

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.008.

潘加朋, 张克存, 安志山, 等. 基于黏土沙障的复配土壤对土壤水分特征影响对比分析[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 88-95.

Pan Jiapeng, Zhang Kecun, An Zhishan, et al. Comparative Analysis of the Effects of Compound Soil Based on Clay Sand Barrier on Soil Moisture Characteristics[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 88-95.

基于黏土沙障的复配土壤对土壤水分特征影响对比分析

潘加朋^{1,2,3}, 张克存¹, 安志山^{1,2}, 张宏雪^{1,2,3}, 薛承杰^{1,2,3}

(1.中国科学院 西北生态环境资源研究院 敦煌戈壁荒漠生态与环境研究站, 甘肃 敦煌 736200;

2.中国科学院 西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 研究基于黏土沙障的复配土壤在不同复配质量比下对土壤水分特征的影响, 旨在揭示其土壤改良效益, 为今后黏土沙障的设计提供最佳复配比。 [方法] 通过试验设计将各样品划分为空白组、对照组与试验组, 并分别对三组样品的土壤容重、水分常数及土壤水分特征曲线进行对比分析。 [结果] (1) 试验组样品土壤容重随复配土壤质量比(即复配比)的增加而减小, 相较于空白组, 当复配比为 5 : 1 时降低至 1.45 g/cm³, 对照组则降低至 1.32 g/cm³。 (2) 试验组样品的土壤饱和含水率在其复配比超过一定阈值时明显增加, 当复配比为 2 : 1 时相较于空白组升高了 0.97%, 同时, 其田间持水率与凋萎系数也相较于空白组整体分别升高 1.518%, 1.543%, 对照组两者上升则均超过 10%。 (3) Gardner 模型对三组样品模拟良好, 三者土壤含水率均随土壤水势增加而减小, 当土壤水势一定时, 试验组复配比的增加有效提高了复配土壤的含水率, 在土壤水势为 0.01~1.5 MPa 间不同质量比复配土壤平均增加了 1.32%~1.72%。 [结论] 基于黏土沙障的复配土壤其复配比的增加能有效提升土壤的持水力与保水性, 其有效含水量也明显上升, 对土壤改良明显。

关键词: 黏土沙障; 复配土壤; 土壤水分特征曲线; 土壤容重

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0088-08

Comparative Analysis of the Effects of Compound Soil Based on Clay Sand Barrier on Soil Moisture Characteristics

Pan Jiapeng^{1,2,3}, Zhang Kecun¹, An Zhishan^{1,2}, Zhang Hongxue^{1,2,3}, Xue Chengjie^{1,2,3}

(1. Dunhuang Gobi and Desert Ecological and Environmental Research Station, Northwest

Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Dunhuang, Gansu 736200, China;

2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese

Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The effects of compound soil based on clay sand barrier on soil water characteristics under different compound mass ratios were studied in order to reveal its soil improvement benefits and provide the best compound ratio for the design of clay sand barrier in the future. [Methods] The samples were divided into blank group, control group and experimental group by experimental design, and the soil bulk density, water constant and soil water characteristic curve of the three groups were compared and analyzed. [Results] (1) The soil bulk density of the experimental group decreased with the increase of the compound soil mass ratio (compounding ratio). Compared with the blank group, when the compound soil mass ratio was 5 : 1, it decreased to 1.45 g/cm³, while the control group decreased to 1.32 g/cm³. (2) The soil saturated water content of the sample in the experimental group increased significantly when the compound ratio exceeded a certain threshold. When the compound ratio was 2 : 1, it increased by 0.97% com-

收稿日期: 2023-02-16

修回日期: 2023-02-26

资助项目: 国家重点研发项目(2020YFA0608403-1); 国家自然科学基金项目(42171083); 甘肃省自然科学基金(22JR5RA066)

第一作者: 潘加朋(1999—), 男, 山西忻州人, 硕士, 主要从事风沙灾害与防沙工程研究。E-mail: panjiapeng@nieer.ac.cn

通信作者: 张克存(1978—), 男, 甘肃民勤人, 博士, 研究员, 主要从事风沙灾害与风沙工程研究。E-mail: kecunzh@lzb.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

pared with the blank group. At the same time, its field water holding rate and wilting coefficient increased by 1.518% and 1.543%, respectively, compared with the blank group, and increased by more than 10% compared with the control group. (3) The Gardner model simulated the three groups of samples well, and the soil moisture content of the three groups decreased with the increase of soil water potential. When the soil water potential was constant, the increase of the compound ratio of the experimental group effectively increased the water content of the compound soil. In the soil water potential of 0.01~1.5 MPa, the different mass ratios of the compound soil increased by an average of 1.32%~1.72%. [Conclusion] The increase of the compound ratio of the compound soil based on the clay sand barrier can effectively improve the water holding capacity and water retention of the soil, and the available water content also significantly increases, which is obvious for soil improvement.

Keywords:clay sand barrier; compound soil; soil bulk density; soil water characteristic curve

风沙治理工程一直以来都是进行荒漠化防治的重要手段之一,通过合理设置各类防沙工程,旨在对风沙起到封、固、阻、输、改、消的作用,从而抑制风沙灾害的发展^[1-3]。经过近两个世纪的发展与研究,当前,风沙治理工程主要由生物防沙工程、化学防沙工程及机械防沙工程 3 类组成,并在实践过程中发展出多种措施相结合的综合防沙措施,共同构成了完整的工程防沙体系^[1,4-7]。近年来,随着大量风沙治理工程的布设及与之相关研究的不断深入,已对各类防沙工程措施的固沙原理、防风阻沙与土壤改良效益等方面有了清晰的认识,其中,对具体风沙治理工程布设后当地土壤水分的特征进行对比分析也成为了当前研究的热点^[8-11]。

土壤水分是土壤理化性质的重要组成部分,同时也是判定风沙治理工程的土壤改良效益的重要指标,其变化特征直接影响了当地的土壤特性及植物生长,导致沙区植被系统格局发生改变,在一定程度上甚至能对当地气候产生显著影响^[12-14]。由于其对受风沙灾害袭击地区的生态恢复及重建意义重大,许多学者对草方格沙障、尼龙网格状沙障、柳条沙障等具体的风沙治理工程措施对土壤水分特征的影响进行了详尽的分析,并在其入渗特征、时空变化等方面进行了深入探究^[15-19]。但目前为止,在与黏土沙障相关的研究多集中于其防风固沙原理及效益,未对其土壤改良效益进行深入研究,特别是在关于土壤水分特征的影响研究中仅关注于其布设后对土壤水分含量的影响,且多集中于布设初期,鲜有研究对基于黏土沙障的复配土壤进行完整的土壤水分特征分析^[20-22]。据此,本文通过对基于黏土沙障复配土壤的容重、水分常数及特征进行对比分析,旨在揭示基于黏土沙障不同质量比复配土壤的土壤改良效益,同时为今后黏土沙障的设计与改良提供最佳复配比。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本次试验在中国科学院水利部水土保持研究所进行,试验所采用的沙子与黏土均来源于宁夏中卫沙坡头。在进行试验前对试验样品进行预处理,包括风干、研磨以及过 2 mm 筛,再依照 20 : 1,20 : 3,10 : 1,10 : 3,5 : 1,2 : 1 等不同质量比对沙子与黏土进行混匀后备用,并将其设置为试验组。另外,设置空白组与对照组,其中空白组样品为 300 g 沙子,对照组样品为 300 g 黏土,试验设计具体情况如表 1 所示。

表 1 不同复配土壤的复配质量比设计
Table 1 The compound mass ratio design of different compound soil

样品序号	沙子重/g	黏土重/g	质量比	
1	300	0		空白组
2	0	300		对照组
3	300	15	20 : 1	试验组
4	300	30	10 : 1	
5	300	45	20 : 3	
6	300	60	5 : 1	
7	300	90	10 : 3	
8	200	100	2 : 1	

1.2 研究方法

本试验采用离心机测定各组样品的土壤饱和重,单位为克,其为土壤全部饱和后的重量,即湿土重。各组样品首先分别装填在环刀内,再将环刀放置于试管中,最后将其分别放入离心机转头中。进行试验时温度恒定在 20℃,测定在各土壤水势下(0.001,0.005,0.01,0.02,0.04,0.06,0.08,0.1,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.5 MPa)各组样品的土壤饱和重,试验过程中,离心机的转速依次为 310,693,980,1 386,1 961,2 405,2 774,3 101,4 385,6 202,7 596,8 771,9 806,12 009 r/min,测定时间分别为 10,17,25,35,45,52,57,60,

70,76,82,87,90,95 min。此外,本试验利用烘干法对各组样品的烘干土重进行了测定。为保证试验数据准确可靠,各样品均进行3次重复试验,取其均值进行后续指标的计算并对其进行对比分析,即对基于黏土沙障的复配土壤的土壤容重、水分常数及土壤水分特征曲线三指标进行计算并对比分析,从而准确反映其对土壤水分特征的影响。

土壤容重一般是指一定容积下的土壤质量,是衡量土壤物理性质的重要指标之一,对土壤质量及生产力具有良好的指示作用,同时也能很好地反映土壤入渗性能与持水能力,是研究土壤水分特征的重要参考^[23-26]。本试验中,土壤容重采用环刀法进行测定,对现有研究中的公式进行推导,其计算式为^[27]:

$$\rho = \frac{100 \times [G_s - (G_t + G_c)]}{(100 + W) \times V} \quad (1)$$

式中: ρ 为土壤容重(g/cm^3); G_s 为土壤饱和重(环刀重+管重+湿土重)(g); G_t 为管重(g); G_c 为环刀重(g); V 为环刀体积(cm^3); W 为对应样品的土壤重量含水率(%)。

土壤水分常数主要由土壤饱和含水率、田间持水率与凋萎系数组成,是反映土壤水分状况、评价植物能有效吸收利用土壤水分程度的重要指标,测定并分析其数值对研究区域水文状况及当地土壤水分特征具有重要的参考意义^[28-30]。其中,土壤饱和含水率一般是指当土壤水势为0 MPa时的最大持水率,根据已有研究中的公式进行变换后计算,其计算式为^[31]:

$$\omega = \frac{G_s - (G_d + G_t)}{G_d - G_c} \quad (2)$$

式中: ω 为土壤饱和含水率(%) ; G_s 为土壤饱和重(g); G_d 为烘干土重(环刀重+干土重)(g); G_t 为管重(g); G_c 为环刀重(g)。

而田间持水率与凋萎系数则分别为有效含水量的上、下限,是估计植物水分需求量、评价土壤水分特征的重要参数^[28,32-33]。田间持水率利用环刀法测量,首先通过人为干预使样品含水量达到饱和,再将其重力水排出,最后对其含水率进行测定,所得结果即为田间持水率;凋萎系数则采用离心机法进行测定,即当土壤水势达1.5 MPa时所测得的土壤含水率为凋萎系数。

土壤水分特征曲线则是准确反映土壤水势与土壤含水率间的关系、研究土壤水分及溶质运移的重要参数,但由于土壤水分特征曲线影响因子较多,故一般采用经验模型对其进行分析^[34-35]。根据前人研究结合本研究特点,本试验的土壤水分特征曲线选取Gardner模型进行拟合,该模型能较好地反映复配土

壤的土壤水分特征曲线,其公式如下^[28,36]:

$$\theta = aS^{-b} \quad (3)$$

式中: θ 为土壤含水率(%); S 为土壤水势(MPa); a 与 b 为非线性回归系数。

2 结果与分析

2.1 土壤容重变化特征

由图1可知,不同质量比复配土壤的土壤容重间存在着较小差异,其土壤容重均在 $1.32 \sim 1.55 \text{ g}/\text{cm}^3$,其中,对照组土壤容重最小,为 $1.32 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。相较于对照组,试验组样品复配土壤的土壤容重下降幅度明显减小,但依旧表现为随复配土壤质量比(下文简称为复配比)增加而递减的趋势,并在样品6,即复配比为5:1时降低至 $1.45 \text{ g}/\text{cm}^3$,低于平均值,相较于空白组其土壤容重仍大幅降低。

一般来说,土壤容重越小表明土壤疏松、水热状况良好,由此可知复配土壤中黏土的质量对土壤容重影响深刻,试验组所添加的黏土质量与土壤改良效益呈正相关关系,土壤持水力与导水性也得到了有效提升^[26,37-38]。

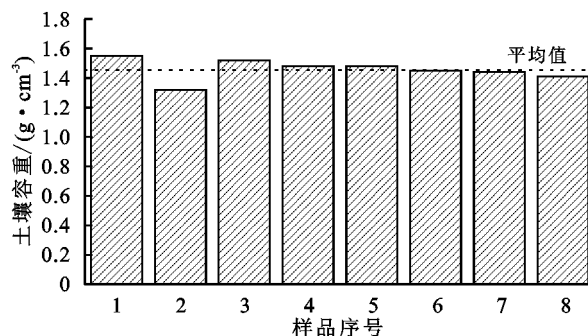


图1 不同质量比复配土壤的土壤容重

Fig. 1 Soil bulk density of different compound soil with different mass ratios

2.2 土壤水分常数

不同质量比复配土壤深刻影响了其土壤水分常数的变化趋势(图2),试验组与空白组样品间差异显著。分析图2A可知,当试验组样品中黏土添加的质量较少时,对复配土壤的土壤饱和含水率影响较小,整体上相较于空白组样品的土壤饱和含水率间的差异均小于1.5%,且当复配比为20:1~10:3时,试验组土壤饱和含水率均小于空白组。但当黏土添加的质量超过一定阈值后,其土壤饱和含水率明显升高,相较于空白组,试验组复配比为2:1时升高了0.97%,对照组升高了9.2%,土壤持水量显著提升。

图2B、C表示不同质量比复配土壤的田间持水率与凋萎系数变化情况,由图可知,当添加的黏土质量逐渐升高时,试验组样品的田间持水率与凋萎系数均表现为明显的上升趋势。具体来看,空白组样品田

间持水率仅为 5.120%，而试验组样品随着复配比的增加其田间持水率也随之上升，相较于空白组整体升高了 1.518%，当复配比为 2 : 1 时达到了最大值 8.512%；同时，相较于空白组，试验组凋萎系数也整体升高了 1.543%，复配比为 20 : 1~2 : 1 间其凋萎系数达到了 1.278%~4.084%，而空白组样品仅为 0.932%。进一步分析发现，对照组样品的田间持水率与凋萎系数相较于空白组升高幅度均高于 10%，

结合试验组复配比与两者的变化可知，黏土添加的比例直接影响了复配土壤的保水与蓄水能力与有效含水量，使其均明显提升。

综上分析，复配土壤的复配比越大，对土壤水分常数的影响就越为显著。这主要是由于黏土粒径一般为 0.005~0.05 mm，其粒径明显小于沙子，黏土的添加极大地改变了复配土壤的孔隙度，使得其土壤饱和含水率、有效含水量等显著增加，土壤改良效益明显^[32,39]。

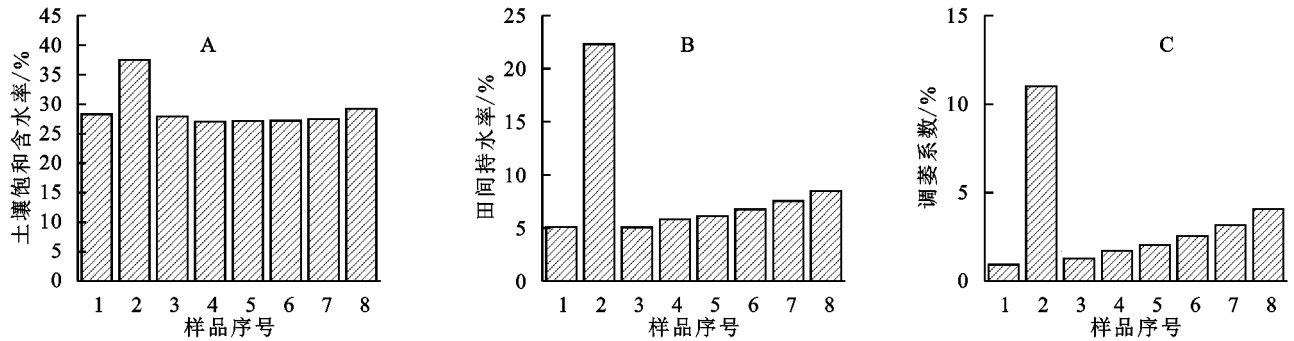


图 2 不同质量比复配土壤的土壤水分常数

Fig. 2 Soil moisture constants of different compound soils with different mass ratios

2.3 土壤水分特征曲线

图 3 为不同质量比复配土壤在 Gardner 模型下拟合的土壤水分特征曲线，拟合后空白组、对照组与试验组拟合系数均高于 0.9，拟合效果较佳。对其进行分析可知，空白组、对照组及试验组均表现为土壤含水率随土壤水势的增加而减小的趋势，其在土壤水势低于 0.1 MPa 时减小幅度较大，曲线较陡，随后随着土壤水势的增加逐渐变缓，试验中各组样品土壤水分特征曲线形状及变化趋势大致相似，但其土壤含水率在同一土壤水势下存在着明显差异。

随着试验组复配土壤质量比的增大，相同土壤水势下其土壤含水率明显增加。当土壤水势为 0.001 MPa、复配比为 2 : 1 时，其土壤含水率达到了 24.35%，相较于复配比为 20 : 1 时增加了 3.22%；当土壤水势为 1.5 MPa 时，复配比为 2 : 1 时其土壤含水率相较于其质量比 20 : 1 也增加了 2.8%，这表明当土壤水势一定时试验组样品中黏土质量的增加能有效提高复配土壤的含水率，使其保水能力显著提高。同时，相较于空白组，试验组样品除了复配比在 20 : 1~10 : 1，土壤水势低于 0.005 MPa 时其土壤含水率降低，其余均明显升高，在土壤水势为 0.01~1.5 MPa 间不同质量比复配土壤平均增加了 1.32%~1.72%，对照组则在土壤水势为 0.001~1.5 MPa 间平均升高达 11.34%。由此可知，黏土的持水、保水能力均显著强于沙子，随着复配土壤质量比的升高，其土壤含水量明显提高、土壤改良效益显著。

3 讨论

黏土沙障是一种以黏土与麦草为主要材料的机械防沙工程，主要通过增大地表粗糙度以实现防风固沙及土壤改良效益，在实际工程建设中，需土、用土量等是影响其效益的主要因素之一，故对基于黏土沙障复配土壤进行研究对其实际应用有着深远的意义^[20]。本研究通过试验设计分别对 3 组样品的土壤容重、水分常数及土壤水分特征曲线进行对比分析后发现，试验组的复配土壤随着复配比的增加其各项指标均与空白组表现出显著差异，而对照组数据进一步印证了复配土壤中黏土质量的增加能有效提高土壤的持水、保水及导水能力，土壤改良效益显著。张海欧等^[40]利用砒砂岩与风沙土进行复配后发现不同复配比的复配土壤结构差异较大，从而导致 WMD 值、有机质含量等变化，而本研究中，试验组复配土壤中黏土的添加也极大地改变了其原有的土壤结构，使得其土壤孔隙增大，从而导致其土壤水分与空白组差异明显，有效含水量显著提高。任健等^[41]学者在基于离心机法获取对定体积质量下的土壤水分特征曲线的研究中发现，由于离心机的转速有限，难以测得土壤水势较高的土壤含水率，从而导致土壤水分特征曲线的准确度受到影响，这与本试验中不同质量比复配土壤的土壤含水率随离心机测定时间与转速变化而变化且转速变化影响幅度较大相吻合。进一步研究发现，其复配比的增加还能有效抑制离心机转速对其土壤含水率的影响，印证了黏土质量的增加能有效提高土壤的保水能力、改良效益显著。

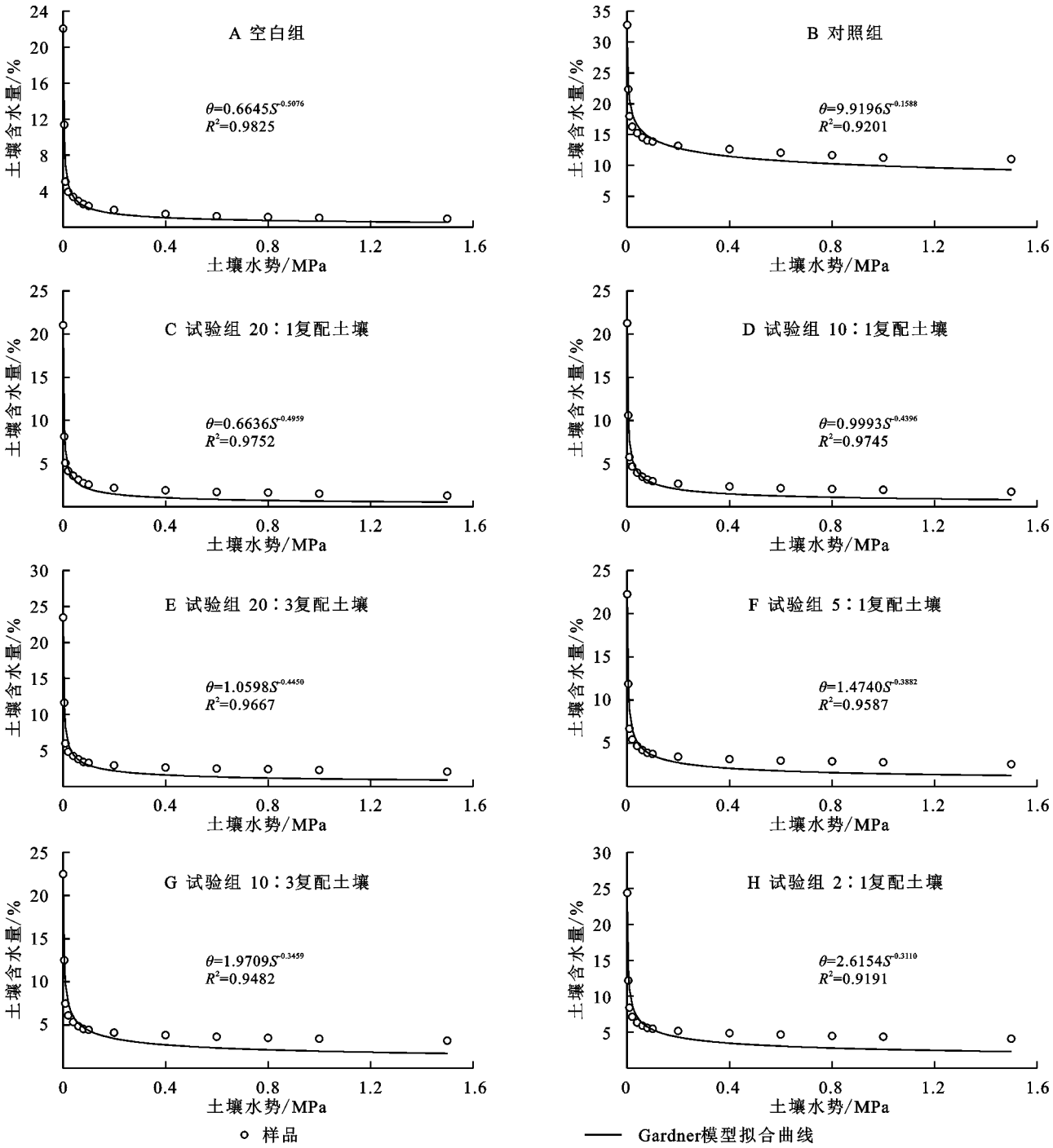


图 3 不同质量比复配土壤的土壤水分特征曲线

Fig. 3 Soil water characteristic curve of compound soil with different mass ratios

通过对基于黏土沙障复配土壤对土壤水分特征影响的研究是今后该类工程设计的重要参考,如何调控其复配比以达到最佳土壤改良效益也是当今研究的热点问题之一,而本研究在各类指标相结合的基础上对基于黏土沙障的复配土壤进行对比分析能有效的促进该问题的研究与发展。由于黏土沙障为我国独创的机械防沙措施,国外对其研究较少而国内研究则多集中于其防风固沙原理、效益,鲜有以其材料为研究对象、探究其对土壤水分特征的影响^[20,42]。故

本研究在对比分析基于黏土沙障不同质量比复配土壤对土壤水分特征影响的基础上,对其最适复配比进行探究,不仅为黏土沙障的设计与改良提供了指导,同时也为今后黏土沙障布设后的生态恢复予以参考。

4 结论

(1) 试验组样品随着复配比的增加其土壤容重相较于空白组大幅下降,当复配比为 5 : 1 时便下降至 1.45 g/cm³,低于平均值,对照组土壤容重更是降

低至 1.32 g/cm^3 , 复配土壤中黏土的比例深刻影响了土壤容重变化, 使其持水力与导水性明显提升; 同时, 当试验组黏土所添加的质量超过一定阈值后, 其土壤饱和含水率相较于空白组也明显上升, 当试验组复配比为 2:1 时升高了 0.97%, 田间持水率及凋萎系数也表现为随复配比升高而上升的趋势, 相较于空白组其整体分别升高 1.518%, 1.543%, 对照组也明显升高, 两者上升幅度均超过 10%, 黏土质量的增加使得复配土壤有效含水量、保水持水能力显著上升; 此外, Gardner 模型很好地模拟了空白组、对照组及试验组的土壤水分特征曲线, 三者土壤含水率均呈随土壤水势减小的趋势, 且在土壤水势低时变化幅度大, 随后逐渐变缓, 同时, 当土壤水势一定时, 试验组样品中黏土质量的增加能有效提高复配土壤的含水率, 在土壤水势为 0.01~1.5 MPa 间不同质量比复配土壤平均增加了 1.32%~1.72%, 对照组则在土壤水势为 0.001~1.5 MPa 间平均升高达 11.34%, 土壤含水量显著提高、改良效益明显。

(2) 本试验发现, 基于黏土沙障的复配土壤其复配比的增加能有效提升土壤的持水力与保水性, 其有效含水量也明显上升, 对土壤改良明显。但在具体的工程实践中, 应根据当地的现有条件选取适宜的复配比, 在保证工程可操作性与经济性的前提下尽可能增大其黏土添加的比例, 以达到最佳的土壤改良效益。

参考文献:

- [1] 刘贤万. 试验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- Liu X W. Experimental wind-sand physics and wind-sand engineering[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [2] 贾丽娜, 丁国栋, 吴斌, 等. 几种不同材料类型带状沙障防风阻沙效益对比研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 41-44.
- Jia L N, Ding G D, Wu B, et al. Effect of different material types of sand barrier on wind prevention and sand resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 41-44.
- [3] 王翔宇, 丁国栋, 高函, 等. 带状沙柳沙障的防风固沙效益研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 42-46.
- Wang X Y, Ding G D, Gao H, et al. Effect of zonal willow salix psammophila checkerboard on reducing wind and stabilizing sand[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 42-46.
- [4] 赖俊华, 张凯, 王维树, 等. 化学固沙材料研究进展及展望[J]. 中国沙漠, 2017, 37(4): 644-658.
- Lai J H, Zhang K, Wang W S, et al. Research advances and prospect in chemical sand-fixing material[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(4): 644-658.
- [5] 王涛. 中国风沙防治工程[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- Wang T. China sandstorm prevention and control project[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [6] 屈建军, 凌裕泉, 刘宝军, 等. 我国风沙防治工程研究现状及发展趋势[J]. 地球科学进展, 2019, 34(3): 225-231.
- Qu J J, Ling Y Q, Liu B J, et al. The research status and development trends of wing-sand engineering in China[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(3): 225-231.
- [7] 许林书, 许嘉巍. 沙障成林的固沙工程及生态效益研究[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 65-69.
- Xu L S, Xu J W. Sand-fixation project with forest sand-barrier and its ecological benefit[J]. Journal of Desert Research, 1996, 16(4): 65-69.
- [8] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究 50 a(II)[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 3-23.
- Dong Z B, Zheng X J. Research achievements in aeolian physics in China for last five decades(II)[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 3-23.
- [9] 孙涛, 刘虎俊, 朱国庆, 等. 3 种机械沙障防风固沙功能的时效性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 12-16, 22.
- Sun T, Liu H J, Zhu G Q, et al. Timeliness of reducing wind and stabilizing sand functions of three mechanical sand barriers in arid region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 12-16, 22.
- [10] 赵国平, 胡春元, 张勇, 等. 高立式沙柳沙障防风阻沙效益的研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 59-63.
- Zhao G P, Hu C Y, Zhang Y, et al. Studies on the effect of high salix deserts barrier on wind-breaking and sand-binding[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2006, 27(1): 59-63.
- [11] 李红悦, 哈斯额尔敦. 机械沙障固沙效应及生态效应的研究综述[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(1): 63-67.
- Li H Y, Hasi E. Sand-fixing effect and ecological effect of mechanical sand barriers: a review[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2020, 56(1): 63-67.
- [12] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
- He Q H, He Y H, Bao W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas[J]. Mountain Research, 2003, 21(2): 149-156.
- [13] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 等. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探

- 讨[J].中国科学:生命科学,2014,44(3):257-266.
- Li X R, Zhang Z S, Tan H J, et al. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert [J]. *Scientia Sinica(Vitae)*, 2014, 44(3): 257-266.
- [14] 王新平,康尔泗,张景光,等.草原化荒漠带人工固沙植丛区土壤水分动态[J].水科学进展,2004,15(2):216-222.
- Wang X P, Kang E S, Zhang J G, et al. Soil moisture dynamics in an artificially re-vegetated desert area[J]. *Advanced in Water Science*, 2004, 15(2): 216-222.
- [15] 展秀丽,严平,王宁,等.青海湖防沙工程措施区土壤水分及入渗特征初步研究[J].水土保持研究,2012,19(1):33-36.
- Zhan X L, Yan P, Wang N, et al. Preliminary study on soil water and permeability characteristics of desertification combating areas exerted by engineering measures around Qinghai Lake[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(1): 33-36.
- [16] 张圆,李芳,屈建军,等.机械沙障组合对土壤含水量及温度的影响[J].中国沙漠,2016,36(6):1533-1538.
- Zhang Y, Li F, Qu J J, et al. Effect of sand barrier combinations on the water content and temperature of soil[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(6): 1533-1538.
- [17] 王睿,周立华,陈勇,等.库布齐沙漠机械防沙措施的防护效益[J].干旱区研究,2017,34(2):330-336.
- Wang R, Zhou L H, Chen Y, et al. Wind-blown sand control effect of sand barriers used in the Hobq Desert [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(2): 330-336.
- [18] 李敏岚,屈建军,唐希明,等.高密度聚乙烯(HDPE)蜂巢式沙障对土壤水分的影响[J].中国沙漠,2020,40(1):136-144.
- Li M L, Qu J J, Tang X M, et al. Influence of HDPE honeycomb sand fixation on soil moisture[J]. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(1): 136-144.
- [19] 展秀丽,严平,杨典正,等.内蒙古巴图湾水库库区不同沙障设置初期植物与土壤特征研究[J].水土保持研究,2011,18(1):61-65,70.
- Zhan X L, Yan P, Yang D Z, et al. Study on the characteristics of vegetation and soil in different sand-barriers around Batuwán reservoir area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(1): 61-65, 70.
- [20] 乔宇.民勤绿洲边缘黏土沙障生态水文效应研究[D].北京:中国林业科学研究院,2015.
- Qiao Y. Eco-hydrological effects of clay sand barrier in minqin oasis fringe[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [21] 马青江,耿生莲.流沙沙障防护效益研究[J].青海农林科技,2002(2):10-11.
- Ma Q J, Geng S L. Study on protection benefit of quicksand barrier[J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2002(2): 10-11.
- [22] 马瑞,刘虎俊,马彦军,等.沙源供给条件对机械沙障固沙作用的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):105-108,114.
- Ma R, Liu H J, Ma Y J, et al. Influences of sand fountain on sand-fixation of mechanical sand barriers [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(5): 105-108, 114.
- [23] 李潮海,周顺利.土壤容重对玉米苗期生长的影响[J].华北农学报,1994,9(2):49-54.
- Li C H, Zhou S L. Influence of volume weight of soil on maize seedlings growth[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 1994, 9(2): 49-54.
- [24] 孙建,刘苗,李立军,等.不同施肥处理对土壤理化性质的影响[J].华北农学报,2010,25(4):221-225.
- Sun J, Liu M, Li L J, et al. The effect of different fertilization treatments on soil physical and chemical property[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2010, 25(4): 221-225.
- [25] 柴华,何念鹏.中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义[J].生态学报,2016,36(13):3903-3910.
- Chai H, He N P. Evaluation of soil bulk density in Chinese terrestrial ecosystems for determination of soil carbon storage on a regional scale[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [26] Elsa S, Christian R, Hugo R, et al. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils[J]. *Geoderma*, 2011, 163(1): 74-82.
- [27] 江胜国.国内土壤容重测定方法综述[J].湖北农业科学,2019,58(S2):82-86,91.
- Jiang S G. Review on soil bulk density determination method [J]. *Hubei Agriculture Sciences*, 2019, 58(S2): 82-86, 91.
- [28] 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.
- Yang X, Zhao T C, Wang F, et al. Water retention characteristics of typical soils in southwestern Guizhou province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(7): 35-42.
- [29] 宁婷,郭忠升,李耀林.黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J].水土保持学报,2014,28(3):166-170.
- Ning T, Guo Z S, Li Y L. Soil water characteristic

- curves and soil water constants at different depths in the abandoned sloping field of loess hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 166-170.
- [30] 毛云玲,王鹏云,曾艳,等.昆明市土壤水分常数特征分析[J].西部林业科学,2011,40(2):64-68.
Mao Y L, Wang P Y, Zeng Y, et al. Analysis of index of soil water from Kunming city[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2011, 40(2): 64-68.
- [31] 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.
Zou W A, Jiang B, Gu L H. Measurement of soil moisture constants[J]. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(4): 62-66.
- [32] Dahiya I S, 孙耀邦,冯延茹,等.根据土壤饱和含水率测定其田间持水量、凋萎点和有效持水量的统计方程[J].土壤学进展,1990(6):47-49.
I. S. Dahiya, Sun Y B, Feng Y R, et al. The statistical equations of field water holding capacity, wilting point and effective water holding capacity were determined according to soil saturated water content[J]. *Progress in Soil Science*, 1990(6): 47-49.
- [33] Jiang R, Li T, Jia Z, et al. Determining soil available water capacity and reasonable irrigation volume in dryland pasture[J]. *Water*, 2022, 14(17): 2760.
- [34] 张鹏飞,贾小旭,赵春雷,等.初始容重对土壤水分特征曲线的影响[J].干旱区研究,2022,39(4):1174-1180.
Zhang P F, Jia X X, Zhao C L, et al. Effects of initial bulk density on soil water characteristic curve[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(4): 1174-1180.
- [35] 湛江,李志萍,于小朋.黄河下游冲积平原典型区包气带土壤水分特征曲线的模型优选[J].人民黄河,2022, 44(12): 147-153.
Zhan J, Li Z P, Yu X P. Model optimization of soil water characteristic curve of the vadose zone in a typical area of alluvial plain in the lower Yellow River[J]. *Yellow River*, 2022, 44(12): 147-153.
- [36] 汪怡珂,罗昔联,花东文,等.毛乌素沙地复配土壤水分特征曲线模型筛选研究[J].干旱区资源与环境,2019, 33(6): 167-173.
Wang Y K, Luo X L, Hua D W, et al. Screening of water characteristic curve model based on different mass ratios of feldspathic sandstone and sand compound soil[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(6): 167-173.
- [37] 王翔宇,张进虎,丁国栋,等.沙地土壤水分特征及水分时空动态分析[J].水土保持学报,2008,22(6):222-227.
Wang X Y, Zhang J H, Ding G D, et al. Study on the temporal and special change of soil water content and soil moisture characteristics of sandy land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 222-227.
- [38] 鲁瑞洁,唐清亮,桑艳礼,等.青海湖克土沙区不同类型沙丘土壤水分的动态变化[J].水土保持研究,2012, 19(2): 111-115.
Lu R J, Tang Q L, Sang Y L, et al. Dynamic changes of soil moisture in different dunes of Ketu sand land in Qinghai Lake basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(2): 111-115.
- [39] 赵智,唐泽军,宋满刚,等.粉煤灰和PAM改良沙土物理性质田间试验[J].水土保持学报,2013,27(3):178-183.
Zhao Z, Tang Z J, Song M G, et al. An field trial of polyacrylamide and fly ash for modifying physical properties of sandy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 178-183.
- [40] 张海欧,王健,孙小梅.毛乌素沙地砒砂岩改良风沙土后土壤质量的演变[J].水土保持通报,2021,41(4):33-38.
Zhang H O, Wang J, Sun X M. Quality evolution after aeolian sandy soil improved by feldspathic sandstone in Mu Us sandy land[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(4): 33-38.
- [41] 任健,张吴平,王国芳,等.基于离心机法获取定体积质量下的土壤水分特征曲线[J].灌溉排水学报,2020, 39(1): 84-90.
Ren J, Zhang W P, Wang G H, et al. Method to adjust the soil water retention curve measured using centrifuge apparatus[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(1): 84-90.
- [42] 常兆丰,仲生年,韩福桂,等.黏土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究[J].中国沙漠,2000,20(4):111-113.
Chang Z F, Zhong S N, Han F G, et al. Research of the suitable row spacing on clay barriers and straw barriers[J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(4): 111-113.