

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.03.017 CSTR:32310.14.stbcb.2025.03.017

刘雅宁,周大壮,孙西欢,等.施加蓄水陶土对黄土高原土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2025,39(3):154-162.

LIU Yaning, ZHOU Dazhuang, SUN Xihuan, et al. Influence of application of water-storage clay on the hydraulic properties of soil on the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):154-162.

施加蓄水陶土对黄土高原土壤水力特性的影响

刘雅宁^{1,2}, 周大壮^{1,2}, 孙西欢^{1,2}, 王青杵³, 马娟娟^{1,2}, 郑利剑^{1,2}

(1.太原理工大学水利科学与工程学院,太原 030024; 2.流域水资源协同利用山西省
重点实验室,太原 030024; 3.山西省水利发展中心,太原 030024)

摘要: [目的] 蓄水陶土作为一种新型土壤改良剂,其对黄土高原土壤的水力特性影响如何尚未得知。为此研究不同粒径和添加量的蓄水陶土对土壤水力特性的影响。[方法] 通过选取山西省太原市西山耕层的粉壤土为供试土壤进行室内物理试验,设置2种蓄水陶土粒径(M:2~5 mm,L:5~10 mm)和4种蓄水陶土添加量(0、5%、10%、20%),测定土壤水分特征曲线和饱和导水率,分析不同粒径和添加量下土壤的水力特性参数的变化。[结果] 1)与不添加蓄水陶土的CK相比,添加蓄水陶土能够增强土壤的渗蓄能力。随着添加量和粒径的增加,土壤持水性能的提升效果越好。2)粒径和添加量的不同对 Van Genuchten模型各参数产生不同程度的影响。3)随着蓄水陶土添加量和粒径的变化,田间持水量由27.99%增加到31.49%,萎蔫系数由5.85%增加到12.66%,空气容量由19.15%增加到24.68%,饱和导水率增加96.56%~1150.76%。4)比水容量提升效果大小为M20>L20>M10>L10>L5>M5>CK(M、L分别表示蓄水陶土粒径为2~5、5~10 mm,5、10、20分别表示蓄水陶土添加量的质量比为5%、10%、20%,CK表示不添加蓄水陶土的对照处理)。各处理不同级别孔隙含量规律表相同,均为存储孔>残余孔>传输孔>裂隙孔。[结论] 研究结果以期为添加蓄水陶土改善黄土高原水土流失提供一定的理论支持。

关键词: 蓄水陶土; 土壤改良; 土壤持水性能; 土壤导水能力; 黄土高原

中图分类号:S152.7 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2025)03-0154-09

Influence of Application of Water-Storage Clay on the Hydraulic Properties of Soil on the Loess Plateau

LIU Yaning^{1,2}, ZHOU Dazhuang^{1,2}, SUN Xihuan^{1,2}, WANG Qingchu³, MA Juanjuan^{1,2}, ZHENG Lijian^{1,2}

(1.College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Key Laboratory of Collaborative Utilization of Water Resources in River Basin of Shanxi Province,

Taiyuan 030024, China; 3.Shanxi Provincial Water Resources Development Center, Taiyuan 030024, China)

Abstract: [Objective] As a new type of soil amendment, the impact of water-storage clay on the hydraulic properties of soil on the Loess Plateau is still unknown. The aim of the study was to investigate the effects of different particle sizes and application rates of water-storage clay on soil hydraulic properties. [Methods] Silty loam from the topsoil of Xishan Mountain in Taiyuan City, Shanxi Province, was selected as the test soil for indoor physical experiment. Two particle sizes of water-storage clay (M: 2–5 mm, L: 5–10 mm) and four application rates of water-storage clay (0, 5%, 10%, 20%) were set. By measuring the soil water characteristic curve and saturated water conductivity, the changes of soil hydraulic parameters under different particle sizes and application rates were analyzed. [Results] 1) Compared to the control (CK), water-storage clay enhanced soil infiltration and retention capacity. The improvement in soil water retention was more pronounced with increasing application rates and particle sizes. 2) The particle size and application rate had different degrees of influence on the

收稿日期:2024-11-18 修回日期:2024-12-25 录用日期:2025-01-09 网络首发日期(www.cnki.net):2025-03-26

资助项目:国家自然科学基金项目(52379044);中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231A016)

第一作者:刘雅宁(1999—),男,硕士研究生,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:1174835650@qq.com

通信作者:孙西欢(1960—),男,教授,博士,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail:sunxihuan@tyut.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

parameters of the Van Genuchten model. 3) With changes in the application rate and particle size of water-storage clay, the field capacity increased from 27.99% to 31.49%, the wilting coefficient increased from 5.85% to 12.66%, the air capacity increased from 19.15% to 24.68%, and saturated water conductivity increased by 96.56% to 1 150.76%. 4) The order of increase in specific water capacity was M20>L20>M10>L10>L5> M5>CK (M and L represent particle sizes of 2.5 and 5-10 mm for the water-storage clay; 5, 10 and 20 represent the mass application rates of 5%, 10% and 20% for the water-storage clay; CK represents the control without the addition of water-storage clay). The pore size distribution across different treatments showed the same pattern of storage pores>residual pores>transfer pores>crack pores. [Conclusion] The findings can provide theoretical support for the improvement of soil and water conservation on the Loess Plateau by adding water-storage clay.

Keywords: water-storage clay; soil amendment; soil water-holding capacity; soil hydraulic conductivity; the Loess Plateau

Received: 2024-11-18

Revised: 2024-12-25

Accepted: 2025-01-09

Online(www.cnki.net): 2025-03-26

推动黄河流域生态保护和高质量发展是国家的重大战略需求。黄土高原位于黄河流域中游,面积约为64万 km²,是世界上黄土面积分布最广的地区,由于其有着深厚、疏松的细质土壤,因此黄土高原是中国主要农业区。同时,黄土高原地区也是我国水资源紧缺和水土流失最严重的区域,据《中国水土保持公报》^[1]显示,2022年全国水土流失总面积265.34万 km²,其中,黄土高原区水土流失面积为20.25万 km²,占其土地总面积的31.64%。水土流失使土壤肥力下降、农作物产量降低、生态环境恶化,严重制约黄土高原经济社会可持续发展 and 黄河流域中游的高质量发展。因此,在黄土高原地区进行水土流失防治对于改善生态环境,推进水土资源高效利用具有重要意义。

已有研究^[2]表明,在土壤表层添加适量的改良剂可以提高土壤水分入渗,减少径流冲刷,增强土壤蓄水能力,是防治黄土高原水土流失的重要举措之一。目前,使用频率较高的几种土壤改良剂有生物炭、沸石、粉煤灰和聚丙烯酰胺等。常艺睿等^[2]研究表明,玉米秸秆生物炭可以显著提高干旱黄土的保水能力,降低土壤的饱和导水率;郑鹏等^[3]向露天煤矿排土场土壤中加入粉煤灰后发现可以提高土壤的持水性能;YIN等^[4]研究表明,气化渣的添加可以提高盐碱地的保水性能;吴军虎等^[5]发现,向黑垆土施入沸石,可减小土壤的累计入渗量和入渗率,沸石添加量越大,阻渗效果越明显;李娜等^[6]研究发现,4%生物炭和0.5%的聚丙烯酰胺混施可以提高煤矸石基质水分吸持能力和入渗能力。但这些土壤改良剂由于成本相对较高,有些具有潜在环境污染等不利因素^[7-8],使得它们在规模化应用过程中受到一定的阻碍。

蓄水陶土作为一种新型无机多孔材料,其具有

吸水率高、孔隙度大、原料广、成本低和无污染等特点^[9],对于土壤改良有较大的应用潜力。目前,关于蓄水陶土应用的研究主要集中于城市绿化、公路绿化、海绵城市建设等方面^[9-10],而将蓄水陶土作为土壤改良剂用于改善土壤结构,提高土壤的渗蓄能力等方面的研究较少。

为此,本文采用不同粒径和添加量的蓄水陶土,将其添加到黄土高原土壤中,探究改良后的土壤的水力特性,以及寻求能够有效缓解水土流失的适宜添加量和粒径,以期为黄土高原施用蓄水陶土防治水土流失提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤采自山西省太原市西山耕层(0~20 cm),去除杂质晒干后过2 mm筛以备用。土壤机械组成利用 Bettersize 3 000 Plus 仪测定,砂粒占23.5%,粉粒占70%,黏粒占6.5%,质地为粉壤土,土壤体积质量用环刀法测定为1.35 g/cm³。蓄水陶土由武汉铭创新海生态科技有限公司提供,风干破碎后过筛制成不同粒径。

1.2 试验设计

试验设置4个蓄水陶土添加量(质量比):0、5%、10%、20%,2种粒径:M(2~5 mm)、L(5~10 mm),共7个处理,蓄水陶土的添加比例及粒径通过预试验所确定,每个处理重复3次。将蓄水陶土与土壤混合均匀后,采用定体积法每层充分混合均匀后分层填入高5 cm、内径8 cm的环刀内,各处理环刀底部垫上无纺纱布后放在饱和盘上浸泡在水中,持续24 h使各处理吸水饱和。试验处理见表1。

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理	粒径/mm	蓄水陶土添加量/%	体积质量/(g·cm ⁻³)
CK			1.35
M5	2~5	5	1.27
M10	2~5	10	1.20
M20	2~5	20	1.09
L5	5~10	5	1.26
L10	5~10	10	1.19
L20	5~10	20	1.06

1.3 测定项目与分析

土壤水分特征曲线(SWCC)是土壤基质势与土壤体积含水率的函数,本试验采用 HYPROP2 (Hydraulic Property Analyzer, Meter Group Inc., 美国)仪测定土壤水分特征曲线,采用 Van Genuchten 模型^[11]对测得数据进行拟合。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\theta(h)$ 为土壤水吸力 h cm 下的土壤体积含水率, cm³/cm³; θ_r 为土壤残余体积含水率, cm³/cm³; θ_s 为土壤饱和和体积含水率, cm³/cm³; α 为进气值的倒数, 1/cm; n 和 m 为土壤孔隙尺寸分布参数, $m=1-1/n$ 。本试验采用实测 θ , 进行拟合发现, 对于各处理的 θ_r 均被估计为 0。

饱和导水率采用 KSAT 仪 (METER Group) 的变水头法进行自动测量。KSAT 仪可以随时间记录每个时刻的水头差, 通过水位变化计算穿过土壤样品的流量(从底部到顶部)和水头压差, 并根据 Darcy 定律进行计算:

$$K_s = \frac{A_{\text{Bur}}}{A_{\text{Sample}}} \frac{L}{\Delta t} \ln \left(\frac{H_{t_i}}{H_{t_{i+1}}} \right) \quad (2)$$

式中: K_s 为饱和导水率, cm/h; A_{Bur} 为量筒的横截面积, cm²; A_{Sample} 为土壤样品的横截面积, cm²; L 为土样高度, cm; Δt 为时刻 t_{i+1} 和 t_i 之差, h; H_{t_i} 和 $H_{t_{i+1}}$ 分别为 t_i 和 t_{i+1} 时刻的压力水头, cm。

比水容量计算公式为:

$$C(h) = -\frac{d\theta}{dh} = \frac{(\theta_s - \theta_r) m n \alpha |\alpha h|^{n-1}}{(1 + |\alpha h|^n)^{m+1}} \quad (3)$$

土壤当量孔径反映土壤的水分有效性和孔隙组成, 根据 Young-Laplace 方程^[12]计算:

$$d = \frac{3000}{h} \quad (4)$$

式中: d 为当量孔径, μm ; h 为土壤水吸力, cm。

根据 GREENLAND^[13] 的研究, 将孔隙分为以下 4 个不同级别: 裂隙孔 ($h \leq 0.6, d \geq 500$)、传输孔 ($0.6 < h \leq 6, 50 \leq d < 500$)、存储孔 ($6 < h \leq 600, 0.5 \leq d < 50$) 和残余孔 ($h > 600, d < 0.5$)。

通过环刀试验测定的数据与土壤水分特征曲线数据进行对比分析, 将 PF=2.52 时的土壤含水率作为田间持水量(FC), PF=4.18 (约 1 500 kPa) 时的土壤含水率作为萎蔫系数(WP), 土壤空气体积质量 $AC = \theta_s - FC$ 。

1.4 数据处理

本文使用 Excel 2010 软件进行数据的基本处理和分析计算; 使用 SPSS 26.0 软件进行统计分析、方差分析, 利用 Duncan 法比较不同处理间的差异; 使用 Origin 2021 软件进行数据拟合分析以及绘图。

2 结果与分析

2.1 蓄水陶土添加对土壤水分特征曲线的影响

2.1.1 土壤水分特征曲线的变化 由图 1 可知, 施用不同粒径和添加量的蓄水陶土使土壤水分特征曲线呈不同的变化趋势, 在相同土壤水吸力条件下, 随着蓄水陶土添加量的增加, 各处理的土壤含水率也随之增加, 在低吸力段 (PF < 1.5) 尤为明显。在低吸力段, 与 CK 相比, M 粒径各处理的持水能力分别增加 4.42%、6.53%、8.83%, L 粒径各处理的持水能力分别增加 4.37%、7.35%、11.38%。

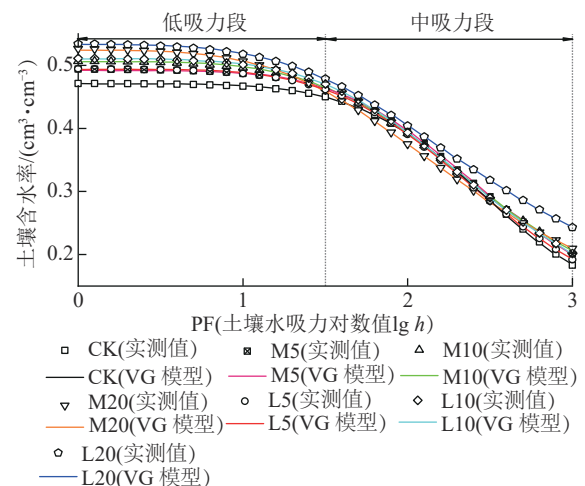


图 1 蓄水陶土的粒径和添加量对土壤水分特征的影响

Fig. 1 The influence of particle size and application rate of water-storage clay on soil moisture characteristic

在相同粒径下, 土壤持水性强弱程度为 $L20 > L10 > L5 > CK$, $M20 > M10 > M5 > CK$ 。在相同添加量下, 各处理对应的土壤水分特征曲线均位于 CK 的上方, 除 M5 和 L5 处理相差不大, 其余处理均随着粒径的减少依次下降, 表明随着粒径的增加土壤的持水能力也随之增加, 其持水性强弱的大小依次为 $L10 > M10 > CK$, $L20 > M20 > CK$ 。在中吸力段 (PF=1.5~3.0), 随

着土壤吸水力的继续增加,各处理的土壤体积含水率出现急剧下降。在该阶段,除L20处理外,其他各处理在中吸力段的平均土壤体积含水率相比CK差距较小,差值均在1.35%以内,而L20处理相比CK持水能力有明显提高,在中吸力段的持水能力相比CK提高9.05%。

2.1.2 土壤水分特征曲线模型参数的变化 由表2可知,添加量对土壤水分特征曲线模型各参数均有显著影响($p < 0.001$),而粒径只对 θ_s 有显著影响($p < 0.01$),对 α, n, m 的影响均不显著。二者的交互效应对土壤水分特征曲线模型各参数影响并不显著。由图2可知,不同处理下的 θ_s 均有所提高,并且随着蓄水陶土的添加量和粒径的增加,提升效果也显著增加($p < 0.01$)。M粒径下,各处理的 θ_s 相比于CK分别增加11.46%、21.21%、38.44%,L粒径下,各处理的 θ_s 相比于CK分别增加12.47%、23.10%、

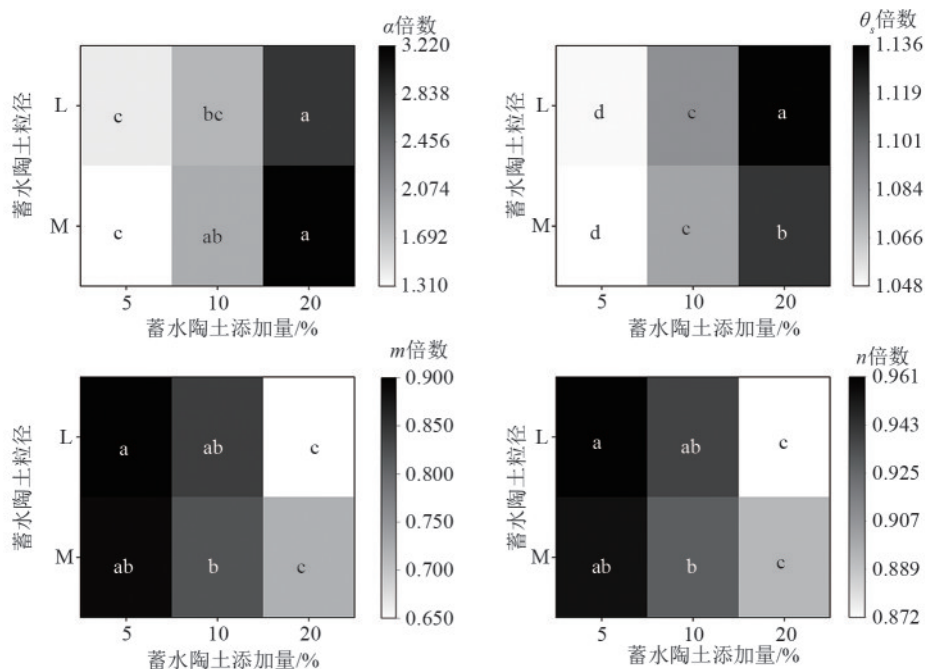
44.67%。在5%、10%、20%的添加量下,L粒径相比于M粒径分别增加0.9%、1.56%、4.50%。 n 值反映土壤释水速率的快慢, n 值越大释水速率越大。在同一粒径下, n 随着蓄水陶土添加量的增加而显著减小($p < 0.01$)。而在相同添加量下, n 值随粒径的变化不显著,L粒径相比于M粒径分别增加0.67%、0.96%、-2.49%。参数 m 在M粒径下,各处理相比于CK分别减少11.3%、18.18%、27.91%,在L粒径下,各处理相比于CK分别减少9.73%、15.77%、34.65%。在相同粒径下,各处理的 α 均有显著差异($p < 0.01$)。M粒径下,各处理的 α 相比于CK分别增加30.77%、86.81%、221.98%,L粒径下,各处理的 α 相比于CK分别增加4.18%、80.22%、182.42%。在5%、10%、20%的添加量下,L粒径相比于M粒径分别增加8.4%、-3.53%、-12.29%。

表2 蓄水陶土粒径和添加量对VG模型参数的双因素方差分析

Table 2 Two-factor analysis of variance of VG model parameters based on particle size and application rate of water-storage clay

指标	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$		α / cm^{-1}		n		$m (m=1-1/n)$	
	F	p	F	p	F	p	F	p
粒径	18.565	<0.01	0.723	0.412	0.095	0.763	0.208	0.656
添加量	466.029	<0.001	54.925	<0.001	33.682	<0.001	37.343	<0.001
粒径×添加量	5.638	0.019	1.241	0.324	1.742	0.217	2.110	0.164

注: F 表示显著性差异的水平, p 表示检验水平。下同。



注:图中相同参数中不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图2 各处理的VG模型参数 θ_s, α, n, m 相对于CK的倍数

Fig. 2 The multiples of the VG model parameters θ_s, α, n and m relative to CK for each treatment

2.2 蓄水陶土添加对土壤水力特性参数的影响

2.2.1 田间持水量(FC)、萎蔫系数(WP)、有效水含量(AWC)、空气容量(AC) 由表3可知,蓄水陶

土的添加量对各参数均有显著影响($p < 0.05$),而粒径对各参数影响不显著,二者的交互效应对AWC没有显著影响,但对FC、WP、AC均有显著影

响($p < 0.05$)。由图 3 可知,相比于 CK 处理,L20 处理的 FC 最大,M20 处理的 FC 最小,各处理 FC 由大到小依次为 L20>M5>M10>L10>L5>M20>CK。各粒径下的 WP 随着添加量的增加而增加,相比于 CK 处理,L20 处理的 WP 最大,L5 处理的 WP 最小,各处理 WP 由大到小顺序为 L20>M20>M10>L10>M5>L5>CK。各处理的 AWC 均比 CK 小,相同粒径下,各处理的 AWC 随着蓄水

陶土添加量的增加而减小,除 5% 添加量的处理以外,其余相同添加量下的 AWC 均随着蓄水陶土粒径的增加而增加。各处理相比于 CK 均增加空气容量 AC。在 M 粒径下,空气容量 AC 随着蓄水陶土添加量的增加而增加,而在 L 粒径下,空气容量 AC 与蓄水陶土的添加量之间没有明显的规律。在相同添加量下,各处理的空气容量 AC 没有明显的规律。

表 3 蓄水陶土粒径和添加量对土壤水分特征参数的双因素方差分析

Table 3 Two-factor analysis of variance on soil moisture characteristic parameters based on particle size and application rate of water-storage clay cm^3/cm^3

指标	FC		WP		AWC		AC	
	F	p	F	p	F	p	F	p
粒径	4.594	0.053	2.787	0.121	0.074	0.790	0.566	0.466
添加量	6.807	<0.050	49.032	<0.001	20.833	<0.001	22.569	<0.001
粒径×添加量	21.718	<0.001	10.138	<0.010	1.160	0.346	15.344	<0.001

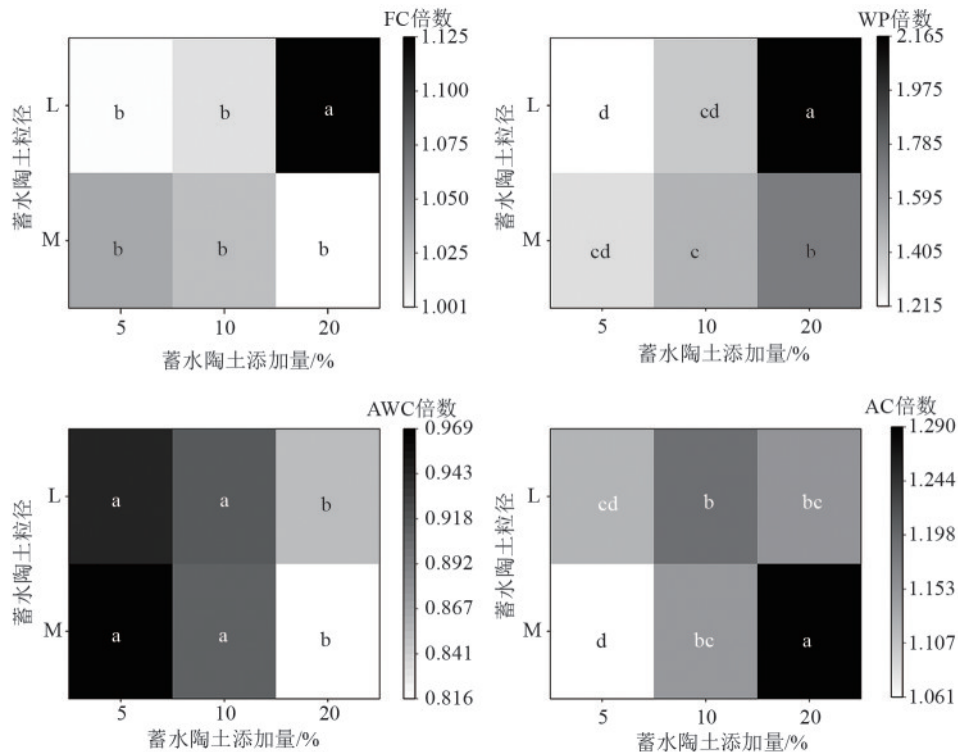


图 3 各处理的土壤水分特征参数值 FC、WP、AWC、AC 相对于 CK 的倍数

Fig. 3 The multiples of soil moisture characteristic parameters, including FC, WP, AWC and AC, relative to CK for each treatment

2.2.2 比水容量 比水容量是指单位土壤水吸力变化所引起的土壤水分体积分数变化,其常用于反映土壤供水能力的强弱,比水容量越大,表明相同吸力土壤所释放出的水分越多,其供水能力越强^[14]。由图 4 可知,各处理的比水容量变化趋势大致相同,均随着 PF 值的增加呈先迅速增加到一个峰值后又迅速减小的趋势。相同粒径下,各处理的峰值随着蓄水陶土添加量的增加而增加。在 M 粒径下,各处理相对于 CK 分别增加 22.63%、65.72%、165.15%。在 L 粒径下,各处理相对于 CK 分别增加 34.79%、65.72%、116.54%。而

在相同添加量下,2 个粒径之间没有明显的规律。在 $PF < 2$ 时,各处理的比水容量均比 CK 大,而在 $PF > 2$ 时,各处理的比水容量则均比 CK 小。

2.3 蓄水陶土添加对土壤导水率的影响

饱和导水率是指土壤在吸水饱和状态下,在单位时间、单位水势和单位土壤截面上的水通量,反映土壤的饱和渗透性能^[15]。由图 5 可知,添加蓄水陶土均提高各处理的饱和导水率,并且随着蓄水陶土添加量的增加,各处理的饱和导水率也呈增加趋势。在 M 粒径下,各处理的饱和导水率相比于 CK 分别增

加 128.55%、356.8%、1 150.76%。在 L 粒径下,各处理的饱和导水率相比于 CK 分别增加 96.56%、349.19%、1 030.88%。而在相同添加量下,2 个粒径的饱和导水率差异并不明显。

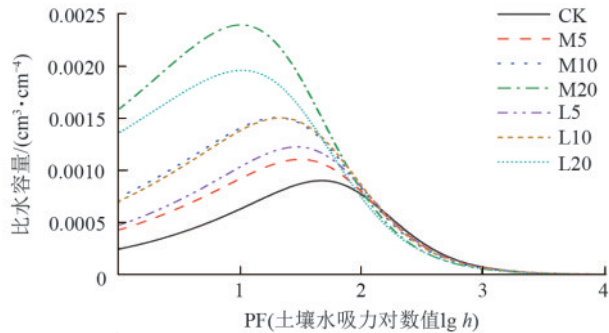


图 4 蓄水陶土添加量和粒径对土壤比水容量的影响

Fig. 4 Effects of application rate and particle size of water-storage clay on soil specific water capacity

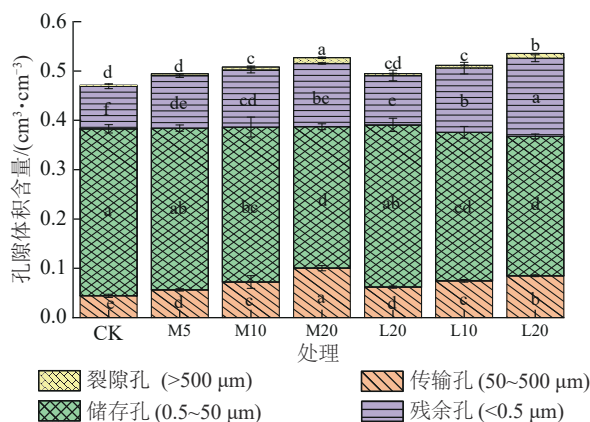
2.4 蓄水陶土添加对土壤当量孔径的影响

由表 4 可知,蓄水陶土的添加量对裂隙孔、传输孔、存储孔、残余孔均有显著影响($p < 0.001$),而粒径只对残余孔有显著影响($p < 0.01$),对其他 3 种孔隙影响不显著,二者的交互效应对传输孔和残余孔有显著影响($p < 0.05$),而对裂隙孔和储存孔的影响并不显著。由图 6 可知,所有处理不同级别的孔隙含量大小规律相同,均表现为存储孔 > 残余孔 > 传

表 4 蓄水陶土粒径和添加量对土壤当量孔径的双因素方差分析

Table 4 Two-factor analysis of variance on the effect of particle size and application rate of water-storage clay on soil equivalent pore size

指标	裂隙孔 (>500 μm)		传输孔 (50~500 μm)		存储孔 (0.5~50 μm)		残余孔 (<0.5 μm)	
	F	p	F	p	F	p	F	p
粒径	1.153	0.304	0.776	0.396	0.916	0.358	12.464	<0.010
添加量	57.646	<0.001	47.173	<0.001	20.433	<0.001	41.533	<0.001
粒径×添加量	1.624	0.237	5.340	<0.050	0.529	0.602	8.808	<0.010

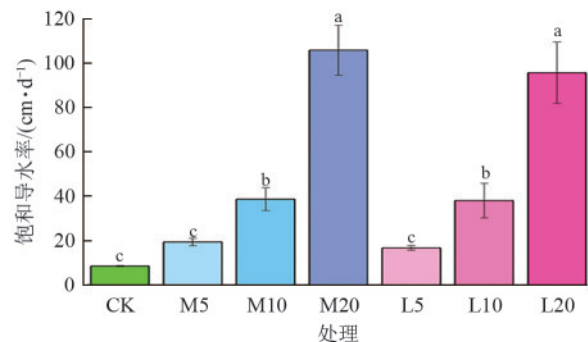


注:图柱上方不同小写字母表示相同孔隙不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 6 蓄水陶土添加量和粒径对土壤当量孔径的影响

Fig. 6 Effect of application rate and particle size of water-storage clay on soil equivalent pore size

输孔 > 裂隙孔。在 M 粒径下,各处理的裂隙孔、传输孔、残余孔的含量相比于 CK 分别增加 59.09%~427.27%、26.8%~125.9%、23.24%~48.21%,而储存孔的含量相比于 CK 分别减少 3.1%~15.22%。在 L 粒径下,各处理的裂隙孔、传输孔、残余孔的含量相比于 CK 分别增加 81.82%~340.9%、39.64%~91.22%、15.72%~83.01%,而储存孔的含量相比于 CK 分别减少 2.81%~16.46%。在相同添加量下,M 粒径和 L 粒径不同级别的孔隙含量没有明显的差异。



注:图柱上方不同小写字母表示同组间不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 5 蓄水陶土添加量和粒径对土壤饱和导水率的影响

Fig. 5 Effect of application rate and particle size of water-storage clay on soil saturated hydraulic conductivity

3 讨论

土壤的水力特性包括土壤水分特征曲线及其模型参数、水力特性参数和比水容量、饱和导水率、当量孔径等,以上参数可以反映出土壤的持水能力、水分有效性、供水能力及渗透速度。分析以上参数有助于探究如何改良土壤结构及如何增强土壤的入渗及持水能力,是防治水土流失的重要举措之一。本研究发现,与 CK 处理相比,添加蓄水陶土的各处理的土壤水分特征曲线均发生上移,表明蓄水陶土提高土壤持水能力,且在低吸力阶段($PF < 1.5$)土壤持水能力提升更加显著。是因为蓄水陶土通过增加土壤中孔和微孔含量改善土壤结构,且蓄水陶土的石锥晶平行排列的孔壁结构和独特的内部结构可以使蓄水陶土快速吸水和缓慢释水^[2],使蓄水陶土具有增加土壤持水性能的优点。同时,蓄水陶土由于其特

殊的多孔结构,使其要比土壤体积质量低,加入后降低土壤的体积质量,使其内部孔隙含量增多,并且由于蓄水陶土自身稳定的孔隙结构,加入土壤后可以防止土壤颗粒紧密堆积,从而保持土壤一定的透气性和导水性。

添加蓄水陶土后对土壤水分特征参数有明显影响,与CK相比,不同处理下的 θ_s 均有所提高,并且随着蓄水陶土的添加量和粒径的增加,提升效果也随之增加,闫辰啸等^[16]向风沙土中添加生物炭后,其 θ_s 也随着生物炭添加量和粒径的增加而升高;WU等^[17]研究发现,生物炭和凹凸棒土混施增强盐渍土的保水能力和饱和水分体积分数。参数 α 随着蓄水陶土的添加量和粒径的增加而增加,一般认为参数 α 为进气吸力的倒数值,进气值是水分特征曲线接近饱和时拐点的吸力值^[18],本研究采用的蓄水陶土粒径均大于土壤粒径,所以加入到土壤中改变土壤原本的孔隙结构,使土壤孔隙增大,降低土壤大孔隙对水分吸持的临界吸力,从而增大 α 值。 n 值可反映土壤释水速率的快慢^[19]。在相同粒径下, n 值随着蓄水陶土添加量的增加而降低,相同添加量下,M、L粒径处理之间的 n 值没有显著差异。

添加蓄水陶土同时提高田间持水量FC和萎蔫系数WP。张慧琦等^[20]研究发现,向砂土中添加生物炭也提高砂土的田间持水量FC和萎蔫系数WP。田间持水量是土壤剖面所维持的较稳定的土壤水含量,一般认为是植物所能利用的水分上限,受多种因素影响包括土壤的质地、结构和有机质含量等^[21]。萎蔫系数是在土壤中生长的植物发生永久萎蔫时的土壤含水量^[22],一般认为是植物所能利用的水分下限。在L粒径下,FC、WP均随着添加量的增加而增加。而在M粒径下,WP随着添加量的增加而增加,FC随着添加量的增加而略有减小,可能是因为M粒径的蓄水陶土添加后增加的土壤大孔隙含量较多,导致保持的水分多以重力水的形式排出。各处理萎蔫系数WP的提升程度要高于田间持水量FC,所以导致有效水AWC降低,并且在相同粒径下,各处理的AWC随着蓄水陶土添加量的增加而减小。PEAKE等^[23]研究发现,施用生物炭可提高土壤的有效水含量;陈姣等^[24]研究发现,向红壤和水稻土中添加高量生物炭可提高有效水含量,而向潮土中添加低量生物炭则会降低有效水含量。而本试验采用定体积填装法发现,向粉壤土中添加蓄水陶土后在一定程度上降低有效含水量AWC,但采用其他填装方式及在不同类型土壤中有何效果还待进一步研究。因此,不同的土壤类型、不同改良剂添加量等均影响

土壤的有效水体积分数。空气容量AC可以反映土壤的透气性,添加蓄水陶土各处理相比于CK均提高了土壤的AC,改善土壤通气情况,增强土壤的透气性,对植物生长发育具有重要作用。添加蓄水陶土增加土壤孔隙体积分数,从而导致空气容量AC的增加。而VILLAGRA-MENDOZA等^[25]向砂土和砂壤土中添加生物炭后进行多次干湿交替处理后发现空气容量AC降低,干湿交替改变土壤的孔径分布,使得土壤中的小孔隙体积分数增加,从而降低空气容量。

各处理的比水容量值随着PF值的增加均呈先增大至一个峰值后又迅速下降的趋势,添加蓄水陶土各处理的峰值均大于CK,在低吸力段($PF < 1.5$),各处理的比水容量相比于CK均有提升,并且随着蓄水陶土添加量的增加,提升效果越明显,郑洪兵等^[26]研究秸秆还田对黑土比水容量的影响发现,添加秸秆也增加黑土的比水容量;ZHAO等^[27]研究表明,单独施加生物炭增加比水容量,而单独施加凹凸棒减小比水容量。添加蓄水陶土导致土壤体积质量降低,土壤的大孔隙含量增多,在低吸力段主要为大孔隙释水,随着吸力的增加,土壤大孔隙含量减少,土壤比水容量变化幅度降低最后各处理差距逐渐缩小。

添加蓄水陶土的各处理相对于CK比较,饱和导水率均得到提升。试验采用的土壤为粉壤土,质地较为黏重,土壤孔隙较小,加入蓄水陶土之后整体容重降低,土壤大孔隙体积增加,导致其饱和导水率升高。张皓钰等^[28]向几种质地黏重的土壤中添加生物炭后发现,其饱和导水率也出现升高的现象;而GHAZOUANI等^[29]发现,黄土粒径较粗,大孔隙较多,粒径较小的生物炭与土壤混合后阻塞土壤中大孔隙的连接通道,导致饱和导水率降低。

蓄水陶土和生物炭、沸石等其他土壤改良剂都是通过改变土壤结构从而增加土壤的持水能力,生物炭和沸石等土壤改良剂的改良效果受到自身理化性质、制备原料、制备工艺等因素的影响,而蓄水陶土由于自身丰富且特殊的孔隙结构,使其吸水能力优于其他的土壤改良剂,并且蓄水陶土自身稳定的孔隙结构也使得对土壤的透气性和导水率的提升也优于其他土壤改良剂。土壤改良效果受土壤类型、气候条件等多种因素影响,基于本试验研究结果,后期有待进一步探究蓄水陶土在不同类型土壤及长期定点定位等方面的改良效果。目前本试验主要集中于蓄水陶土对土壤渗蓄能力影响机制研究阶段,待探明蓄水陶土对黄土高原土壤渗蓄能力的影响机制后,有必要对蓄水陶土在实际应用中的可行性和经

济性进行讨论和评估。

4 结论

1)与CK相比,在相同吸力条件下添加蓄水陶土均提高土壤的持水性能,并且随着添加量和粒径的增加,提升效果也越好,最高达到11.38%

2)添加蓄水陶土导致 θ_s 值和 α 值增加, n 值减小,田间持水量和萎蔫系数均增加,L20处理增加最明显,L10处理的空气容量相对于CK增加最多。

3)添加蓄水陶土可显著增加土壤的饱和导水率。M粒径的蓄水陶土要比L粒径的蓄水陶土提升效果好,随着蓄水陶土添加量的增加,饱和导水率也随之增加。

4)添加蓄水陶土能够增加土壤的比水容量,并且使得裂隙孔、传输孔、残余孔的体积分数分别增加204.5%、70.4%、43.0%,而储存孔的体积分数减少9.5%。

综上所述,基于本试验结果综合考虑当蓄水陶土粒径为5~10 mm,添加量为20%时对粉壤土渗蓄能力改良效果最佳。蓄水陶土由于其丰富、特殊和稳定的孔隙结构,使其添加到粉壤土中可以增强土壤的持水能力和导水能力,延缓土壤径流所产生的时间,使得土壤径流减少从而缓解水土流失,以期为治理黄土高原水土流失提供一定的理论依据,对不同类型土壤渗蓄能力的影响还待进一步探究。

参考文献:

[1] 水利部.中国水土保持公报[R].北京:中华人民共和国水利部公报,2023.
Ministry of Water Resources. China soil and water conservation bulletin[R].BeiJing: Bulletin of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2023.

[2] 常艺蓉,马娟娟,孙西欢,等.上覆蓄水陶土层对黄土高原土壤水分入渗与蒸发的影响[J].水土保持学报,2022,36(6):101-109.
CHANG Y R, MA J J, SUN X H, et al. Effect of overlying water storage clay layer on soil water infiltration and evaporation on the Loess Plateau[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(6):101-109.

[3] 郑鹏,党廷辉,薛江.粉煤灰、砒砂岩对煤矿排土场土壤水分特性改良的研究[J].土壤学报,2023,60(2):399-408.
ZHENG P, DANG T H, XUE J. Experimental study on the improvement of soil moisture characteristics of coal mine dump by fly ash and arsenic sandstone[J].Acta Pedologica Sinica,2023,60(2):399-408.

[4] YIN C Y, ZHAO J, LIU X Y, et al. Effect of coal water slurry gasification slag on soil water physical characteristics and properties in saline-alkali soil improvement[J].Journal of

Sensors,2022,2022(1):e1114343.

[5] 吴军虎,刘侠,邵非凡,等.天然沸石对土壤水分运动特性及水稳性团聚体的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(4):34-41.
WU J H, LIU X, SHAO F F, et al. Effect of natural zeolite on soil water movement characteristics and water stability aggregates[J].Journal of Irrigation and Drainage, 2020,39(4):34-41.

[6] 李娜,耿玉清,赵新宇,等.生物炭和PAM混施影响煤矸石基质水分的入渗和蒸发[J].水土保持学报,2020,34(2):290-295.
LI N, GENG Y Q, ZHAO X Y, et al. Mixed application of biochar and PAM influences water infiltration and evaporation of coal gangue matrix[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(2):290-295.

[7] 索琳娜,马杰,刘宝存,等.土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J].农业环境科学学报,2021,40(6):1141-1149.
SUO L N, MA J, LIU B C, et al. Soil conditioner application status and application of risk research[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021,40(6):1141-1149.

[8] 柳骁桐,纪立东,孙权,等.炭基肥连续两年施用对土壤质量的影响[J].北方园艺,2021(7):96-103.
LIU X T, JI L D, SUN Q, et al. Effects of continuous application of carbon-based fertilizer on soil quality for two years[J].Northern Horticulture,2021(7):96-103.

[9] 蓝剑强.蓄水陶土材料的制备、性能及其应用研究[D].武汉:中国地质大学,2007.
LAN J Q. Study on preparation, properties and application of water storage clay materials[D].Wuhan: China University of Geosciences,2007.

[10] 谭凌智,安黛宗,萧劲东.蓄水陶土对雨水面源污染物的吸附性能研究[J].中国给水排水,2008,24(5):98-101.
TAN L Z, AN D Z, XIAO J D. Study on adsorption of rainwater non-point pollutants by water storage pottery clay[J]. China Water and Wastewater, 2008, 24(5): 98-101.

[11] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J].Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892-898.

[12] HARDIE M, CLOTHIER B, BOUND S, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability?[J].Plant and Soil,2014,376(1):347-361.

[13] GREENLAND D J. Soil damage by intensive arable cultivation: Temporary or permanent? [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, 1977,281(980):193-207.

[14] 林丽蓉,陈家宙,王峰,等.稻草覆盖对红壤旱坡地水力性质及水分状况的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(2):159-166.

- LIN L R, CHEN J Z, WANG F, et al. Effects of straw mulch on soil hydraulic properties and water status in sloping red soil farmlands [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 159-166.
- [15] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 等. 农膜残留对土壤水动力参数及土壤结构的影响 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 101-106.
- WANG Z C, LI X Y, SHI H B, et al. Effects of residual plastic film on soil hydrodynamic parameters and soil structure [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 101-106.
- [16] 闫辰啸, 洪明, 秦佳豪, 等. 生物炭对和田风沙土水力特性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(4): 21-28.
- YAN C X, HONG M, QIN J H, et al. Effects of biochar on hydraulic characteristics of aeolian sandy soil in Hetian [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(4): 21-28.
- [17] WU K Q, ZHAO W J, MA F, et al. Effect of biochar and attapulgite amendment on saline soil hydraulic parameters and shrinkage [J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2023, 42(3): ee14060.
- [18] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永毫, 等. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 101-104.
- WANG D D, ZHENG J Y, YAN Y H, et al. Effect of biochar application on soil water holding capacity in the southern region of Ningxia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 101-104.
- [19] GENUCHTEN M, LEIJ F, YATES S. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils [J]. 1992.
- [20] 张慧琦, 李子忠, 秦艳. 玉米秸秆生物炭用量对砂土孔隙和持水性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1272-1277.
- ZHANG H Q, LI Z Z, QIN Y. Effects of corn straw-based biochar amount on pores and water holding capacity of sandy soil [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(6): 1272-1277.
- [21] 陈晓燕, 陆桂华, 秦福兴, 等. 土壤传递函数法在确定田间持水量中的应用 [J]. *渤海大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(2): 170-172.
- CHEN X Y, LU G H, QIN F X, et al. Determination of field capacity with pedo-transfer functions method [J]. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 2005, 33(2): 170-172.
- [22] 安东, 李新平, 张永宏, 等. 不同土壤改良剂对碱积盐成土改良效果研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(5): 115-118.
- AN D, LI X P, ZHANG Y H, et al. Study on effect of different soil conditioners on water content and other characteristics of alkali soil [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(5): 115-118.
- [23] PEAKE L R, REID B J, TANG X Y. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils [J]. *Geoderma*, 2014, 235: 182-190.
- [24] 陈姣, 吴凤平, 王辉, 等. 生物炭对南方红壤和水稻土水力学特性的影响分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9): 73-80.
- CHEN J, WU F P, WANG H, et al. The effects of biochar amendment on hydraulic properties of red and paddy soils in southern China [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(9): 73-80.
- [25] VILLAGRA-MENDOZA K, HORN R. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils [J]. *Geoderma*, 2018, 326: 88-95.
- [26] 郑洪兵, 罗洋, 隋鹏祥, 等. 秸秆还田对东北黑土水分特征及物理性质的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(1): 226-236.
- ZHENG H B, LUO Y, SUI P X, et al. Effects of straw returning on soil water characteristics and physical properties of black soil in northeast China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(1): 226-236.
- [27] ZHAO W J, CAO T H, LI Z L, et al. Spatial variability of the parameters of soil-water characteristic curves in gravel-mulched fields [J]. *Water Supply*, 2020, 20(1): 231-239.
- [28] 张皓钰, 刘竞, 易军, 等. 生物炭短期添加对不同类型土壤水力性质的影响 [J]. *土壤*, 2022, 54(2): 396-405.
- ZHANG H Y, LIU J, YI J, et al. Effects of short-termed biochar application on hydraulic properties of different types of soils [J]. *Soils*, 2022, 54(2): 396-405.
- [29] GHAZOUANI H, IBRAHIMI K, AMAMI R, et al. Integrative effect of activated biochar to reduce water stress impact and enhance antioxidant capacity in crops [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: e166950.