

三峡山地不同坡位土壤的水分特征曲线及水力学性质

李文政^{1,2}, 刘目兴^{1,2}, 易军^{1,2}, 张海林^{1,2}, 卢世国^{1,2}, 白雨诗^{1,2}

(1.地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079; 2.华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: 山地不同坡位的土壤水力学性质研究可为地表水文过程预测和坡地生态修复提供参考。通过采集三峡库区大老岭林区山地不同坡位的原状土样, 测定饱和导水率、当量孔径、水分库容等水力学参数, 利用 V-G 模型拟合土壤水分特征曲线, 评价不同坡位土壤的渗透性能和持水能力。结果表明: 坡顶土壤的入渗性能最好, 平均饱和导水率为 108.54 cm/d, 其他坡位平均饱和导水率为 34.81~47.56 cm/d。坡顶土壤的持水能力最差, 吸力值从 0 增至 100 kPa, 含水量下降幅度最大 (63.67%), 其他坡位下降幅度在 46.36%~52.07%。坡顶土壤大孔隙体积比最大可达 20.95%, 其他坡位在 12.27%~16.58%。田间持水量库容占总库容的百分比以坡顶土壤最小 (45.24%), 其余在 60.08%~65.33%。用 V-G 模型拟合土壤水分特征曲线, 各样点决定系数 R^2 均大于 0.95, 拟合效果较好。饱和导水率与大孔隙体积比、砂粒含量呈正相关, 与粉粒含量和黏粒含量呈负相关。V-G 模型参数 α 与进气值相关, α 值越小, 持水能力越强。试验中 α 值与砂粒含量、大孔隙体积比呈正相关, 与粉粒含量和黏粒含量呈负相关。砂粒和大孔隙越多, 土壤持水性越差。参数 n 的取值影响拟合水分特征曲线的弯曲程度, n 值越小, 曲线越平缓。试验中 n 值与砂粒含量呈正相关, 与粉粒含量呈负相关。砂粒含量越多, 随吸力增大土壤排水越快。可见, 山地坡面顶部土壤的持水能力最差, 渗透能力最强, 其他坡位差异不显著, V-G 模型拟合的结果与实测结果一致。

关键词: 山地土壤; 入渗能力; 持水能力; 坡位; 三峡库区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0135-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.019

Soil Water Retention Curve and Hydraulic Properties at Different Slope Positions in the Three Gorges Mountainous Area

LI Wenzheng^{1,2}, LIU Muxing^{1,2}, YI Jun^{1,2}, ZHANG Hailin^{1,2}, LU Shiguo^{1,2}, BAI Yushi^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory for Geographical Process Analyzing & Modeling, Wuhan 430079;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079)

Abstract: Research on soil hydraulic properties in different positions of the hillslope can provide reference for the prediction of surface hydrological process and ecological restoration in mountainous areas. In this study, undisturbed soil samples were collected from different slope positions in Dalaoling forest region, which was a typical small catchment of the Three Gorges Reservoir area, and the hydraulic parameters such as saturated water conductivity, equivalent pore diameter and water storage capacity were measured. The V-G model was used to fit the soil water characteristic curve to evaluate the soil permeability and water holding capacity of soil at different slope positions. The results showed that the soil infiltration performance of the top position was the best, and the average saturated hydraulic conductivity was 108.54 cm/d, while the average saturated hydraulic conductivity of other four slope positions was 34.81 ~ 47.56 cm/d. However, the water content of the top position decreased largely (63.67%) when the suction value increased from 0 to 100 kPa, while the average water content of other four positions decreased by 46.36% ~ 52.07%. The macropore volume ratio of the soil at the top position was 20.95%, and that of the other four points was ranging from 12.27% ~ 16.58%. The percentage of field water capacity in total soil water storage capacity was 45.24% in the top position, which was the smallest, and that of the other four points was 60.08% ~ 65.33%. The V-G model was used to fit the soil water retention curve, and the determination coefficient (R^2) of each point was greater than 0.95, which indicated that the fitting effect was good. The saturated hydraulic conductivity

收稿日期: 2020-12-14

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41771261, 41601215); 湖北省自然科学基金重点项目 (2015CFA141)

第一作者: 李文政 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水文研究。E-mail: lwzheng97@163.com

通信作者: 刘目兴 (1979—), 男, 教授, 主要从事土壤物理研究。E-mail: liumuxing@mail.ccnu.edu.cn

was positively correlated with soil macropore volume ratio and sand content, and negatively correlated with silt content and clay content. The parameter α of V-G model was related to air entry values. The smaller α value was, the stronger the water retention capacity was. In the experiment, α value was positively correlated with sand content and macropore volume ratio, and negatively correlated with silt content and clay content. The more sand particles and macropores was, the worse soil water holding capacity was. The value of parameter n affected the curvature of fitting water characteristic curve. The smaller n value was, the smoother the curve was. And n value was positively correlated with sand content and negatively correlated with silt content. The more sand content was, the faster the soil drainage was with the increasing of suction. The soil at the top of the mountain slope had the worst water-holding capacity and the strongest permeability, while the difference of other slope positions was not significant. The results of V-G model fitting were consistent with the measured results.

Keywords: mountain soil; infiltration capacity; water holding capacity; slope position; Three Gorges Reservoir area

土壤水分是影响地表植物生长和生态系统功能的关键因素^[1]。受降水、地形和植被等环境因子的影响,山地土壤水分存在剧烈的时空变异。刻画坡地土壤水文过程和提出植被恢复对策,需要研究不同坡位处土壤的渗透性、持水性等水力学性质。饱和导水率是表达土壤垂直渗透性能的常用参数,而持水性常通过土壤水分特征曲线表述。土壤水分特征曲线(soil water retention characteristic curve, SWCC)是体积含水量与土壤水吸力之间的相关曲线,对研究土壤水分有效性有重要价值^[2-4]。水分特征曲线可由张力计法、压力膜法、离心机法直接测定,但耗时费力,于是拟合土壤水分特征曲线的经验模型相继被提出。目前,拟合土壤水分特征曲线较好的经验模型有 Gardner 模型、Van-Genuchten 模型、Brooks-Corey 模型、Campbell-Norman 模型等。其中, Van Genuchten 模型(V-G 模型)应用广泛。水分特征曲线的拟合参数与持水性相关。V-G 模型中的参数 α 是与进气值相关的参数, α 越小,持水能力越强;参数 n 的取值影响拟合水分特征曲线的弯曲程度, n 值越小,曲线越平缓。参数 α 和 n 与土壤颗粒组成、有机质、容重等土壤基本理化性质相关。翟俊瑞等^[5]估算了不同侵蚀强度土壤水分特征曲线 V-G 模型拟合参数指出, α 和 n 与土壤的质地和结构有关;石浩楠等^[6]利用 V-G 模型拟合了江汉平原北部黏土层不同深度土壤的水分特征曲线指出,参数 α 为进气值的倒数,而试验中土壤的进气值与土壤的大孔隙所占比例呈负相关。

三峡库区地处青藏高原与长江中下游平原的过渡带,山地、丘陵占总面积 95% 以上,海拔落差大,坡度陡,降水集中且多暴雨,侵蚀力强,同时面临着季节性干旱的问题,是我国水土流失严重、生态系统脆弱的地区之一^[7]。小流域作为一个完整的水文响应单元,坡面产流汇入各级干流或支流包括了蒸发、入渗

等过程,其景观格局与土壤水文过程相互作用的机理复杂,是研究土壤水文过程的重要尺度^[8]。因此,明确其土壤水分贮存、保持、运动规律,对于三峡地区的水土流失的防治、生态评价以及生态环境的恢复具有重要的意义。本研究以长江三峡大老岭林区为研究区域,分别采集三峡典型小流域内坡顶、坡上、坡中、坡下、坡底的 5 个样地原状土样,测定不同坡位土壤饱和导水率,绘制土壤水分特征曲线,并采用 Van Genuchten 模型对曲线进行拟合,分析相关拟合参数与土壤基本理化性质的关系,计算当量孔径、水分库容等水力学参数,评价其入渗能力和持水能力,为库区的天然林保护与生态修复工程实施提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省宜昌市大老岭林区境内(31°02'21"N, 110°56'57"E),海拔 1 330~1 410 m。气候为亚热带季风湿润气候,气候冷湿,多云雾,空气相对湿度较大。研究区土壤为山地黄棕壤,植被以短柄栎、板栗、千筋树、杜鹃等常绿落叶针阔混交林为主^[9]。

1.2 样地选择与土样采集

2019 年 6 月,试验样地经过多次样点勘察选择了 1 个小流域内的 5 处不同坡位的 5 个样点(图 1),依次为坡底、坡下、坡中、坡上、坡顶。在各坡位选择典型样点,挖取土壤剖面后按土壤发生层分布采取原状土壤样品(环刀法:100 cm³, 5~8 个重复)。取扰动土壤样品(约 1 kg),带回实验室后测定相关土壤理化性质(表 1)。

1.3 土壤理化性质与水分特征参数

(1)土壤理化性质的测定:利用吸管法测扰动土的机械组成,用重铬酸钾氧化法测定有机质含量,原状土利用环刀法测定土壤容重,采用土壤渗透仪测定饱和导水率,以离心机法测定土壤水分特征曲线。

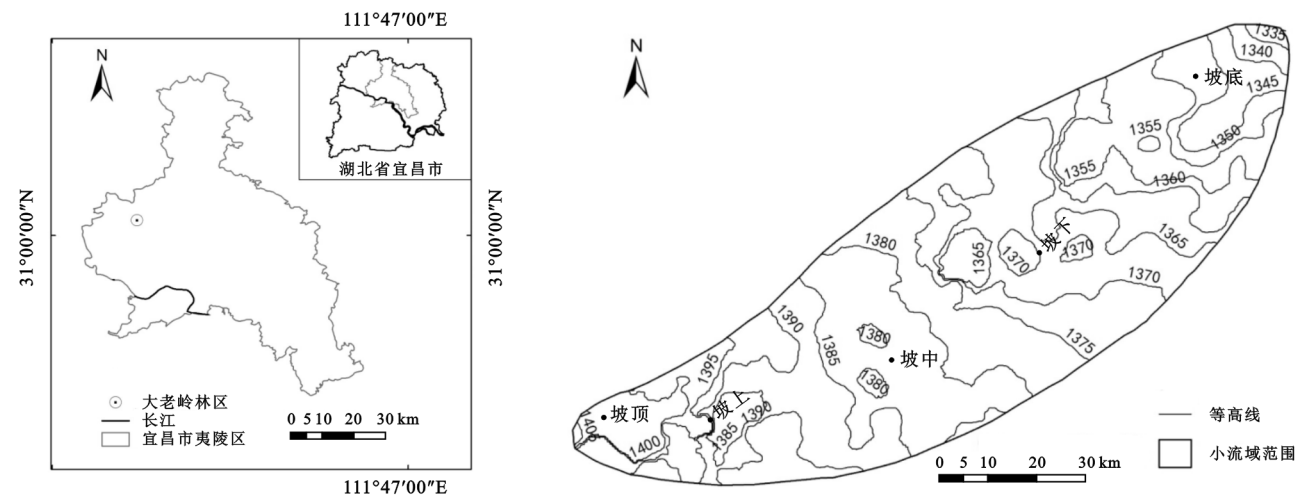


图 1 研究区及坡位分布

表 1 不同坡位土壤基本理化性质

坡位	土层 深度/cm	有机质/ (g·kg ⁻¹)	土壤机械组成/%			容重/ (g·cm ⁻³)	饱和导水率/ (cm·d ⁻¹)
			砂粒 (0.2~0.02 mm)	粉粒 (0.02~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)		
坡底	0—10	146.56	44.23	31.61	24.17	0.92	77.67
	10—23	57.68	40.58	32.36	27.06	1.07	44.95
	>23	29.69	42.60	34.81	22.59	1.06	20.07
坡下	0—20	173.17	41.95	38.53	19.52	0.90	41.80
	20—33	81.72	36.67	39.93	23.41	1.02	28.24
	33—52	73.49	40.65	35.59	23.76	0.86	74.91
	>52	56.25	—	—	—	0.91	31.33
坡中	0—13	140.47	40.74	35.47	23.79	0.83	77.73
	13—33	51.40	42.11	36.00	21.89	0.86	50.73
	33—55	28.18	43.48	39.39	17.12	0.87	31.03
	55—70	9.86	31.76	45.43	22.81	1.27	12.41
	>70	7.95	36.42	44.11	19.47	1.38	2.13
坡上	0—13	54.84	35.26	43.38	21.36	0.63	39.30
	13—23	40.67	37.52	46.62	15.86	0.75	64.65
	23—66	24.32	39.03	40.52	20.46	0.93	40.05
	>66	12.87	30.26	47.42	22.33	1.19	2.57
坡顶	8—21	79.19	50.41	32.97	16.63	0.75	123.96
	21—42	43.18	47.03	39.78	13.19	1.09	109.69
	42—70	14.44	71.39	15.01	13.60	1.24	117.44
	>70	—	—	—	—	1.30	83.06

注：—表示该土层没有采集土壤样品。下同。

(2) 当量孔径分布是指与一定的土壤吸力相当的孔隙容积占土体总容积的百分比,它能够反映在一定吸力条件下水分在土壤不同大小孔隙中的分布。常温条件下,若孔隙直径单位为 mm,吸力单位为 Pa,孔隙直径 d 和吸力 s 的关系可以表示为: $d=300/s$ ^[2]。

(3) 本试验采用 Van Genuchten 模型对实测数据进行拟合,采用 RETC 软件求解参数值。V—G 模型的表示为:

$$\theta=\theta_r+(\theta_s-\theta_r)/(1+(ah)^n)^m \tag{1}$$

式中: θ 为体积含水率(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水率(cm^3/cm^3); θ_r 为残余含水率(cm^3/cm^3); h 为基质吸力($\text{cm}\cdot\text{H}_2\text{O}$); α 、 m 、 n 为模型参数, $m=1-1/n$ 。参数 n 的取值影响拟合土壤水分特征曲线的弯曲程度, n 越小,拟合的水分特征曲线越平缓。 α 表示的是与进气吸力值相关的参数, α 值越大,介质持水能力越差^[10]。 S 指数是指土壤水分特征曲线拐点处斜率的绝对值^[11],能够反映土壤中一定体积范围内孔隙分布的集中程度,可间接反映土壤中大孔隙的分布密度^[12]。计算公式为:

$$S=\frac{\alpha m(mn+1)^{nm+\frac{1}{n}}(n-1)^{n-\frac{1}{n}}}{n^m(m+1)^{m+1}}(\theta_s-\theta_r) \tag{2}$$

(4) 饱和含水量(θ_s)、田间持水量(θ_f)、凋萎含水

量(θ_w)分别为吸力值为 0,33,1 500 kPa 吸力值下的含水量。田间持水量通过实测数据使用最小二乘法估算,通过 RETC 软件得到参数 θ_r 、 α 、 m 、 n 的值,然后根据参数计算土壤在 1 500 kPa 吸力值时的含水量。通过这 3 个土壤水分常数,可以计算不同状态下的水分库容。具体计算公式为:

$$W_t=10\times h\times\theta_s\tag{3}$$

$$W_f=10\times h\times\theta_f\tag{4}$$

$$W_d=10\times h\times\theta_w\tag{5}$$

$$W_y=W_f-W_d\tag{6}$$

$$W_h=W_t-W_f\tag{7}$$

式中: W_t 为某土层土壤水库的总库容(mm); W_f 为田间持水量对应的库容(mm),相当于兴利库容和死水库容之和(mm); W_d 为死水库容(mm); W_y 为兴利库容(mm); W_h 为滞洪库容(mm); h 为某土层的厚度(80 cm)。

1.4 统计分析

根据实测吸力值与含水量数据,借助 RETC 软件进行水分特征曲线参数的拟合(V-G 模型)。使用 SPSS 21.0 软件进行相关分析,使用 Origin 2018 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同坡位土壤饱和和导水率

研究区不同坡位土壤饱和和导水率总体均随土层深度增加波动降低,但坡位之间有较大差异(图 2)。坡顶土壤平均饱和和导水率为 108.54 cm/d,远大于坡底(47.56 cm/d)、坡下(44.07 cm/d)、坡中(34.81 cm/d)和坡上(36.64 cm/d)。由图 2 可知,同一坡位饱和和导水率数据在不同土层深度波动程度存在差异,大体表现为土壤表层的标准差大于底层。坡顶土壤饱和和导水率整体标准差也大于其他 4 点,说明坡顶土壤饱和和导水率变动幅度大,这可能是由于坡顶土壤孔隙分布不均匀造成的。

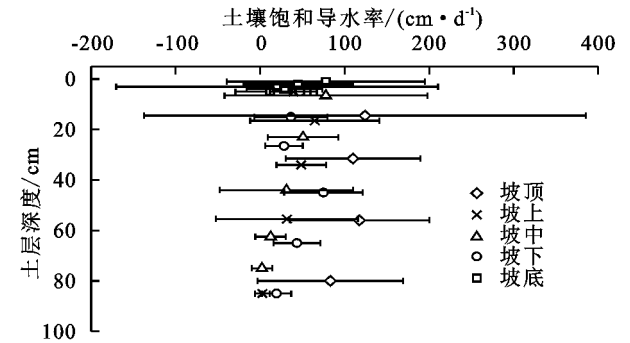


图 2 各坡位不同土层深度的土壤饱和和导水率

2.2 不同坡位土壤水分特征曲线分析

由图 3 可知,各样点不同土层样品的含水量随着吸力值的增加表现为先迅速下降、后缓慢下降的趋势,但不同样点也有差异。随着土层深度的增加,土

壤的结构在变化,不同土层的持水能力也随之变化。其中,当吸力值处于 0~10 kPa 的低吸力阶段时,坡底、坡下、坡中、坡上表层土壤含水量最高,而吸力值在 10~100 kPa 时底层的含水量最高。这说明低吸力阶段表层土壤的持水能力强,高吸力阶段深层土壤的持水能力强。而坡顶从 0~100 kPa 吸力段内土壤各深度的水分特征曲线近似平行,表层在各吸力值下始终含水量最高,深层含水量较低。

当吸力值从 0.01 kPa 增加到 10 kPa 时,坡顶土壤的平均体积含水量下降幅度最大,为 49.55%,分别是坡底(30.52%)、坡下(29.29%)、坡中(26.14%)、坡上(31.75%)的 1.62,1.69,1.9,1.56 倍。在各土层的土壤中,随着土层深度的增加,土壤含水量整体呈下降的趋势,表层的下降幅度最大,底层的下降幅度最小。坡顶和坡上表层的体积含水量下降幅度高于坡底、坡下和坡中。在其他土层深度中以坡顶的下降幅度最大,坡中和坡上深层土壤水分变化速率最缓慢。

当吸力值从 10 kPa 增加到 100 kPa 时,不同坡位土壤体积含水量下降幅度减小,均在 28% 左右。坡底、坡下、坡中、坡上土壤含水量都在 25% 以上;坡顶处 21 cm 以下的土壤含水量低于 20%。相同吸力条件下,土壤体积含水量越高,下降幅度越小,表明土壤的持水能力越强,反之持水能力越弱。吸力相同时各样地相比较,坡顶的平均土壤体积含水量显著小于其余 4 点,0~100 kPa 吸力值内含水量下降幅度也最大,即坡底、坡下、坡中、坡上的持水能力高于坡顶。因此,降雨后坡顶土壤水分向内传导快,排水能力强,水分沿着地形向下坡位土壤汇聚,而下坡位的土壤持水能力强导水能力弱,容易形成径流。

2.3 不同坡位土壤孔隙分布

坡顶相较于其余 4 点土壤大孔隙平均体积比最大,土壤的通气性和透水性较好。由图 4 可知,当量孔径 >0.06 mm 的孔隙为大孔隙,土壤大孔隙中的水为重力水,能在重力作用下排走。 >0.06 mm 的大孔隙随着土层深度的增加所占比例基本上是逐渐减少的。土壤大孔隙含量越高,水分在土壤大孔隙中运动所受到的阻力越小,饱和和导水率越大^[13]。坡顶土壤大孔隙平均体积比(20.95%)高于坡底(13.93%)、坡下(13.85%)、坡中(12.27%)、坡上(16.58%);坡上表层大孔隙所占比例也较高,因此土壤水分特征曲线中随吸力值的增加,坡上表层的体积含水量下降幅度也较大。0.01~0.06 mm 的当量孔径所占比例小,随着土层深度的增加,也基本上呈现下降的趋势。0.75 μm ~0.01 mm 的当量孔径体积比在各样地土层中相差不大。

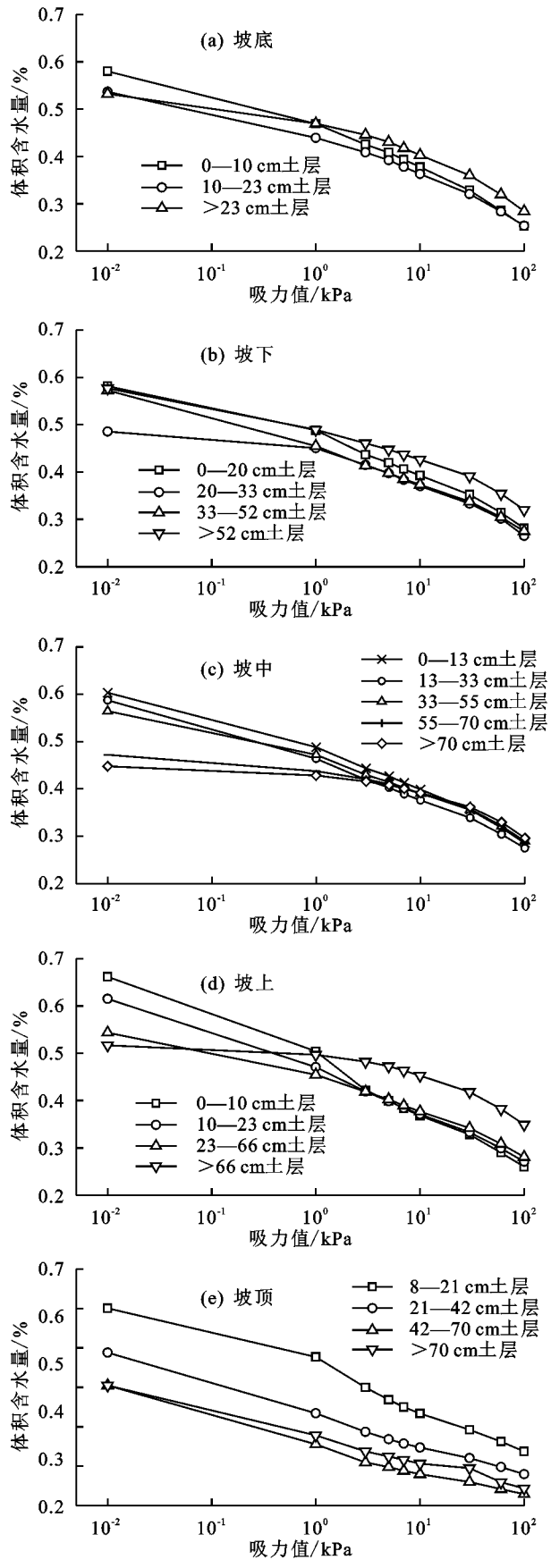


图3 不同坡位土壤水分特征曲线

2.4 不同坡位土壤水分特征曲线的模拟

由表2可知,研究区5个坡位土壤水分特征曲线的模型拟合结果,各土层决定系数 R^2 在0.987~0.998,均

大于0.95,表明其拟合效果较好,精度较高。坡顶的平均 n 值高于其他4点,说明坡顶土壤含水率变化速率更大;不同土层进行比较,表层的 n 值一般大于其他层次,这与图3中反映的各坡位表层土壤水分变化率较大是一致的。不同土层间参数 α 的差异较大,为0.026~1.505,呈现出随土层深度增加而减小的趋势,说明土壤孔隙随土层深度的增加而减小,空气突破水膜进入土体的难度增大,进气压力值增大。坡顶的平均 α 值最大,其他4点差异不明显,说明坡顶的持水性能较差。坡底、坡下、坡中、坡上土壤的 S 指数大致表现为随土层深度增加而减小,坡顶土壤则相反。坡底、坡下、坡中、坡上、坡顶的平均 S 指数分别为0.008,0.011,0.010,0.017,0.039,表明坡顶土壤的大孔隙分布密度高于其他4点。

对5个坡位土壤的有机质、容重、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、大孔隙比例等理化性质与V-G模型的拟合参数 α 和 n 分别进行相关性分析。由表3可知, α 与砂粒、大孔隙呈极显著正相关($P<0.01$),与粉粒含量呈显著负相关($P<0.05$),与黏粒含量呈极显著负相关($P<0.01$);参数 n 与砂粒含量呈显著正相关($P<0.05$),与粉粒含量呈极显著负相关($P<0.01$),而与有机质和容重并没有显著的相关性。

2.5 不同坡位水分库容

由表4可知,坡底、坡下、坡中、坡上的平均饱和含水量(53.50%~58.42%)、平均毛管含水量(38.12%~39.23%)和田间持水量(33.15%~35.10%)较为接近,且均高于坡顶。除坡下外同一坡位土壤饱和含水量表层高于下层。坡下土壤各层饱和含水量差异不明显。不同坡位土壤从表层到底层饱和含水量的下降速度表现为坡顶(32.65%)>坡中(25.82%)>坡上(21.89%)>坡底(8.27%)>坡下(0.69%)。坡底、坡下、坡中、坡上土壤的毛管含水量和田间持水量、凋萎含水量整体随着土层深度的增加波动上升,坡顶土壤则呈下降趋势。5个坡位0~80 cm土层土壤水分库容差异较大。土壤水分总库容表现为坡上>坡下>坡底>坡中>坡顶。坡顶处土壤仅为坡上的81.20%。田间持水量对应的库容为土壤能稳定保持的最大水分容量,表现为坡上土壤最大,坡顶土壤最小。坡底、坡下、坡中、坡上、坡顶样地土壤的最大水分库容占总库容的百分率分别为60.31%,63.01%,65.33%,60.08%,45.24%。死水库容表现为坡中>坡上>坡底>坡下>坡顶。坡下土壤的兴利库容最大,其次为坡底、坡中、坡上,坡顶土壤最低,仅为坡下土壤的55.42%。滞洪库容表现为坡顶>坡上>坡底>坡下>坡中。由此可见,坡底、坡下、坡中和坡上处的土壤有更强的水源涵养功能,土壤内可以贮存更多的水分调节径流,而坡顶土壤的储水能力较差。

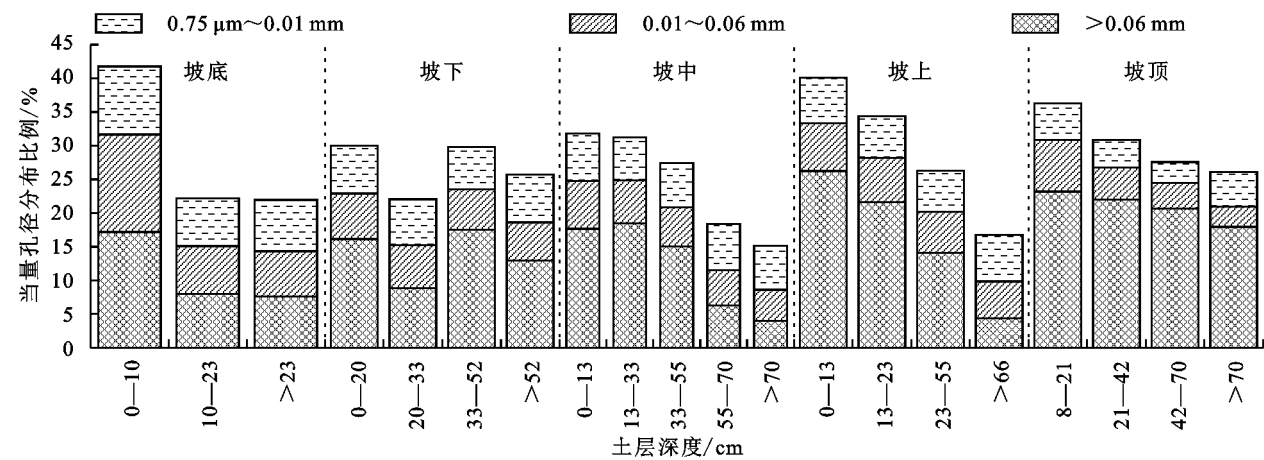


图 4 各坡位当量孔径分布比例

表 2 V-G 模型参数拟合及 S 指数

样地	土层深度/cm	θ_r	θ_s	α	n	R^2	S
坡底	0—10	0.081	0.580	0.259	1.171	0.966	0.011
	10—23	0.082	0.537	0.277	1.156	0.962	0.010
	>23	0.066	0.532	0.103	1.149	0.960	0.004
坡下	0—20	0.058	0.581	0.278	1.145	0.982	0.011
	20—33	0.080	0.486	0.074	1.164	0.985	0.002
	33—52	0.061	0.573	0.563	1.135	0.979	0.020
	>52	—	0.577	—	—	—	—
坡中	0—13	0.062	0.603	0.397	1.135	0.997	0.015
	13—33	0.058	0.587	0.581	1.129	0.982	0.021
	33—55	0.055	0.564	0.375	1.119	0.979	0.012
	55—70	0.072	0.472	0.054	1.136	0.961	0.002
	>70	0.071	0.448	0.026	1.141	0.969	0.001
坡上	0—13	0.092	0.661	0.536	1.183	0.991	0.026
	13—23	0.049	0.615	0.761	1.132	0.990	0.030
	23—66	0.058	0.544	0.346	1.122	0.980	0.011
	>66	0.087	0.517	0.026	1.138	0.979	0.001
坡顶	8—21	0.048	0.601	0.385	1.177	0.996	0.018
	21—42	0.043	0.488	1.435	1.156	0.996	0.049
	42—70	0.057	0.405	1.505	1.207	0.993	0.048
	>70	—	0.404	—	—	—	—

表 3 土壤理化性质与 V-G 模型拟合参数的相关系数

拟合参数	有机质	砂粒	粉粒	黏粒	容重	>0.06 mm 大孔隙
α	0.10	0.70**	−0.51*	−0.62**	−0.30	0.82**
n	0.12	0.57*	−0.64**	−0.22	0.04	0.40

注：* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关；* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论

饱和导水率是表征土壤入渗性能的重要指标,饱和导水率数值越高,降水越容易入渗,则不容易产生径流。饱和导水率受土壤容重、有机质含量、土壤质地等因素的影响。通过对 5 坡位有机质含量、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、土壤容重、>0.06 mm 大孔隙所占比例与 K_s 进行相关性分析表明,砂粒含量与 K_s 为极显著正相

关关系($R^2=0.77,n=18$);粉粒含量与 K_s 为极显著负相关关系($R^2=0.64,n=18$),黏粒含量与 K_s 为显著负相关关系($R^2=0.49,n=18$),>0.06 mm 的大孔隙所占比例与 K_s 为极显著正相关关系($R^2=0.78,n=20$)。说明土壤质地和大孔隙是影响土壤渗透性能的主要因素。坡顶土壤的砂粒含量和大孔隙所占比例均高于其余 4 点,砂粒含量高的土壤通透性好^[14],并且大孔隙对于传

导水流具有重要作用,可明显增加入渗,减少地表径流^[15];而坡底、坡下、坡中和坡上土壤的粉粒和黏粒含量高于坡顶土壤,粉粒和黏粒含量高的土壤细小孔隙多,表面能比较大,保持水分的能力增强,使土壤渗透

能力降低^[16],因此坡顶土壤的饱和导水率最高。这与马思文等^[17]对三峡库区典型城郊防护林土壤饱和导水率特征的研究结果一致,其指出土壤机械组成是影响土壤饱和导水率的主要因素之一。

表 4 不同坡位土壤持水性能和库容参数

坡位	土层 深度/cm	饱和 含水量/%	毛管 含水量/%	田间 持水量/%	凋萎 含水量/%	W_t / mm	W_f / mm	W_d / mm	W_y / mm	W_h / mm
坡底	0—10	58.01	37.77	32.32	20.20	439.7	265.18	167.80	97.38	174.52
	10—23	53.67	36.30	31.61	20.56					
	>23	53.21	40.29	35.51	22.16					
坡下	0—20	58.12	39.29	34.76	21.37	443.33	279.34	165.26	114.08	163.99
	20—33	48.56	37.04	32.92	19.43					
	33—52	57.27	37.33	33.36	21.17					
	>52	57.72	42.59	38.63	—					
坡中	0—13	60.34	39.88	35.10	22.89	428.01	279.61	184.49	95.13	148.40
	13—33	58.73	37.59	33.44	22.17					
	33—55	56.45	39.05	35.17	23.67					
	55—70	47.23	39.00	35.29	23.24					
	>70	44.76	39.15	35.76	23.33					
坡上	0—13	66.14	36.83	32.34	20.14	467.36	280.77	183.76	97.00	186.59
	13—23	61.51	37.08	32.89	21.35					
	23—66	54.37	37.71	33.79	22.87					
	>66	51.66	45.29	41.36	27.52					
坡顶	8—21	60.05	33.33	28.84	16.70	379.51	170.87	107.64	63.23	208.64
	21—42	48.80	24.73	21.78	13.62					
	42—70	40.46	18.00	15.78	10.05					
	>70	40.44	20.68	19.03	—					

土壤水分特征曲线实质上反映的是土壤孔隙状况和含水量之间的关系,因此影响土壤孔隙状况和水分特性的因素都会对土壤持水能力产生影响^[18]。程子捷等^[19]对安溪县花岗岩崩岗土体的土壤水分特征曲线进行 V—G 模型拟合表明,拟合参数 α 和 n 与土壤容重、形状比率、磨圆度和有机质存在相关关系,这些土壤理化性质改变了土壤内部孔隙结构和土体孔径分布,进而影响了土壤水分特征曲线。陈雪等^[20]对等高反坡阶下土壤水分特征曲线进行 V—G 模型拟合表明,模型参数 α 和 n 主要受土壤质地、容重和毛管孔隙度的影响,布设等高反坡阶减小了土壤容积密度,增加了土壤毛管孔隙度,对土壤水分和持水能力产生了作用。本研究相关性分析表明,V—G 模型的尺度参数 α 和形状系数 n 的主要影响因素为土壤质地和大孔隙体积比。坡顶土壤颗粒粗,其表面积小,形成的孔隙就大,水分易排走,土壤的持水能力弱。土壤水分库容更直接地反映了土壤的持水性能。滞洪库容不能长久保持在土壤中,只起到滞蓄的作用;死水库容不能被植物吸收利用,也不能被释放;兴

利库容的土壤水分可利用率高,能代表土壤较长时间保存水分的能力。坡底、坡下、坡中、坡上的总库容、兴利库容以及田间持水量对应的库容都显著高于坡顶,说明坡顶的贮水能力弱于其他 4 点。

坡位对土壤质地有着重要影响,一般来说,坡地上部土壤容易受到侵蚀、搬运,土壤颗粒滚落较多,结构松散,砂粒含量较多,而坡地下部有利于细粒土壤的堆积,粉粒和黏粒的所占比例高^[21]。而本研究中分别位于坡下、坡中、坡上的土壤持水能力与坡底土壤无明显差异,坡顶的持水能力显著小于位于其坡下的 4 点,这可能是因为坡下、坡中、坡上位于沟谷地形中,并且坡度较小,有利于细粒土壤的淤积,使其与坡底的土壤质地较为接近,提高其持水能力。降雨之后,坡顶的土壤快速流失水分,坡上、坡中、坡下、坡底接收来自上部的水分而排水缓慢,容易产生水土流失的问题。

4 结 论

(1)对三峡山地典型小流域坡顶、坡上、坡中、坡下、坡底 5 处坡位的土壤水分特征曲线和水力学性质

的研究表明,坡顶的入渗性能最好,平均饱和导水率为 108.54 cm/d,其余 4 点平均饱和导水率为 34.81~47.56 cm/d,坡顶土壤的饱和导水率变异性也高于其他 4 点。本研究中土壤质地和土壤大孔隙体积比是影响饱和导水率的主要因素。坡顶的持水能力最差,随着吸力值的增加坡顶的含水量下降幅度高于其他 4 点,坡底、坡下、坡中、坡上处土壤含水量下降幅度相近。利用土壤水分特征曲线得出的土壤当量孔径和水分库容表明,坡顶平均土壤大孔隙体积比(20.95%)最大,其余 4 点为 12.27%~16.58%,因此坡顶土壤更有利于水分向内传导,坡上、坡中、坡下、坡底土壤的总库容、兴利库容以及田间持水量对应的库容也高于坡顶土壤,贮水能力更强。

(2)V-G 模型可以很好地用于三峡山地土壤的水分特征曲线的拟合。V-G 模型参数 α 值与砂粒含量、大孔隙体积比呈正相关,与粉粒含量和黏粒含量呈负相关;参数 n 值与砂粒含量呈正相关,与粉粒含量呈负相关。

参考文献:

- [1] Yang J, Chen H S, Nie Y P, et al. Dynamic variations in profile soil water on karst hillslopes in Southwest China [J]. *Catena*, 2019, 172: 655-663.
- [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.
- [3] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域典型造林整地工程土壤水分特征曲线模拟[J].生态学报,2018,38(18):6511-6520.
- [4] 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.
- [5] 翟俊瑞,谢云,李晶,等.不同侵蚀强度黑土的土壤水分特征曲线模拟[J].水土保持学报,2016,30(4):116-122.
- [6] 石浩楠,陈植华,胡成,等.江汉平原北部黏土层土壤水分特征曲线的测定与模拟[J].安全与环境工程,2019,26(5):25-32.
- [7] 符素华,张志兰,蒋光毅,等.三峡库区水土流失综合治理优先小流域的识别方法[J].水土保持学报,2020,34(3):79-83,197.
- [8] 彭新华,王云强,贾小旭,等.新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1071-1087.
- [9] 沈泽昊,金义兴,赵子恩,等.三峡大老岭地区森林群落的数量分类研究[J].武汉植物学研究,2000,18(2):99-107.
- [10] 董义阳,赵成义,于志同,等.古尔班通古特沙漠南缘丘间地土壤水分特征曲线及模拟[J].水土保持学报,2017,31(1):166-171.
- [11] Sinha N K, Chopra U K, Singh A K, et al. Soil physical quality as affected by management practices under maize-wheat system [J]. *National Academy Science Letters*, 2014, 37(1):13-18.
- [12] 高鹏飞,冉卓灵,韩珍,等.含岩屑紫色土水力特性及饱和导水率传递函数研究[J].土壤学报,2021,58(1):128-139.
- [13] 胡传旺,王辉,刘常,等.南方典型土壤水力特征差异性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):97-102.
- [14] 李广文,冯起,张福平,等.黑河上游草地土壤水分特征曲线研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):128-134.
- [15] 阮芯竹,程金花,张洪江,等.重庆市四面山不同土地利用类型饱和导水率[J].水土保持通报,2015,35(1):79-84.
- [16] 姚姣转,刘廷玺,王天帅,等.科尔沁沙地土壤水分特征曲线传递函数的构建与评估[J].农业工程学报,2014,30(20):98-108.
- [17] 马思文,张洪江,程金花,等.三峡库区典型城郊防护林土壤饱和导水率特征研究[J].南京林业大学学报,2018,42(5):99-106.
- [18] Gan M, Jia Y H, Shao M A, et al. Permanent gully increases the heterogeneity of soil water retention capacity across a slope-gully system [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 272: 206-217.
- [19] 程子捷,张海东,蒋芳市,等.安溪县花岗岩崩岗土体水分特征曲线及其影响因素[J].水土保持学报,2018,32(3):120-125.
- [20] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等.基于 Van Genuchten 模型的等高反坡阶下土壤水分特征[J].水土保持研究,2019,26(5):45-52.
- [21] 娄淑兰,刘目兴,易军,等.三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J].生态学报,2019,39(13):4844-4854.