

基于 Van Genuchten 模型的等高反坡阶下土壤水分特征

陈雪, 宋娅丽, 王克勤, 王帅兵

(西南林业大学 生态与水土保持学院, 昆明 650224)

摘要:为了阐明等高反坡阶处理对土壤持水性的改善作用,选取滇中昆明市北郊松华坝迤迤小流域为研究区,研究等高反坡阶对坡耕地 0—100 cm 土层土壤水分特征曲线的影响,使用 vanFit 软件拟合获得 Van Genuchten 模型参数,阐明各土层土壤持水性及其与影响因子的关系。结果表明:(1) 等高反坡阶对坡上部影响不显著($p>0.05$),对坡中部影响显著($p<0.05$),对坡下部影响极显著($p<0.01$);(2) 与土壤水分特征曲线参数的关系中,容重和砂粒含量呈负相关,总孔隙度、毛管孔隙度和粉粒含量呈正相关;(3) 模型拟合土壤水分特征曲线的决定系数 R^2 均高于 0.85,可靠性较高;原状坡耕地(1.719 6)和等高反坡阶处理坡耕地(1.773 5)的 n 值均在 10—20 cm 土层最大,土壤在 10—20 cm 土层的土壤含水率变化较大,等高反坡阶处理坡耕地的土壤含水率变化大于原状坡耕地;(4) 原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地均在 10—20 cm 土层供水性好,等高反坡阶处理坡耕地在 40—60 cm 土层持水能力强,而原状坡耕地在 20—40 cm 土层持水能力强。综上,等高反坡阶处理对坡耕地土壤的保水性能具有明显的提高作用,对坡耕地地表径流拦蓄、增加水分入渗和减少土壤流失起到了明显的改善作用。

关键词:等高反坡阶;坡耕地;土壤水分特征曲线;Van Gennuchten 模型;持水性

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0045-08

Moisture Characteristics Under Contour Reverse-Slope Terrace Based on Van Genuchten Model

CHEN Xue, SONG Yali, WANG Keqin, WANG Shuaibing

(College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: In order to elucidate the effect of equal high reverse slope treatment on soil water retention, the small watershed of Yizhe in Songhuaba Dam in Kunming northern suburb of central Yunnan was selected as a research area in this study, and the influence of such contour reverse-slope terrace on soil water characteristic curve of 0—100 cm soil in sloping farmland was studied. Vanfit software was used to obtain Van Genuchten model parameters, and the relationship between water retention and its influencing factors in each soil layer was expounded. The results showed that: (1) the effect of contour reverse-slope terrace on the upper slope was not significant ($p>0.05$), its effect on the middle slope was significant ($p<0.05$), and its effect on the lower part of the slope was very significant ($p<0.01$); (2) in relation to the parameters of soil water characteristic curve, the bulk density and the content of sand grain were negatively correlated, and total porosity, capillary porosity and particle content were positively correlated; (3) the determining coefficients of the model fitting soil moisture characteristic curve were higher than 0.85, and the R^2 was higher reliability; the n values of the undisturbed slope cultivated land (1.719 6) and the contour reverse-slope terrace treatment slope cultivated land (1.773 5) were the largest in the 10—20 cm soil layer; the change of soil moisture content in sloping farmland with contour reverse-slope terrace was greater than that of intact sloping farmland; (4) soil water availabilities is higher in 10—20 cm soil layers of the slope farmland of the original sloping farmland and the contour reverse-slope terrace treatment slope cultivated land, and water holding capacity in 40—60

收稿日期:2018-11-04

修回日期:2018-11-27

资助项目:云南省科技计划重点研发项目(2018BB018);国家自然科学基金(30660037);云南省应用基础研究青年项目(2016FD044)

第一作者:陈雪(1992—),女,山东泰安人,硕士,主要从事土壤水分特征研究。E-mail:13053862529@163.com

通信作者:王克勤(1964—),男,甘肃庄浪人,博导,教授,主要从事小流域环境综合治理的理论与技术研究。E-mail:wangkeqin7389@sina.com

cm soil layer of the slope farmland treated with contour reverse-slope terrace was strong, and water holding capacity in the 20—40 cm soil layer of the undisturbed sloping farmland was strong. In conclusion, sloping farmland soil under the treatment of contour reverse-slope terrace had the significant effect on the performance of soil water retention, which played an important role in improving the surface runoff interception, increasing water infiltration and reducing soil loss.

Keywords: contour reverse-slope terrace; slope farmland; soil water characteristic curve; Van Genuchten model; water-holding

土壤水分特征曲线表达了基质吸力与土壤含水量之间的关系^[1],并能反映土壤的应力状态、渗透率、强度等特征^[1-3]。土壤水分是土壤肥力的重要组成^[4],土壤持水特性是土壤吸持水分的能力^[5],目前往往通过测定土壤水分特征曲线来研究土壤持水特性^[6-7],其影响因素较多,如质地、结构、孔隙等。目前尚不能从理论上推求土壤水势与含水率的关系,常采用试验方法测出土壤水势与含水率数据后拟合成经验模型。拟合土壤水分特征曲线的经验模型主要有 Gardner 模型^[8]、Brooks-Corey 模型^[9]、Fredlund and Xing 模型^[10]、Van Genuchten 模型^[11]等。其中, Van Genuchten 模型(V-G 模型)因其具有较好的物理学基础、广泛适用性、以及较高的模型与实测数据拟合程度而被众多研究者采用^[12-15]。通过分析研究土壤水分特征曲线和 V-G 模型参数,可为评估土壤持水能力和释水能力、合理的获取土壤水分运动参数等提供理论依据。

从 Fredlund 等^[16]为土壤水分特征曲线建立了理论基础开始,国内外专家对土壤水分特征曲线做了大量的研究,在试验方法、曲线拟合、滑坡预测等方面均有了较深入的进展,如牛晓彤等^[17]为揭示土壤涵养水源的机制,用 V-G 模型拟合山地土壤的水分特征曲线,认为三峡山地土壤随吸力增大,土壤含水率呈先迅速降低后趋于平缓的变化规律;李兴等^[18]为探明生物炭对土壤水分特征的影响,利用 V-G 模型对试验结果进行曲线拟合,得到生物炭能够提高土壤的持水、保水性能,对改善土壤水土环境具有一定的促进作用;赵文娟等^[19]利用压力膜仪对宁夏银北地区盐渍土进行土壤水分特征曲线试验参数测定,对比了 V-G 模型和 Gardner 模型,认为在提高数值精度方面 V-G 模型优势明显;Simunek 等^[20]将 Levenberg-Marquardt 非线性参数优化方法与求解变饱和流动方程的拟合模型 HYDRUS-2D 相结合,通过对 Richards 方程的数值反演来估计 Van Genuchten 的土水力参数。

等高反坡阶作为坡耕地水土保持控制措施之一,可有效减少水土流失增加入渗,其机理在于可直接蓄水减沙,对坡面降水进行再分配,同时阻止泥沙的产

生,从而对产生的径流和泥沙起到调控作用^[21-22]。目前有关等高反坡阶调控作用的研究多集中于面源污染物、产流产沙、土壤水分空间分布、土壤碳库等方面^[23-25],而对等高反坡阶处理下坡耕地土壤水分特征曲线的空间变异性鲜有报道。滇中昆明松华坝水源区迤者小流域内山区半山区面积占总面积的 95%以上,耕地面积近 6 500 hm²,一半以上为坡耕地^[21]。阐明该区域坡耕地土壤持水特性,提高土壤的保水蓄水能力已成为坡耕地节水抗旱的必然选择。因此,本试验选取滇中昆明市北郊的松华坝水源区迤者小流域为研究区,通过压力膜仪法测定绘制土壤水分特征曲线,并采用 V-G 模型对曲线进行拟合,分析拟合参数与土壤物理性质的关系,探讨土壤持水、保水和土壤水分的有效性,以期对滇中松华坝水源区节水抗旱及保水蓄水技术的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

迤者小流域位于昆明市盘龙区滇源街道的西南部(北纬 24°14'43"—25°12'48",东经 102°48'37"—102°44'51")。小流域呈不规则纺锤形,南北长 6.7 km,土地总面积 13.26 km²。小流域东连金钟村,西部、南部与富民县毗邻,北到阿子营乡交界。是滇池系统中盘龙江第一支流的源区,地势总体呈现出西北高,东南低的特点,最高海拔为 2 589.5 m,位于流域西南部的野猫山,最低海拔为 2 010 m,位于盆地河口,相对高差 479.5 m,平均海拔 2 220 m。地面坡度西大多在 5°~36°。气候特点夏秋温热,冬春干凉,属北亚热带和暖温带混合型气候,多年平均气温 13.8℃。流域内多年平均降雨量 757.2 mm,其中 5—10 月为雨季,降雨量约占全年的 85%以上。该流域内土壤主要为红壤,占流域土地总面积的 89.3%。土壤 pH 值 4.39,土壤有机质含量约为 5.39 g/kg,土壤中速效性钾的含量约为 659.44 mg/kg。表层土壤全氮含量约为 0.94 g/kg,水解氮含量 120.95 mg/kg。表层土壤全磷含量约为 0.35 g/kg,速效磷含量 92.39 mg/kg。

1.2 样地选择及土样采集

试验地位于昆明市松华坝水源区迪者小流域, 根据该地区地形条件, 选择一块典型坡耕地进行试验布设。试验样地包括原状对照坡耕地和 2009 年布设的等高反坡阶处理坡耕地, 分别编号为 1#、2# 小区, 样地示意图如图 1A。坡度均为 15°, 东西坡向, 中坡位。等高反坡阶宽 1.2 m, 反坡 5°, 两条等高反坡阶之间距离为 7.5 m, 等高反坡阶剖面示意图见图 1B。

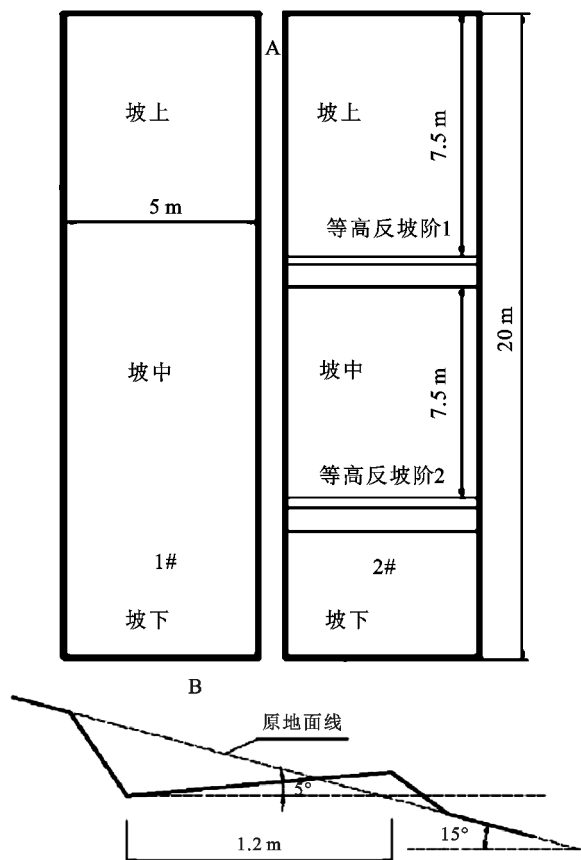


图 1 样地平面及等高反坡阶示意图

在原状对照和等高反坡阶处理坡耕地上, 于 2017 年 11 月沿坡面同坡位各选择 3 块样地, 每块样地沿对角线设置 3 个 1 m×1 m 的样方。然后挖 1 m 深的土壤剖面, 按照 0—10 cm, 10—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm, 60—80 cm, 80—100 cm 共 6 个土层分别取样, 文中所有数据均为 3 次重复平均值。

1.3 试验方法

将采集后的样品带回西南林业大学实验室, 风干后分别测定以下指标:

土壤水分常数的测定: 土壤水分常数主要包括土壤饱和含水率、土壤田间持水率、土壤毛管断裂含水率、凋萎系数和吸湿系数。饱和含水率计算公式如公式(1)所示^[26]:

$$\omega = \frac{G_s - G_g}{G_g - G_o} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω 为土壤饱和含水率(%); G_s 为湿土+铝盒的质量(g); G_g 为干土+铝盒的质量(g); G_o 为铝盒的质量(g)。

利用环刀土样浸水饱和后于干燥土样放置 8 h, 得到的土壤含水率为土壤田间持水率, 平行测定结果允许差为 $\pm 1\%$ ^[27]; 毛管断裂含水率大约相当于田间持水率的 65%^[26]; 凋萎系数计算公式^[28]:

$$\theta_w = \frac{G_w - W_g}{W_g} \times 100\% \quad (2)$$

式中: θ_w 为凋萎系数(%); G_w 为凋萎时原状土质量(g); W_g 为干土质量(g)。

吸湿系数是凋萎系数除以 1.5 得到^[6]。土壤容重的测定: 采用环刀法测定, 环刀的体积为 100 cm³。在降雨前取样, 取 0—100 cm 土层容重, 每个小区均取三点样, 用平均值代表小区容重, 在测定同时取土样测定土壤含水量。

总孔隙度: $\rho = 93.947 - 32.995d$ ^[29], d 为土石混合体容重; 毛管孔隙度采用室内环刀原状土吸水法测定; 通气孔隙度为总孔隙度减去毛管孔隙度。

粒径组成分析: 采用马尔文 MS 2000 激光粒度分析仪测定, 土壤质地采用卡庆斯基制分类标准。试验土样经过如下预处理: 加 10% 的 H₂O₂ 10 ml 煮沸至反应平静, 冷却; 加 10% 盐酸 10 ml 煮沸, 注入蒸馏水, 静置一夜。抽去蒸馏水, 洗去过量的盐酸, 反复清洗, 彻底清除酸离子。所有样品在测试前都加入 0.05 N 的六偏磷酸钠溶液, 用超声波进行分散^[30]。

土壤水分特征曲线: 试验利用压力膜仪, 采用饱和和脱湿的方法来得到土体各基质吸力对应的含水率^[20,31]。

1.4 土壤水分特征曲线模型拟合及参数的获取

土壤水分特征曲线是研究土壤持水特性的重要依据之一, 揭示了土壤水的能量指标(基质势)与数量指标(土壤含水率)之间的内在关系。为了准确地表征各种土壤水分特征曲线的特征, 本文采用 V-G 模型来定量研究土壤的持水能力, 公式为^[32]

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (\theta_r \leq \theta \leq \theta_s) \quad (3)$$

其中 $m = 1 - \frac{1}{n}$

式中: θ 为土壤体积含水率(m³/cm³); θ_r 为土壤残余体积含水率(m³/cm³); θ_s 为土壤饱和含水率(m³/cm³); α 是与进气值相关的参数; h 为基质势(cm 水柱); m, n 是土壤水分特征曲线的形状系数, n 的物理意义为土壤含水率随水吸力的增大而降低的快慢, n 越大, 曲线弯曲的弧度越大, 土壤含水率的变化越大^[17]。

本试验选用 vanFit 软件, 根据压力膜仪的试验数据, 通过输入水吸力和含水量值来拟合出 V-G 模型的 4 个独立的未知参数, 并利用 V-G 模型模拟土

壤水分特征曲线^[33]。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件对数据进行初步处理与分析,并采用 SPSS 21.0 软件中单因素方差分析(One-way ANOVA)方法分析剖面土壤质地、土壤容重、孔隙度、含水量及饱和导水率等指标的变化,检验显著性并做多重比较。土壤水分特征曲线参数的获得采用 vanFit 软件,参数间相关分析采用 SPSS 21.0 进行。采用 Auto CAD 软件制图。

2 结果与分析

2.1 原状坡耕地与等高反坡阶处理坡耕地土壤水分常数比较分析

原状坡耕地与等高反坡阶处理下坡耕地各土层土壤水分常数均存在一定的差异(表 1),坡上差异不显著($p>0.05$),坡中差异显著($p<0.05$),坡下差异极显著($p<0.01$)。等高反坡阶处理坡耕地各土层土壤饱和含水率和田间持水率均高于原状坡耕地,坡中 0—100 cm 各土层的土壤饱和含水率为原状坡耕地的 1.018 0~1.181 2 倍,田间持水率为原状坡耕地的 1.009 8~1.231 5 倍;等高反坡阶处理坡耕地坡下 0—100 cm 各土层的土壤饱和含水率分别为原状坡耕地的 1.040 7~1.589 2 倍,田间持水率分别为原状坡耕地的 1.047 1~1.531 0 倍。同一采集点不同深度的土层中,原状坡耕地与等高反坡阶下坡耕地最高田间持水率均出现在 10—20 cm 土层,说明土壤的持水能力在 10—20 cm 土层最高。土壤水的有效性是指土壤水是否可以被植物吸收和利用,以及它的难度,有效水等于田间持水率减去凋萎系数,从同一土层不同坡位的田间持水率与凋萎系数间差异来看,等高反坡阶处理坡耕地均比原状坡耕地的差异小,其中坡中 0—100 cm 各土层中,原状坡耕地的田间持水率与凋萎系数间差异为 9.26%~14.21%,等高反坡阶处理下为 7.91%~13.60%;坡下 0—100 cm 各土层中,原状坡耕地的田间持水率与凋萎系数间差异为 8.16%~13.11%,等高反坡阶处理下为 6.76%~11.06%,这说明在相同土壤吸力下,等高反坡阶处理坡耕地 0—100 cm 各土层土壤持水能力更强。

2.2 土壤持水性与土壤物理性质之间的关系分析

在一定的土壤厚度条件下,土壤持水能力高低取决于土壤容重和孔隙的大小^[34]。土壤水分特征曲线是土壤物理性质的综合表征,如土壤质地,结构和孔隙等^[35]。将坡上、坡中和坡下坡耕地土壤的物理性质取平均值,得到土壤水分特征曲线参数与土壤物理性质的相关关系分析表(表 2),模型参数 θ_r 与模型参数 θ_s, α, n 有着极显著的相关关系($p<0.01$);模型

参数 θ_r 与容重、总孔隙度和毛管孔隙度有极显著的相关关系($p<0.01$),与模型参数 α, n 有极显著的相关关系($p<0.01$);模型参数 α 与容重、毛管孔隙度和砂粒含量有极显著的相关关系($p<0.01$),与总孔隙度和粉粒含量有显著的相关关系($p<0.05$),与模型参数 n 有着极显著的相关关系($p<0.01$);模型参数 n 与容重、毛管孔隙度、砂粒含量和粉粒含量有着极显著的相关关系($p<0.01$)。其中,容重和砂粒含量表现为负相关,总孔隙度、毛管孔隙度和粉粒含量呈正相关。相关分析表明土壤物理因子间存在明显的交互作用,各因子通过共同作用,改变土壤的结构特征,进而影响土壤持水特性。

2.3 布设等高反坡阶对土壤持水性的影响评价

2.3.1 土壤水分特征曲线的模拟 对坡耕地土壤进行处理分析取平均值,各组土样 V-G 模型参数的拟合值及决定系数见表 3。从拟合结果可以看出,土壤水分特征曲线的相关系数均在 0.85 以上,表明原状对照坡耕地与等高反坡阶处理坡耕地不同土层土壤水分特征曲线拟合的数据和试验数据相关性较好,但拟合精度存在差异。就表层土壤(0—10 cm)来看,V-G 模型对原状坡耕地的拟合精度相对较低, R^2 为 0.880 7,而等高反坡阶处理坡耕地拟合效果较好, R^2 达到 0.952 4。对于深层土壤剖面(60—100 cm),原状坡耕地拟合效果较好, R^2 分别为 0.993 1,0.997 8,等高反坡阶处理坡耕地的 R^2 为 0.952 6,0.924 8,拟合精度相对较低。就 0—100 cm 土层来看,原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地的 n 值均在 10—20 cm 土层最大,原状坡耕地的 n 值为 1.719 6,等高反坡阶处理坡耕地的 n 值为 1.773 5,表明土壤在 10—20 cm 土层的土壤含水率变化大,且等高反坡阶处理坡耕地的土壤含水率变化大于原状坡耕地。

2.3.2 原状坡耕地与等高反坡阶处理坡耕地土壤持水性比较分析 原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地土壤水分特征曲线中(图 2),土壤含水率随水吸力增加的变化趋势具体表现为:在低吸力阶段(0~0.1 MPa),土壤水分特征曲线弯曲弧度大,随着水吸力的增加,土壤含水率迅速下降,此时土壤水主要由大孔隙排出,排水量较大;当水吸力增加到 0.1~1.0 MPa 时,土壤水分特征曲线弯曲度减小,土壤含水率降速减缓,此时,土壤水主要由中小孔隙排出;当水吸力在 1.0~1.5 MPa 时,土壤水分的变化趋于平缓,逐渐稳定。在低吸力范围内,土壤水分释放能力主要取决于土壤中的大孔隙;高吸力下的土壤持水量主要取决于土壤吸附力,因此相应的土壤含水率与较小孔隙和土壤颗粒的比表面积有关^[17,36]。从图 2 中可以看出,

不同土层土壤体积含水率均随着土壤水吸力的增加逐渐减小,其减小的幅度呈现先大后小的趋势。各采样点土壤水分特征曲线的形状虽基本相似,但在同一吸力下,不同土层土壤体积含水率间有差异,在同一土壤体积含水率下,不同土层土壤吸力值也存在差别。原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地均在 10—20 cm 土层的

土壤体积含水率变化最大,在 15%~25%,释水性好,降水后水分向内传导快,等高反坡阶处理坡耕地土壤体积含水率变化相对更大,降水后水分向内传导更快。在低吸力阶段,表层土壤(0—20 cm)的土壤体积含水率大于其他土层,这可能与表层土壤的孔隙度较大有关,表层土壤疏松多孔,释水速度快。

表 1 原状与等高反坡阶处理坡耕地不同土层土壤水分常数

采样点	土层/cm	饱和含水率	田间持水率	毛管断裂含水率	凋萎系数	吸湿系数	
原状坡耕地	坡上	0—10	0.3737b	0.2041d	0.1327c	0.0551d	0.0367d
		10—20	0.4001a	0.2350b	0.1528b	0.1340b	0.0893b
		20—40	0.3115c	0.2126c	0.1382c	0.0817c	0.0545c
		40—60	0.3002d	0.2052d	0.1334c	0.0849c	0.0566c
		60—80	0.2944e	0.1950e	0.1268d	0.0815c	0.0543c
		80—100	0.2985e	0.2534a	0.1647a	0.1465a	0.0977a
	坡中	0—10	0.3768b	0.2035b	0.1323b	0.0614d	0.0409c
		10—20	0.3969a	0.2466a	0.1603a	0.1540a	0.1027a
		20—40	0.3002c	0.2058b	0.1338b	0.0750c	0.0500b
		40—60	0.2944d	0.2043b	0.1328b	0.0859b	0.0573b
		60—80	0.2860e	0.1933c	0.1256c	0.0834b	0.0556b
		80—100	0.2901d	0.2470a	0.1606a	0.1533a	0.1022a
	坡下	0—10	0.3883b	0.2059c	0.1338c	0.0748d	0.0499d
		10—20	0.4421a	0.2495a	0.1622a	0.1663a	0.1109a
		20—40	0.2751f	0.1469e	0.0955e	0.0295f	0.0197f
		40—60	0.3140d	0.1411e	0.0917e	0.0406e	0.0271e
		60—80	0.2857e	0.1828d	0.1188d	0.0895c	0.0597c
		80—100	0.3309c	0.2321b	0.1509b	0.1505b	0.1003b
	坡上	0—10	0.3731b	0.2022d	0.1314c	0.0544e	0.0363c
		10—20	0.4440a	0.2378b	0.1546b	0.1370b	0.0913a
		20—40	0.3090d	0.2114c	0.1374c	0.0792d	0.0528b
		40—60	0.3155c	0.2055d	0.1336c	0.0855c	0.0570b
		60—80	0.2937e	0.1947e	0.1266d	0.0825c	0.0550b
		80—100	0.2805f	0.2518a	0.1637a	0.1444a	0.0963a
等高反坡阶 处理坡耕地	坡中	0—10	0.3836b	0.2143c	0.1393d	0.0783d	0.0522d
		10—20	0.4469a	0.3037a	0.1974a	0.2246a	0.1497a
		20—40	0.3546c	0.2188c	0.1422c	0.0976c	0.0651c
		40—60	0.3276d	0.2075d	0.1349d	0.0926c	0.0617c
		60—80	0.2988e	0.1952e	0.1269e	0.0990c	0.0660c
		80—100	0.2997e	0.2762b	0.1795b	0.1847b	0.1231b
	坡下	0—10	0.4041c	0.2156d	0.1401c	0.1050e	0.0700d
		10—20	0.5021a	0.3086a	0.2006a	0.2401a	0.1607a
		20—40	0.4372b	0.2249c	0.1462c	0.1242c	0.0828c
		40—60	0.3286d	0.2109d	0.1371d	0.1122d	0.0748d
		60—80	0.3044e	0.1976e	0.1284e	0.1219c	0.0813c
		80—100	0.4090c	0.2892b	0.1880b	0.2185b	0.1457b

注:表中同列不同字母表示不同坡位土层间的差异显著($p<0.05$)。

原状坡耕地土壤水分特征曲线中(图 2A),当土壤水吸力增加时,10—20 cm 土层最易释水,20—40 cm 土层最难释水,这说明 10—20 cm 土层单位基质的变化引起含水率变化最大,20—40 cm 最小,即

表明 10—20 cm 土层供水性较好,而 20—40 cm 土层持水能力强,供水性较差。从图 2B 等高反坡阶处理坡耕地土壤水分特征曲线可以看出,当土壤水吸力增加时,10—20 cm 土层最易释水,40—60 cm 土层最

难释水,这说明 10—20 cm 土层单位基质势的变化引起含水率变化最大,40—60 cm 最小,即表明 10—20 cm 土层供水性较好,而 40—60 cm 土层持水能力强,供水性较差。

表 2 模型参数与土壤物理性质相关系数矩阵

系数	θ_r	θ_s	α	n	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	通气孔隙	砂粒 (1~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.001 mm)	黏粒 (<0.001 mm)
θ_r	1										
θ_s	0.522 **	1									
α	0.748 **	0.593 **	1								
n	0.695 **	0.396 **	0.859 **	1							
容重	-0.082	-0.372 **	-0.508 **	-0.444 **	1						
总孔隙度	-0.126	0.486 **	0.309 *	0.276	-0.807 **	1					
毛管孔隙度	0.103	0.578 **	0.454 **	0.425 **	-0.365 *	0.679 **	1				
通气孔隙度	-0.224	0.271	0.121	0.096	-0.831 **	0.879 **	0.248	1			
砂粒(1~0.05 mm)	-0.134	-0.014	-0.384 **	-0.569 **	0.797 **	-0.470 **	-0.132	-0.535 **	1		
粉粒(0.05~0.001 mm)	0.118	0.001	0.362 *	0.555 **	-0.782 **	0.454 **	0.120	0.522 **	-0.999 **	1	
黏粒(<0.001 mm)	-0.273	-0.332	-0.384	-0.260	0.394 **	-0.290 *	-0.164	-0.281	0.173	-0.167	1

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。

表 3 V-G 模型土壤水分特征曲线拟合参数

采样点	土层/cm	θ_r	θ_s	α	n	R^2
原状坡	0—10	0.0168	0.2065	6.6366	1.0822	0.8807
	10—20	0.0437	0.2145	9.7466	1.7196	0.8561
	20—40	0.0827	0.1602	1.3956	1.0191	0.9226
	40—60	0.0038	0.1863	0.6775	1.0247	0.9841
	60—80	0.0052	0.1697	0.2744	1.0287	0.9931
等高反坡阶处理坡耕地	80—100	0.0311	0.1889	0.084	1.0801	0.9978
	0—10	0.0124	0.2118	1.8005	1.0317	0.9524
	10—20	0.0556	0.2478	10.4103	1.7735	0.9036
	20—40	0.0341	0.1847	1.4154	1.0155	0.9222
	40—60	0.0094	0.1654	6.7454	1.5339	0.9186
处理坡耕地	60—80	0.0226	0.1753	6.0991	1.4511	0.9526
	80—100	0.0214	0.2188	6.1045	1.0857	0.9248

3 讨论

本研究中,原状坡耕地与等高反坡阶处理坡耕地土壤水分常数有一定的差异,坡上差异不显著($p>0.05$),坡中差异显著($p<0.05$),坡下差异极显著($p<0.01$),说明布设等高反坡阶对坡下部影响显著。试验还表明,土壤的持水特性与土壤水分常数密切相关,土壤水分常数对土壤的有效含水率起决定性作用,它能够直接反映出土壤的持水能力和供水能力。这与俞建荣等^[6]、杨绪等^[26]研究结果一致,说明土壤水分有效性低,土壤水吸力大于植物根吸力,则土壤供水性能差,植物难以吸收土壤中水分;反之,土壤水分有效性高,则有利于作物的吸收。布设等高反坡阶改善了土壤结构,增加土壤毛管孔隙度,提高土壤水分的有效性,以保证作物能够吸取土壤中有效的水分。

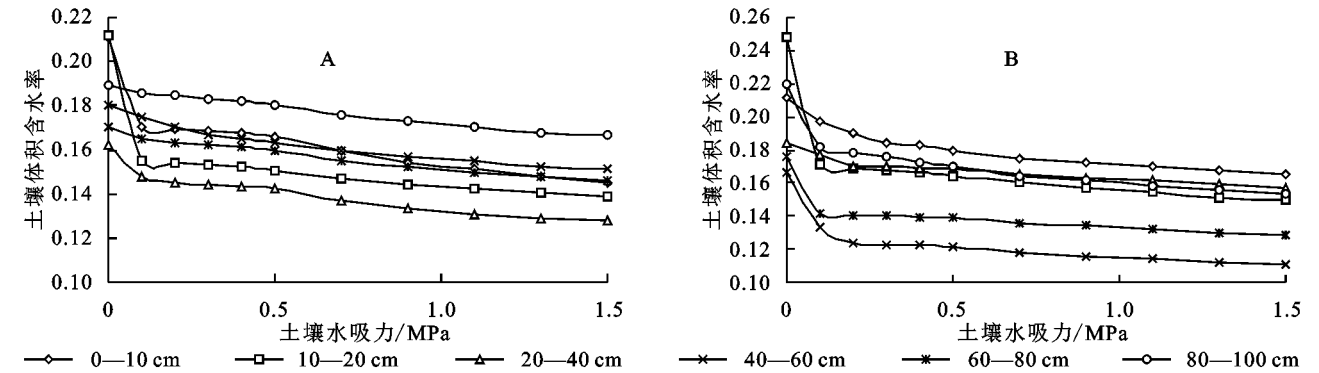


图 2 原状坡耕地(A)与等高反坡阶处理(B)不同土层土壤水分特征曲线

坡耕地土壤水分特征曲线存在一定的差异,主要取决于土壤质地,土壤结构和孔隙等土壤物理性质,这是因为土壤持水特性受土壤孔隙毛管引力和土壤颗粒分

子引力的影响^[26]。V-G 模型参数 θ_s 与容重、总孔隙度和毛管孔隙度有极显著的相关关系($p<0.01$),模型参数 α 与容重、毛管孔隙度和砂粒含量有极显著的相关关系

($p < 0.01$),与总孔隙度和粉粒含量有显著的相关关系($p < 0.05$),模型参数 n 与容重、毛管孔隙度、砂粒含量和粉粒含量有着极显著的相关关系($p < 0.01$),说明 V-G 模型参数与土壤质地、结构和孔隙度密切相关。其中,容重和砂粒含量表现为负相关,总孔隙度、毛管孔隙度和粉粒含量呈正相关。布设等高反坡阶通过改善土壤结构、减低土壤容积密度和增加土壤毛管孔隙度等物理特性对土壤水分和持水性产生作用,布设等高反坡阶对土壤持水性具有显著的控制作用,可减缓土壤水分流失。Hudson^[37]研究表明土壤含水率与土壤中的砂粒、粉粒、黏粒含量及土壤体积质量密切相关。牛晓彤等^[17]认为土壤水分特征曲线实际反映的是土壤孔隙状况和土壤含水率之间的关系,孔隙的形态和分布对于土壤水分运动和溶质迁移产生直接影响,这些研究均与本研究结果一致。

本文采用 V-G 模型对滇中松华坝水源区坡耕地土壤水分特征曲线进行了拟合,结果表明模型拟合曲线和实测数据吻合较好,证明 V-G 模型能够较好地模拟土壤体积含水率与土壤水吸力之间的关系。李彬楠等^[38]、王红兰等^[39]、霍丽涛等^[40]研究表明 V-G 模型对土壤水分特征曲线有较好的拟合效果,与本研究结果一致。研究发现松华坝水源区坡耕地土壤的含水率随土壤水吸力的增加逐渐减小,其减小的幅度呈现先大后小的趋势,在吸力约 0.1 MPa 以前下降剧烈,之后则较缓。其原因是在低土壤吸力时,土壤所能保持或释放出来的水量取决于较粗孔隙的分布,施加较小压力,大孔隙中的水即被排出,因此土壤水分特征曲线都比较陡直;而随着土壤水吸力的增加,保持在中小孔隙中的水分缓慢释出,因此此时土壤水分特征曲线逐渐趋于平缓,这与杨绪等^[26]的研究结果一致。原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地均在 10—20 cm 土层的土壤体积含水率变化最大,在 15%~25%,原状坡耕地的 n 值为 1.719 6,等高反坡阶处理坡耕地的 n 值为 1.773 5,表明等高反坡阶处理坡耕地的土壤含水率变化大于原状坡耕地,释水性更好,降水后水分向内传导更快。原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地均在 10—20 cm 土层供水性较好,等高反坡阶处理坡耕地在 40—60 cm 土层持水能力强,而原状坡耕地在 20—40 cm 土层持水能力强。等高反坡阶处理坡耕地土壤的保水效果好于原状坡面,等高反坡阶具有拦蓄地表径流和再分配的功能,有效的改良了土壤结构。

综上,等高反坡阶处理对坡耕地土壤的保水性能具有明显的提高作用,对坡耕地地表径流拦蓄、增加水分入渗和减少土壤流失起到了明显的改善作用。

等高反坡阶不仅具有很好的保墒保水功能,且操作简便、占用耕种面积小,其应用价值应该大力推广。小流域是滇中地区综合治理的基本单元,将来应集中于小流域尺度土壤水分特征曲线的空间变异研究,这将有利于理解小流域尺度的生态水文过程及小流域水土资源管理。

4 结论

(1) 布设等高反坡阶后土壤水分常数存在一定的差异,坡上差异不显著($p > 0.05$),坡中差异显著($p < 0.05$),坡下差异极显著($p < 0.01$);相同土壤吸力下,等高反坡阶处理坡耕地 0—100 cm 各土层土壤持水能力更强。

(2) 土壤物理因子间存在明显的交互作用,各因子共同作用,改变土壤的结构特征,进而影响土壤持水特性;与土壤水分特征曲线参数的相关关系中,容重和砂粒含量表现为负相关,总孔隙度、毛管孔隙度和粉粒含量呈正相关。

(3) 用 V-G 模型拟合坡耕地土壤的水分特征曲线,决定系数 R^2 均高于 0.85,模型可靠性较高;原状坡耕地(1.719 6)和等高反坡阶处理坡耕地(1.773 5)的 n 值均在 10—20 cm 土层最高,等高反坡阶处理坡耕地的土壤含水率变化大于原状坡耕地。

(4) 不同土层土壤体积含水率均随着土壤水吸力的增加逐渐减小,其减小的幅度呈现先大后小的趋势;原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地均在 10—20 cm 土层供水性较好,等高反坡阶处理坡耕地在 40—60 cm 土层持水能力强。

参考文献:

- [1] 张芳枝,梁志松,周秋娟.非饱和土性状及其边坡稳定性[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [2] Rahimi A, Rahardjo H, Leong E C. Effects of soil-water characteristic curve and relative permeability equations on estimation of unsaturated permeability function [J]. Soils & Foundations, 2015, 55(6):1400-1411.
- [3] Tavakoli D M H, Habibagahi G, Nikooee E. Effect of confining stress on soil water retention curve and its impact on the shear strength of unsaturated soils [J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(5):1-11.
- [4] 潘成忠,上官周平,黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J].农业工程学报,2003,19(6):5-9.
- [5] 冉艳玲,王益权,张润霞,等.保水剂对土壤持水特性的作用机理研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):101-107.
- [6] 俞建荣.我国不同生态类型烟区土壤持水性能及水分有效性研究[D].南京:河海大学,2007.
- [7] 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.
- [8] Gardner W R. Field measurement of soil water diffusivity [J]. Proceedings Soil Science Society of America, 1970,34(5):832-833.
- [9] 邹朝望,薛绪掌,张仁铎.基于两组负水头入渗数据推求 Brooks-Corey 模型中的参数[J].农业工程学报,2006,22(8):1-6.
- [10] Fredlund D G, Xing A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994,31(4):521-532.
- [11] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [12] Ghanbarian-Alavijeh B, Liaghat A, Huang G H, et al. Estimation of the Van Genuchten soil water retention properties from soil textural data [J]. Pedosphere, 2010,20(4):456-465.
- [13] Lei W J, Tang X Y, Reid B J, et al. Spatial distribution of soil hydraulic parameters estimated by pedo-transfer functions for the Jialing River Catchment, Southwestern China [J].山地科学学报:英文,2016,13(1):29-45.
- [14] Wang Y, Shao M, Han X, et al. Spatial Variability of Soil Parameters of the van Genuchten Model at a Regional Scale [J]. Clean-Soil Air Water, 2015, 43(2):271-278.
- [15] 来剑斌,王全九.土壤水分特征曲线模型比较分析[J].水土保持学报,2003,17(1):137-140.
- [16] Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W. Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties [C] // 3 Rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Rio De Janeiro, Brazil, 1997:13-23.
- [17] 牛晓彤,刘目兴,易军,等.三峡山地土壤水分特征曲线及模型拟合[J].灌溉排水学报,2017,36(9):75-80.
- [18] 李兴,勾芒芒,屈忠义,等.生物炭对沙壤土水分特征的影响[J].江苏农业科学,2018,46(12):280-283.
- [19] 赵文娟,李春光,梁晨曦.宁夏银北非饱和盐渍土水分特征曲线拟合研究[J].人民黄河,2014,36(1):92-94.
- [20] Simunek J, Genuchten M T V. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from multiple tension disc infiltrometer data [J]. Soil Science, 1997,162(6):383-398.
- [21] 赵春雷,邵明安,贾小旭.黄土高原北部坡面尺度土壤饱和和导水率分布与模拟[J].水科学进展,2014,25(6):806-815.
- [22] Heli Z, Dingsheng J, Xingke F. Effect of different soil and water conservation measures to rainfall redistribution on slope [J]. Research of Soil & Water Conservation, 1996,3(2):75-83.
- [23] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.等高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):39-45.
- [24] 华锦欣,王克勤,张香群,等.等高反坡阶对坡耕地土壤水分空间分布的影响:以昆明松花坝水源区为例[J].人民长江,2016,47(1):11-14.
- [25] 陈敏全,王克勤.等高反坡阶对坡耕地土壤碳库的影响[J].水土保持通报,2015,35(6):41-46.
- [26] 杨绪,赵廷超,王丰,等.基于 Gardner 模型的黔西南土壤水分特征分析[J].灌溉排水学报,2018,37(7):35-42.
- [27] 王修康,戚兴超,刘艳丽,等.泰山山前平原 3 种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响[J].自然资源学报,2018,33(1):63-74.
- [28] 邹文安,姜波,顾李华.土壤水分常数的测定[J].水文,2015,35(4):62-66.
- [29] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室编.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
- [30] 程鹏,高抒,李徐生.激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J].沉积学报,2001,19(3):449-455.
- [31] 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.
- [32] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [33] 赵世平,刘建生,杨改强,等.粒径对土壤水分特征曲线的影响研究[J].太原科技大学学报,2008,29(4):332-334.
- [34] 韩国君,陈年来,黄海霞,等.钾肥类型与施用量对土壤持水特性的影响[J].干旱区资源与环境,2013,27(6):26-29.
- [35] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J].农业机械学报,2014,45(6):161-165.
- [36] 程冬兵,张平仓,赵健,等.三峡库区不同水保措施下紫色土水分特征曲线特征及模型拟合[J].长江流域资源与环境,2009,18(11):1045-1049.
- [37] Hudson B D. Soil organic matter and available water capacity[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1994,49(2):189-194.
- [38] 李彬楠,樊贵盛.基于灰色理论-BP 神经网络方法的土壤水分特征曲线预测模型[J].干旱区资源与环境,2018,32(7):166-171.
- [39] 王红兰,唐翔宇,宋松柏.土壤水分特征曲线测定中低吸力段数据的影响分析[J].灌溉排水学报,2012,31(6):56-59.
- [40] 霍丽涛,唐啸宇,郗志红,等.新型液态土壤调理剂对土壤持水特性的影响[J].河北农业大学学报,2018,41(3):112-116.