

DOI: 10.5846/stxb201801150108

于洋, 王伟, 陈利顶, 冯天骄, 杨磊, 陈蝶. 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. 生态学报, 2018, 38(18): - .

Yu Y, Wei W, Chen L D, Feng T J, Yang L, Chen D. Simulation of a soil water retention curve of typical soil and water conservation engineering measures in the Loess hilly watershed. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

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

于洋^{1,2,3}, 王伟^{2,*}, 陈利顶², 冯天骄^{2,5}, 杨磊², 陈蝶^{2,4}

1 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 水利部水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100048

4 中国科学院大学, 北京 100049

5 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871

摘要:开展工程措施进行植被恢复是防治水土流失的有效方式。在黄土高原半干旱小流域, 工程措施能够利用有限的降水资源, 促进植被恢复。以甘肃定西龙滩小流域典型水土保持工程措施鱼鳞坑和反坡台为研究对象, 采用配对实验设计, 在实测土壤水分特征曲线基础上, 分别利用 Brooks-Corey、Gardner 和 vanGenuchten 模型对不同工程措施的土壤水分特征曲线进行模拟。研究结果发现: 反坡台(10.63%)、鱼鳞坑(9.78%)粘粒含量显著高于对照样地(9.66%), 粉粒含量反坡台(71.42%)与鱼鳞坑(70.74%)显著高于对照样地(67.85%)。较之对照样地, 反坡台和鱼鳞坑饱和导水率分别提高 53.5% 和 46.9%。3 种模型均能很好的拟合不同工程措施土壤水分特征曲线。较之对照, 工程措施长期开展后, 鱼鳞坑和反坡台的土壤有效水分分别提高 15% 和 9%, 且对表层土壤水分有效性的改善更为显著。

关键词:工程措施; 水分特征曲线; 鱼鳞坑; 反坡台

Simulation of a soil water retention curve of typical soil and water conservation engineering measures in the Loess hilly watershed

YU Yang^{1,2,3}, WEI Wei^{2,*}, CHEN Lidong², FENG Tianjiao^{2,5}, YANG Lei², CHEN Die^{2,4}

1 State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environment Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Research Center on Soil and Water Conservation of the Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

5 Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Soil and water conservation engineering is an effective measure to prevent water loss. In the semi-arid watershed of the Loess Plateau, reasonable soil and water engineering development can utilize the limited precipitation, thus promoting vegetation restoration. In the current study, typical soil and water engineering (e.g., fish scale pits and adversely graded tableland) in a small watershed located in Dingxi City, Gansu Province were selected, and natural slope with the same vegetation served as a control. Soil samples at each site were collected from depths of 0—20, 20—40, 40—60, and 60—80

基金项目:国家自然科学基金项目(41501091, 41371123), 中国科学院青年创新促进会项目, 中国科协青年人才托举工程(2017-2019)项目, 中国水科院基本科研业务费项目(SE0145C082017)

收稿日期: 2018-01-15; 修订日期: 2018-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

cm. Soil particle size distribution was analyzed. Soil water retention curves were monitored and simulated by Brooks-Corey, Gardner and van-Genuchten models. The results indicated that, the effects of soil and water conservation engineering on soil particle size distribution varied with soil depth. For the soil particle size distribution, the clay content of adversely graded tableland (10.63%) and fish scale pits (9.78%) was significantly higher than that of the control (9.66%). Meanwhile, the silt content of adversely graded tableland (71.42%) and fish scale pits (70.74%) also was significantly higher than that of the natural slope (67.85%). Compared with control, soil saturated hydraulic conductivity can be improved by 53.5% and 46.9% in the adversely graded tableland and fish scale pits, respectively. The Brooks-Corey, Gardner, and van Genuchten model can well fit the soil water retention curve of different soil and water engineering approaches. Compared with control, soil available water in adversely graded tableland and in fish scale pits can be increased by 15% and 9%, respectively. The effects of soil and water engineering on the soil available water in the surface soil layer were more pronounced after long-term implementation of soil and water engineering.

Key Words: soil and water engineering; soil water retention curve; fish scale pits; adversely graded tableland.

水分是影响干旱半干旱生态系统植被恢复和生态建设的主要因素。在黄土高原半干旱小流域,为了实现有限水资源的高效利用,工程措施广泛应用于植被建设,工程措施的开展也被认为是流域减流减沙的主要手段^[1-3]。工程措施一方面通过改变径流路径,实现地表径流就地拦蓄,另一方面,通过改变微地形减少土壤蒸发面积,有效保持土壤水分^[4]。由于土壤中的水分并不能被植物全部利用,植被生长能够直接利用的部分为有效水,当土壤基质势高于植物体内基质势时,水分从土壤进入植物体,反之水分保留于土壤中,植物无法利用。水分特征曲线是用于描述不同基质势下土壤能够保留水分含量的曲线。水土保持工程措施的主要功能就是充分利用有限的水分以维系植被生长,那么在利用工程措施进行植被恢复的背景下,工程措施是否能提高植被对有效水分的利用?采用配对样地实验的办法,通过分析土壤水分特征曲线,对工程措施下植被有效水的体积质量与相同植被类型的自然坡面进行对比,是评价工程措施改良立地环境的有效途径。

水分特征曲线能够描述土壤水分能量和数量之间的关系,其可以用于研究土壤水分有效性和供水体积质量的大小,对研究土壤水的滞留与运移有重要作用。当前,描述土壤水分特征曲线的经验公式较多,比如 Brooks-Corey 模型(1964)、Gardner 模型(1970)、Campbell 模型(1974)以及 van Genuchten 模型(1980)等^[5-6];人们基于不同模型在诸多生态系统开展了土壤水动力学的相关研究,并通过对模型的参数进行求解来分析参数的空间变异性^[7-12]。受土壤自身理化性质的变化以及外界因素的影响,土壤有效水分也会发生改变。在黄土高原,人们对不同土壤质地以及不同土地利用方式下的土壤水力学特性进行了报道,揭示了影响水分特性变异的主要因素^[13-14]。工程措施改变了坡面原始下垫面结构,在改变径流路径的同时影响颗粒物的搬运和堆积,但围绕工程措施与植被长时间耦合条件下的土壤水分特征曲线模拟以及工程措施如何提高土壤有效水分,相关研究较少。基于此,本研究通过实测水分特征曲线,并与经验模型相结合进行水分特征曲线模拟,以探讨不同水土保持工程措施对土壤有效水分的影响,并为评价工程措施在植被恢复过程中的保持水土功能提供依据。

1 研究区概况

研究区地处甘肃定西龙滩流域(104°27'—104°31' E, 35°43'—35°46' N),流域面积 16.1 km²,海拔 1840—2260 m,多年平均降水量 386.3 mm,属于典型半干旱黄土丘陵区,降水量季节分配不均,春季降水较为稀少,主要集中在 7—9 月份。流域年均气温为 6.8 °C,平均无霜期 152 d,潜在蒸发量为 1649.0 mm,年均相对湿度 72%。流域土壤类型为黄绵土,土质均一。流域内主要土地利用类型包括撂荒地、灌木林地、乔木林地、农地、人工草地。同时分布着零星的天然草地。流域内的人工植被以柠条(*Caragana korshinskii*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、山杏(*Prunus armeniaca*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)为主,天然植被则

以多年生草本为主,主要种类包括赖草 (*Leymus secalinus*)、长芒草 (*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)等。自 20 世纪 50 年代起,流域内开展了大面积植被恢复工程,取得了较好的生态效益。水平沟、水平阶、鱼鳞坑、反坡台等水土保持工程措施广泛应用于植被建设,其中鱼鳞坑、反坡台两类工程措施的应用已有四十多年的历史,采用水平沟、水平阶两类工程措施进行植被恢复的时间也有二十年以上,并采用人工植被柠条、侧柏、油松、山杏与不同工程措施相结合进行植被恢复,形成了人工植被与工程措施相结合的建设体系。

2 研究方法

2.1 试验地基本特征

于 2015 年生长季(5 月—10 月),以流域内开展植被恢复时间最长的油松鱼鳞坑和油松反坡台为研究对象(1972 年始建),同时以油松自然坡面样地为对照,采用微创式零干扰小区搭建技术布设油松鱼鳞坑和油松反坡台监测小区(图 1),搭建完毕后进行土壤样品的采集,并采用每木检尺对植被进行调查,记录不同植被的树高、胸径和冠幅,试验地基本特征见表 1。

表 1 试验地基本特征

Table 1 General situation of the experimental site

工程措施 Engineering measures for soil and water conservation	反坡台 Adversely graded tableland	鱼鳞坑 Fish scale pits	对对照样地 Control plot
植被 Vegetation	油松	油松	油松
林龄 Stand age	1972	1972	
树高/mHeight	5.71±0.41	5.98±0.53	5.04±0.48
胸径/cmDBH	8.71±0.49	8.97±0.98	8.35±1.71
地表植被 Vegetation coverage	中华隐子草 (<i>Cleistogenes chinensis</i>) 长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) 阿尔泰狗娃花 (<i>Heteropappus altaicus</i>)	中华隐子草 (<i>Cleistogenes chinensis</i>) 阿尔泰狗娃花 (<i>Heteropappus altaicus</i>)	长芒草 (<i>Stipa bungeana</i>) 阿尔泰狗娃花 (<i>Heteropappus altaicus</i>)
冠层郁闭度 Canopy	0.3	0.45	0.3
工程措施描述 Specification of engineering measures	将 1.0—1.5 m 长的坡面径流集中到 1.5—2.0 m 的台面,反坡 5—8°	鱼鳞坑直径宽度高度分别为 130 cm, 80 cm 和 35 cm	

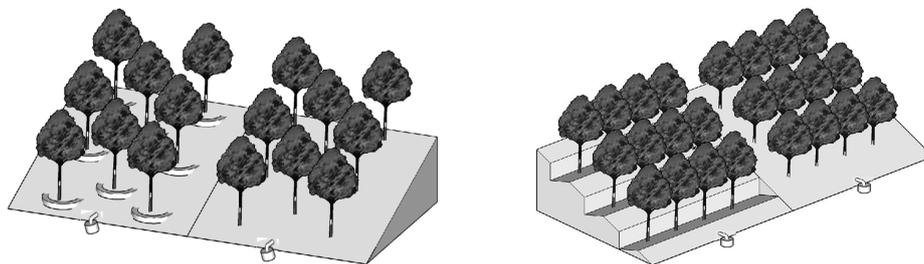


图 1 鱼鳞坑、反坡台及对对照样地示意图

Fig.1 Diagram of fish scale pits, adversely graded tableland and control site

2.2 土壤水分特征曲线测定

野外样品采样通过剖面法进行,分别在油松鱼鳞坑和油松反坡台坡面小区挖 2 m 长、1.5 m 宽、1 m 深的剖面,按 0—20、20—40、40—60 和 60—80 cm 分层取样,每层重复 3 次。采用沙箱法和压力膜法测定土壤水分特征曲线,其中沙箱测定范围为 0—80 cm 水柱,将装有土样的环刀放置砂箱中,测完基质势为 -80 cm 时将

环刀取出。然后将环刀土置于压力板上,进行 24 h 饱和后放入压力锅中由低压到高压依次进行脱水测试,每次加压后至水不再流出时即达到平衡。平衡后取出土样,迅速称重,再将土样重新装入压力室内。重复上述过程,直至最后一个压力,取出土样后用烘干法测其土壤含水量,通过计算得到土壤体积含水量与土壤基质势的关系^[15]。

2.3 水分特征曲线模型选取

Brook-Corey 模型、Gardner 模型和 van Genuchten 模型是国内外学者较常使用且拟合较好的土壤水分特征曲线模型,3 种模型均可通过多元非线性回归的方式求解参数值。模型的表现形式如下:

$$\text{Brook-Corey:} \quad \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{hd}{h} \right)^N$$

$$\text{Gardner:} \quad h = a\theta^{-b}$$

$$\text{Van Genuchten:} \quad \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^m \quad m = 1 - 1/n$$

式中, θ 为土壤容积含水率%(cm^3/cm^3); θ_r 为滞留含水率%(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水率%(cm^3/cm^3); h 为土壤水吸力 MPa; h_d 为土壤进气吸力 Mpa; a, b, N, α, n, m 为拟合参数。

2.4 数据处理

土壤饱和和导水率采用 RETC 软件通过实测机械组成及土壤容重计算而得。采用 SAS9.2 对不同工程措施下土壤水分特征曲线模型进行非参数求解,采用混合线性模型分析不同工程措施土壤机械组成与饱和和导水率。相关数据采用平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)的方式来表示,同一深度不同工程措施之间显著性采用最小显著差数法(LSD)进行检验(显著性水平 $P < 0.05$),绘图采用 Sigmaplot12.5 完成。

3 结果与分析

3.1 土壤机械组成

油松鱼鳞坑、油松反坡台及对照样地土壤机械组成变化见表 2,由表可知,不同工程措施土壤机械组成之间差异显著($P < 0.05$),且不同深度表现不同。具体来说,在 0—20 cm,油松反坡台土壤粘粒(11.58%)、粉粒含量(73.48%)显著高于油松鱼鳞坑(9.73%、68.45%)以及坡面对照(9.71%、67.99%),但油松鱼鳞坑与对照

表 2 不同工程措施土壤粒径分布

Table 2 Soil particles size distribution of different engineering measures

工程措施/深度/cm Engineering measures for soil and water conservation/Depth	粘粒 (<2 μm) % Clay	粉粒 (2—50 μm) % Silt	沙粒 (50—2000 μm) % Sand
鱼鳞坑			
0—20	9.73 \pm 1.40abB	68.45 \pm 1.87aB	21.83 \pm 3.27aB
20—40	9.86 \pm 1.28aB	71.61 \pm 1.72bA	18.55 \pm 2.14bA
40—60	9.95 \pm 1.68aB	72.52 \pm 2.08bA	17.54 \pm 2.3bB
60—80	9.60 \pm 1.43bA	70.39 \pm 2.93abA	20.00 \pm 3.68abB
反坡台			
0—20	11.58 \pm 0.49aA	73.48 \pm 2.29aA	14.93 \pm 2.75aA
20—40	10.85 \pm 1.03abA	71.73 \pm 1.62bA	17.43 \pm 2.24bA
40—60	10.26 \pm 0.79bcA	70.54 \pm 0.87bA	19.21 \pm 1.28bB
60—80	9.85 \pm 0.28cA	69.94 \pm 0.64bA	20.22 \pm 0.79bB
对照样地			
0—20	9.71 \pm 0.82aB	67.99 \pm 2.11abB	22.29 \pm 2.77aB
20—40	9.57 \pm 0.71aC	68.60 \pm 2.31aB	21.53 \pm 2.87aB
40—60	9.76 \pm 0.52aC	67.29 \pm 1.85bB	22.70 \pm 2.35aA
60—80	9.60 \pm 0.53aA	67.53 \pm 2.18bB	22.27 \pm 3.20aA

不同小写字母表示同一工程措施不同深度之间差异显著,不同大写字母表示同一深度不同工程措施之间差异显著,数值表现为平均值 \pm 标准差。

样地之间粘粒含量之间差异不显著($P>0.05$),同时,两者粉粒含量显著高于坡面对照($P<0.05$)。20—40 cm, 鱼鳞坑(71.61%)和反坡台(71.73%)粘粒含量显著高于对照(68.60%),同时,粉粒含量两者均显著高于对照($P<0.05$),但两者之间无显著差异($P>0.05$)。40—60 cm, 鱼鳞坑(72.52%)和反坡台(70.54%)之间粉粒含量无显著差异($P>0.05$),但两者显著高于对照(67.29%)。粘粒含量反坡台(10.26%)显著高于鱼鳞坑(9.95%),同时两者均显著高于对照(9.76%)。

3.2 饱和导水率

油松鱼鳞坑、油松反坡台和坡面对照之间土壤饱和导水率差异显著($P<0.05$),不同深度表现不同(图2)。具体来说,0—20 cm 鱼鳞坑和反坡台饱和导水率无显著差异($P>0.05$),但两者均显著高于坡面对照($P<0.05$),这也与 20—40 cm 相同。油松鱼鳞坑在 40—80 cm 与对照之间饱和导水率不显著($P>0.05$),60—80 cm 三者之间饱和导水率无显著差异($P>0.05$)。

3.3 土壤水分特征曲线模拟

分别使用三种土壤水分特征曲线模型对油松不同工程措施土壤水分特征曲线进行参数拟合,得到每个模型参数的模拟值以及判别系数(表3),根据不同模型的拟合结果,可知不同工程措施不同深度,各模型拟合结果并不一致。由表3可知,对于油松鱼鳞坑来说, van Genuchten 模型在 0—20、20—40 cm 和 40—60 cm 深度的模拟精度较好,判别系数分别为 0.950、0.927 和 0.898, Gardner 模型对 60—80 cm 深度的模拟精度高于其他两组模型,对油松反坡台来说, Gardner 模型对 40—60 cm 的模拟精度高于其他两组模型,除 40—60 cm 外, van Genuchten 模型的模拟精度均高于 0.900。由此可知,3 种模型均能够很好的拟合不同工程措施土壤水分特征曲线。此外,通过对不同工程措施实测值与模型模拟的拟合结果进行比较(图3、图4 和图5),具体反映在曲线上可表现为低吸力条件下曲线比较陡直,在中高吸力段区间内的曲线渐趋平缓。与坡面对照相比,鱼鳞坑和反坡台表现出较好的保水功能。

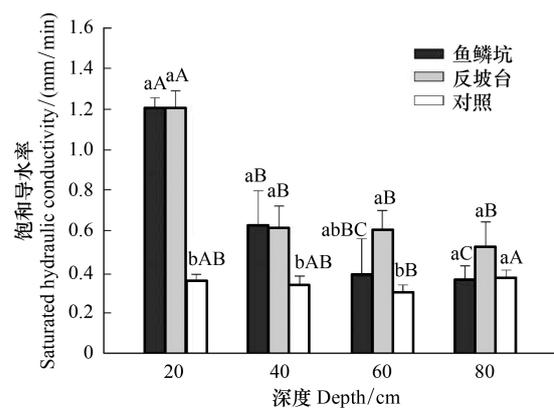


图2 不同工程措施土壤饱和导水率

Fig. 2 Soil saturated hydraulic conductivity of different engineering measures

不同小写字母表示同一深度不同工程措施之间差异显著, $P<0.05$

表3 土壤水分特征曲线参数拟合

Table 3 Parameter fitting of soil water retention curve

工程措施 Engineering	土壤深度 cm Depth	Brooks-Corey			Gardner			van Genuchten			
		h_d	N	R^2	a	b	R^2	α	n	m	R^2
鱼鳞坑 Fish scale pits	0—20	0.167	0.238	0.902	0.003	3.792	0.872	1.902	1.283	0.221	0.950
	20—40	0.135	0.216	0.882	0.001	4.088	0.846	2.013	1.248	0.199	0.927
	40—60	0.103	0.199	0.869	0.001	4.377	0.875	2.021	1.240	0.193	0.898
	60—80	0.092	0.186	0.875	0.001	4.712	0.976	1.984	1.228	0.186	0.916
反坡台 Adversely graded tableland	0—20	0.220	0.238	0.918	0.003	3.856	0.895	1.502	1.285	0.222	0.966
	20—40	0.171	0.229	0.911	0.002	3.968	0.880	1.949	1.268	0.212	0.953
	40—60	0.095	0.173	0.716	0.002	4.144	0.870	2.343	1.196	0.164	0.837
	60—80	0.164	0.214	0.899	0.002	4.200	0.868	1.693	1.262	0.207	0.941
对照样地 Control plot	0—20	0.177	0.194	0.943	0.001	4.861	0.909	1.783	1.210	0.174	0.970
	20—40	0.231	0.193	0.930	0.002	4.791	0.907	1.458	1.224	0.183	0.963
	40—60	0.186	0.219	0.916	0.002	4.189	0.887	1.713	1.259	0.206	0.959
	60—80	0.147	0.211	0.913	0.001	4.317	0.876	1.936	1.240	0.194	0.954

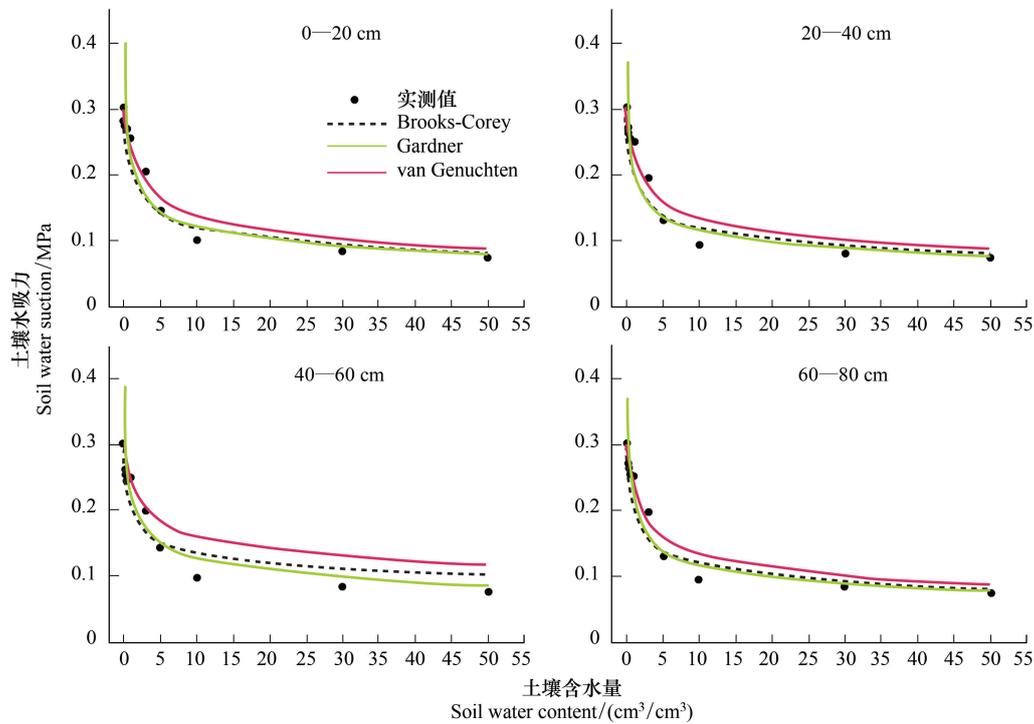


图3 油松反坡台不同深度土壤水分特征曲线模拟

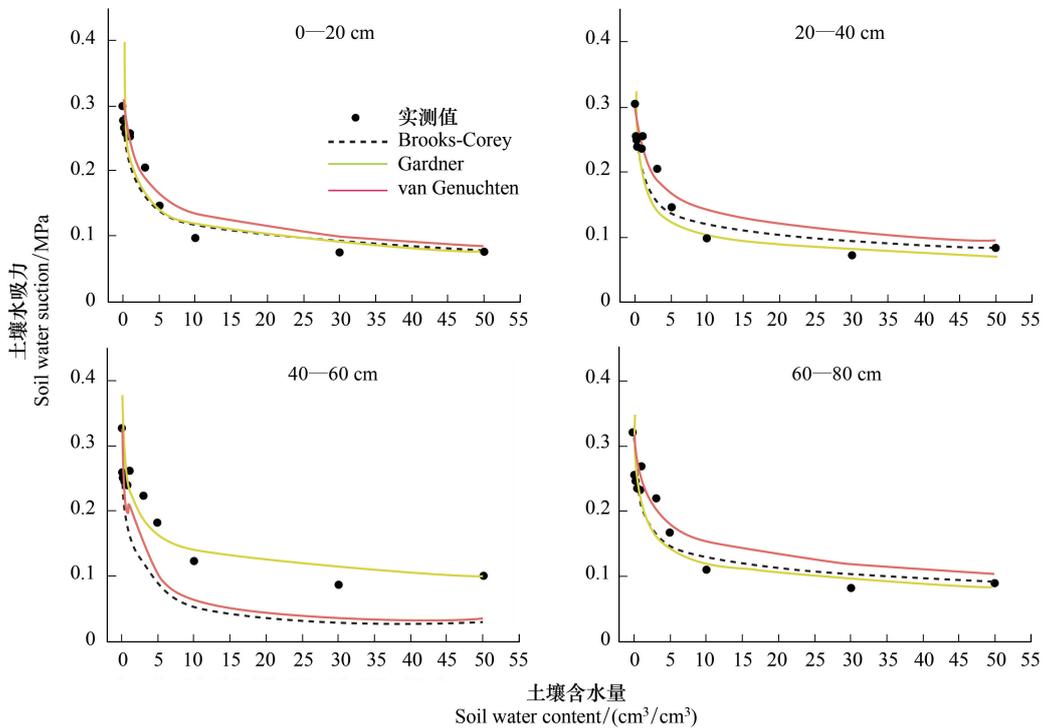
Fig.3 Soil water retention curve of different depth of adversely graded tableland- *Pinus tabulaeformis*

图4 油松鱼鳞坑不同深度土壤水分特征曲线模拟

Fig.4 Soil water retention curve of different depth of fish-scale pits- *Pinus tabulaeformis*

3.4 土壤有效水

采用田间持水量、有效水含量等指标来表征不同工程措施措施的土壤持水能力,反坡台、鱼鳞坑与自然坡

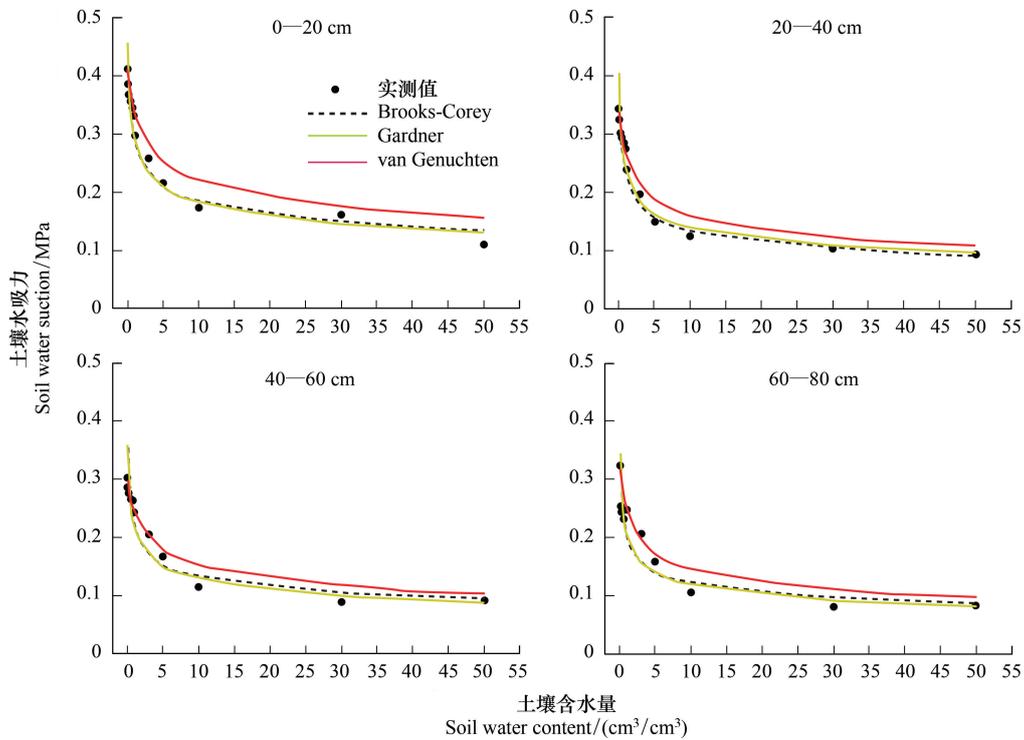


图 5 对照样地不同深度土壤水分特征曲线模拟

Fig.5 Soil water retention curve of different depth of control plot

面水分有效性常数见表 4。由表可知,鱼鳞坑、反坡台的土壤水分常数较低,0—20cm,鱼鳞坑(0.136 cm³/cm³)、反坡台(0.135 cm³/cm³)土壤有效水含量均高于对照(0.106 cm³/cm³)。结合不同深度(0—80 cm)两类工程措施土壤有效水含量,较之对照(0.118 cm³/cm³),鱼鳞坑(0.138 cm³/cm³)和反坡台(0.129 cm³/cm³)平均有效水分分别提高 15%和 9%。

表 4 不同工程措施土壤有效水含量

Table 4 Soil available water content of different engineering measures

工程措施 Engineering	深度 Depth/cm	土壤有效水 Soil available water/(cm ³ /cm ³)	田间持水量 Field capacity/(cm ³ /cm ³)
鱼鳞坑 Fish scale pits	0—20	0.136	0.206
	20—40	0.132	0.204
	40—60	0.144	0.221
	60—80	0.141	0.223
反坡台 Adversely graded tableland	0—20	0.135	0.205
	20—40	0.122	0.194
	40—60	0.122	0.198
对照样地 Control plot	60—80	0.139	0.213
	0—20	0.106	0.199
	20—40	0.110	0.206
	40—60	0.127	0.205
	60—80	0.130	0.200

4 讨论

人们通常使用模型根据土壤机械组成、土壤容重等性质分层填充的重塑土进行测定和推导,反映去除影

响土壤性质因素后的土壤水力学特征^[16]。土壤质地、容重以及土壤结构是影响水分特征曲线的主要因素,其中土壤质地对水分特征曲线的影响最为明显,鱼鳞坑、反坡台等工程措施重塑下垫面微地形,改变了径流路径,影响了土壤颗粒的分离、搬运和沉积过程,工程措施开展后,在与植被长期作用下对土壤表面积及土壤孔隙产生影响,改变了土壤质地,从而影响水分特征曲线^[17-18]。由于土壤含水量主要是指土壤中水分含量的总体值,而真正能够被植物所吸收利用的水量以及其利用水分的难以程度取决于有效水分含量,植物对土壤水分利用的有效程度取决于土水势的高低,而不能单从含水量角度进行分析。所以在评价工程措施涵养水源的生态效益时,不仅仅需要关注土壤水分的变化,更需关注工程措施开展后土壤有效水分的变化。

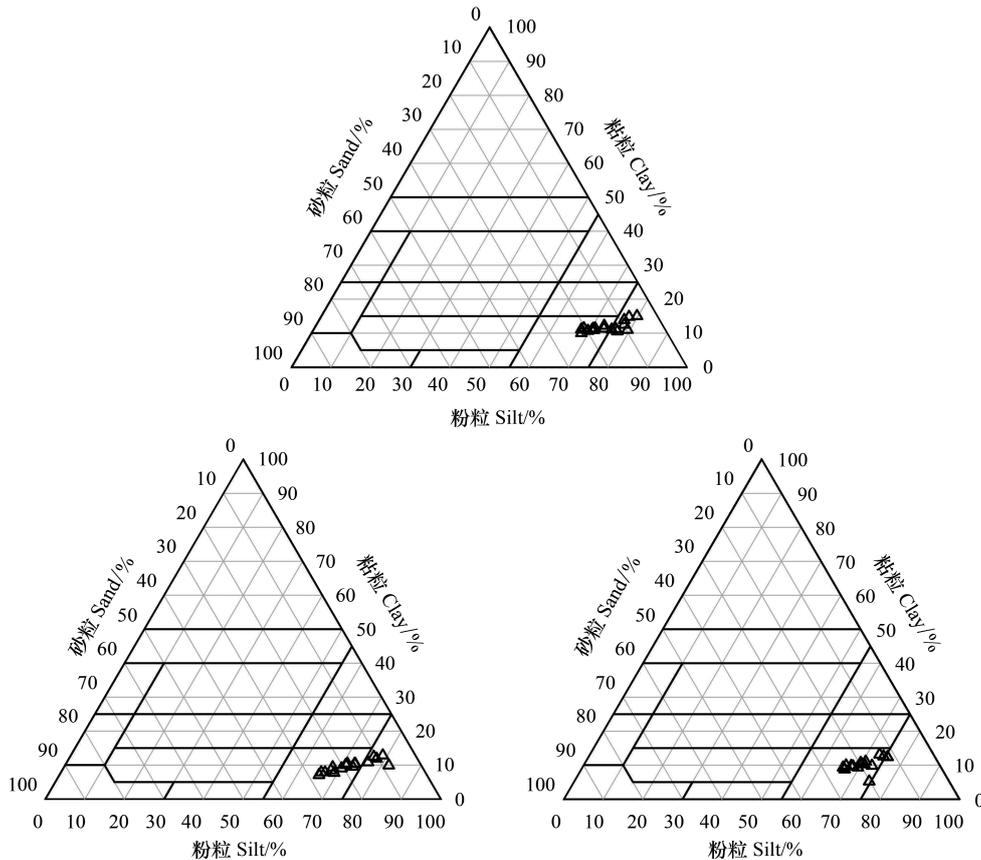


图6 油松鱼鳞坑、油松反坡台与对照样地土壤机械组成

Fig.6 Soil texture distribution of fish-scale pits- *Pinus tabulaeformis*, adversely graded tableland- *Pinus tabulaeformis* and control site

对鱼鳞坑、反坡台土壤水分特征曲线测定结果表明,水分特征曲线在低吸力段比较陡直,而在中吸力段和高吸力段区间内逐渐平缓。这主要是由于在低吸力阶段的土壤水势范围,土壤释放水分过程取决于土壤结构较粗的孔隙分布。因水吸力较小,脱水过程主要靠毛细力起作用。在高吸力段区间时,水吸力较大,主要是土壤颗粒表面吸附力起作用。通过对不同工程措施土壤机械组成的分析可知(表2),研究区内机械组成主要分布在粉砂粒径中(2—2000 μm),较之粉粒,砂粒所占比重也较小,粘粒含量最低,仅在10%上下,所以坡面分布的主要为粉砂质壤土,而非黄土母质发育较为普遍的砂质壤土。较之对照,工程措施改变了土壤质地,鱼鳞坑与反坡台长期作用提高了土壤粉粒含量(图6)。黄土土质通常颗粒较粗且发育缓慢,很难形成好的土壤结构和颗粒组成,导致其持水能力和保水能力较差,工程措施能够加速土壤颗粒细化,改善土壤质地,从而改善土壤持水能力,在鱼鳞坑、反坡台等工程措施长期作用下,土壤有效水分得到了提高。结合对土壤饱和导水率的计算结果,0—20 cm 油松鱼鳞坑和油松反坡台饱和导水率与自然坡面之间差异显著($P < 0.05$),但两者间无显著差异($P > 0.05$),由此可见,工程措施对土壤环境的改良主要体现在对表层的影响。通过计算水分有效性

常数,结果显示工程措施能够提高土壤有效水分,鱼鳞坑和反坡台有效水分较之对照分别提高 15% 和 9%,对表层土壤水分有效性的改善更为显著。鱼鳞坑、反坡台均能够减缓坡度,改变上方来水路径,削减径流冲刷力并促使降水就地入渗,虽然两者均能提高土壤有效水分,但因两种工程措施自身结构差异,致使研究区内鱼鳞坑和反坡台对有效水分提高程度不同(图 7)。与此同时,对鱼鳞坑和反坡台土壤有效水分测定结果显示,两种工程措施的土壤有效水分较低,主要由于研究区土壤孔隙较大,粒间孔隙粗,毛管力微弱,施加较小的吸力,大孔隙中的水分就被排出;而保持在小孔隙中的水分只有在较大吸力下才能被排出,这也是研究区土壤持水量较低的内在原因。

利用水分特征曲线既能进行土壤水吸力与土壤含水率之间的换算,也能够间接反映土壤孔隙大小的分布,有利于在应用物理、数学方法对水分运动进行定量

分析时提供有关参数。选择 Brooks-Corey、Gardner 及 van Genuchten 模型对土壤水分特征曲线的实测值和模拟值进行拟合的结果显示,不同工程措施的水分特征曲线在不同的深度形状和趋势基本一致, van Genuchten 对 0—20 cm 拟和结果的决定系数均在 0.95 以上,高于其他两种模型。Brooks-Corey 模型形式较 Gardner 模型复杂,参数较多,需考虑饱和含水率、残余含水率和进气吸力对水分特征曲线的影响, Gardner 模型参数较少,形式简单,运算和求解较为方便。三种模型也被广泛的应用于土壤水分特征曲线的拟合研究中^[19-22]。van Genuchten 模型是最常用的描述土壤水分特征曲线的模型,该模型适用的土壤质地范围和土壤含水量范围均较为广泛,是推求土壤水分运动参数的常用模型。总体来看, van Genuchten 模型拟合精度变化较小,但参数较多。相关学者基于不同水吸力下的土壤含水量和 RETC 主要涉及的 4 种模型,分别确定了 van Genuchten 为最优的土壤水分特征曲线拟合模型^[23-24]。从运算角度看,三种模型均可适用于长期开展水土保持工程措施后土壤水分特征曲线的模拟。采用非线性拟合求解参数的结果表明, van Genuchten 模型的决定系数较高。

水分特征曲线是研究水分入渗、蒸发等生态水文过程的关键,对于探究土壤水分的贮存、保持、供应以及土壤-植物-大气连续体中的水分动态具有重要意义。土壤是工程措施与植被影响的直接环境,两者共同影响土壤属性^[25],水分是开展植被恢复的主要因子,所以通过实测土壤水分特征曲线并定量分析土壤有效水分的变化,能够为评价不同工程措施保持水土的生态服务功能提供依据。当前,工程措施被广泛应用于植被建设中,通过重塑下垫面微地形,并在与植被长期作用下改变了土壤质地(图 6),土壤质地是影响水分特征曲线的关键因素之一。较之对照,鱼鳞坑和反坡台显著提高了土壤粘粒和粉粒含量,两者土壤有效水分分别提高 15% 和 9%,研究区内工程措施的开展对生态恢复具有积极作用。

5 结论

1) 黄土半干旱小流域,鱼鳞坑和反坡台两种工程措施长期作用改变了土壤机械组成,反坡台(10.63%)、鱼鳞坑(9.78%)粘粒含量显著高于对照样地(9.66%),粉粒含量反坡台(71.42%)与鱼鳞坑(70.74%)显著高于对照样地(67.85%)。

2) 工程措施有效提高土壤饱和导水率,与对照样地相比,鱼鳞坑和反坡台表现出较好的保水功能。鱼鳞坑、反坡台均能够提高土壤有效水分,鱼鳞坑和反坡台有效水分较之对照分别提高 15% 和 9%,且两种工程措施对表层土壤有效水分改善更加显著。

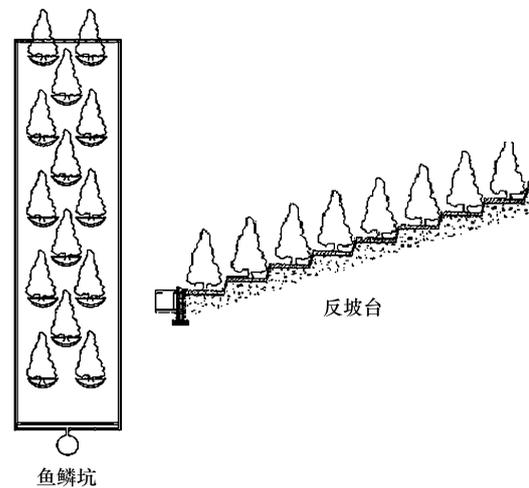


图 7 油松鱼鳞坑与油松反坡台工程措施示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the of fish scale pits- *Pinus tabulaeformis* and adversely graded tableland- *Pinus tabulaeformis*

3)采用 Brooks-Corey、Gardner 及 van Genuchten 模型对不同深度土壤水分特征曲线实测值和模拟值进行拟合,两种工程措施的水分特征曲线不同深度形状和趋势基本一致,非线性拟合求解参数的结果表明 van Genuchten 模型决定系数较高。

参考文献 (References):

- [1] Zhao G J, Yue X L, Tian P, MU X M, Xu W L, Wang F, Gao P, Sun W Y. Comparison of the suspended sediment dynamics in two loess plateau catchments, China. *Land degradation & development*, 2017, 8(4): 1398-1411.
- [2] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [3] Tian P, Zhai J Q, Zhao G J, MU X M. Dynamics of runoff and suspended sediment transport in a highly erodible catchment on the Chinese Loess Plateau. *Land degradation & development*, 2016, 27(3): 839-850.
- [4] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 杨磊, 陈利顶. 微地形改造的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [5] 吴煜禾, 张洪江, 王伟, 程金花, 王冉, 杜士才, 吕文星, 古德洪. 重庆四面山不同土地利用方式土壤水分特征曲线测定与评价. *西南大学学报:自然科学版*, 2011, 33(5): 102-108.
- [6] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [7] 姚其华, 邓银霞. 土壤水分特征曲线模型及其预测方法的研究进展. *土壤通报*, 1992, 23(3): 142-144.
- [8] Lin L R, Chen J Z. The effect of conservation practices in sloped cropland on soil hydraulic properties and root-zone moisture dynamics. *Hydrological processes*, 2015, 29(9): 2079-2088.
- [9] Ren Z P, Zhu L J, Wang B, Cheng S D. Soil hydraulic conductivity as affected by vegetation restoration age on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(4): 546-555.
- [10] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 李森, 张健. 不同施肥土壤水分特征曲线空间变异. *农业机械学报*, 2014, 5(6): 161-165, 176-176.
- [11] 郝振纯, 杨兆, 王加虎, 安贵阳, 朱乾. 淮北平原典型土壤水分特征曲线测定与分析. *水电能源科学*, 2013, 31(2): 106-108.
- [12] 胡浩云, 刘萌萌, 吴永胜. 毛乌素沙地南缘沙区不同类型地表水分特征曲线测定与分析. *科学技术与工程*, 2015, 15(8): 23-28.
- [13] 刘胜, 贺康宁, 常国梁. 黄土高原寒区青海云杉人工林地土壤水物理特性研究. *西部林业科学*, 2005, 34(3): 25-29.
- [14] 吴华山, 陈效民, 叶民标, 吴华强, 施恩培. 太湖地区主要水稻土水力特征及其影响因素. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 181-183, 187-187.
- [15] 冯天骄, 卫伟, 陈利顶, 陈蝶, 于洋, 杨磊. 黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性. *环境科学*, 2017, 38(9): 3860-3870.
- [16] Wu G L, Liu Y, Fang N F, Deng L, Shi Z H. Soil physical properties response to grassland conversion from cropland on the semi-arid area. *Ecohydrology*, 2016, 9(8): 1471-147.
- [17] 吴文强, 李吉跃, 张志明, 孙向阳, 翟洪波. 北京西山地区人工林土壤水分特性的研究. *北京林业大学学报*, 2002, 24(4): 51-55.
- [18] 王文焰, 王全九, 张建丰, 汪志荣. 甘肃秦王川地区土壤水分运动参数及相关性. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 110-113.
- [19] 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. *水利学报*, 2004, 35(2): 68-76.
- [20] 马昌臣, 王飞, 穆兴民, 康绍忠. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 105-109.
- [21] 孙迪, 夏静芳, 关德新, 王安志, 吴家兵, 袁凤辉. 长白山阔叶红松林不同深度土壤水分特征曲线. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1405-1409.
- [22] 程云, 陈宗伟, 张洪江, 孙艳红. 重庆缙云山不同植被类型林地土壤水分特征曲线模拟. *水土保持研究*, 2006, 13(5): 80-83.
- [23] 刘彩虹, 卞建民, 王宇. 吉林西部盐碱土壤水力学参数特征及其影响因素. *东北大学学报:自然科学版*, 2016, 37(2): 268-272.
- [24] 朱海清, 虎胆·吐马尔白热合木, 李慧. 干旱区盐碱土土壤水分特征曲线模拟研究. *新疆农业大学学报*, 2015, 38(2): 168-172.
- [25] Yu Y, Wei W, Chen L D, Feng T J, Daryanto S, Wang L X. Land preparation and vegetation type jointly determine soil conditions after long-term land stabilization measures in a typical hilly catchment, Loess Plateau of China. *Journal of soils and sediments*, 2017, 17(1): 144-156.