工植被系统生态—水文过程和互馈机理研究评述[J].科学通报,2013,58(5/6):397-410.
- [24] 胡顺军,陈永宝,朱海.古尔班通古特沙漠南缘融雪水土壤入渗量[J].应用生态学报,2015,26(4):1007-1015.
- [25] 朱海,胡顺军,陈永宝.古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J].土壤学报,2016,53(7):117-126.
- [26] 赵成义,王玉朝.荒漠—绿洲边缘区土壤水分时空动态研究[J].水土保持学报,2005,19(1):124-127.
- [27] 蒋进,王雪芹,雷加强.古尔班通古特沙漠工程防护体系内土壤水分变化规律[J].水土保持学报,2003,17(3):74-77.
- [28] 杨靖宇,屈忠义.河套区区域土壤水分特征曲线模型的确定与评价[J].干旱资源与环境,2008,22(5):155-159.
- [29] 贾宏伟,康绍忠,张富仓.土壤水力参数的单一参数模型[J].水利学报,2006,37(3):272-277.