

# 适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性

摄晓燕<sup>1</sup>, 张兴昌<sup>1,2</sup>, 魏孝荣<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 该文研究了不同砒砂岩改良风沙土模式下的土壤入渗特征、饱和导水率和水分特征曲线, 分析了不同模型对砒砂岩改良风沙土水分特征曲线的适用性和不同改良模式的土壤水力学特征, 以期评价砒砂岩改良风沙土水力学特性以及筛选合理改良模式提供科学依据。结果表明: 砒砂岩可以有效降低风沙土的入渗率和饱和导水率, 增加风沙土的饱和含水量和滞留含水量, 增强风沙土的持水能力。VGM ( $m, n$ ) 模型可以拟合砒砂岩改良风沙土土壤水分特征曲线。同一改良模式下, 土壤的入渗率、饱和导水率和饱和含水量随容重增大呈减小趋势; 容积含水量在低吸力段随容重增大逐渐减小, 在中高吸力段逐渐增大。砒砂岩和风沙土以 25 : 75 比例混合的复配模式, 可以有效改良风沙土的吸水和保水特性, 可在实践中推广。

**关键词:** 土壤; 水分; 入渗; 砒砂岩; 风沙土; 饱和导水率; 土壤水分特征曲线

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.14.015

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-14-0115-09

摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 115 - 123.  
She Xiaoyan, Zhang Xingchang, Wei Xiaorong. Improvement of water absorbing and holding capacities of sandy soil by appropriate amount of soft rock[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(14): 115 - 123. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

晋陕蒙能源区是中国特大型煤炭化工基地, 总面积  $5.44 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 在中国国土资源规划中有着重要地位。近年来, 随着能源的不断开采, 土地可利用面积减小, 土壤结构破坏, 严重影响到区域生态系统的结构和其社会服务功能。该区土壤类型主要为风沙土和黄绵土, 风沙土质地疏松, 结构性和保水保肥性差, 养分含量低, 极易发生水土流失<sup>[1]</sup>。近年来煤炭资源的大量开采和过度放牧, 使该区土地沙漠化日趋严重。此外, 晋陕蒙能源区有 1/3 的面积分布着砒砂岩。砒砂岩成岩程度低, 砂粒间胶结作用弱, 结构性差, 无水时坚硬如石, 过度吸水又会松软如泥, 水土流失严重, 植物难以生长, 治理难度大, 是该区生态恢复的主要障碍<sup>[2]</sup>。

近年来, 一些学者利用砒砂岩和风沙土性质上的互补性, 尝试将砒砂岩和风沙土复配, 以达到改良风沙土的目的<sup>[3-4]</sup>。罗林涛等<sup>[3]</sup>研究表明, 风沙土

中混入砒砂岩可以有效促进风沙土 0~40 cm 土层无机氮累积, 提高玉米产量, 而且砒砂岩和风沙土按 1 : 2 复配的效果较好; 柴苗苗等<sup>[4]</sup>发现, 砒砂岩和风沙土复配后土壤耕层的水稳性团聚体含量明显增加, 保肥性增强。这些研究主要集中在土壤肥力和作物产量等方面, 但晋陕蒙能源区年降水量远小于年蒸发量, 生态系统主要受水分有效性限制, 对土壤水分有效性变化响应应非常敏感。砒砂岩改良风沙土后的吸水和保水等水力学性质显著影响着风沙土改良效果的发挥。另一方面, 风沙土改良过程中砒砂岩的搬运及其与风沙土的混合需要大型机械来操作, 将对改良风沙土的容重产生影响<sup>[5]</sup>, 并改变土壤的孔隙度和孔隙分布<sup>[6]</sup>, 从而影响土壤导水<sup>[7]</sup>、入渗<sup>[8-9]</sup>、持水<sup>[10]</sup>等水力学性质, 因此在研究砒砂岩改良风沙土水力学性质时需要考虑容重的影响。通过研究不同紧实度梯度下砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特征, 不但可以明确砒砂岩改良风沙土的机理, 而且可以对改良风沙土的水力学性质和水分有效性进行准确预测, 从而对改良效果作出科学的评价。

土壤水分特征曲线是描述土壤水力学性质的重要指标, 目前对土壤水分特征曲线的研究, 多以纯土壤为研究对象, 并且建立了不同的适用模型<sup>[11]</sup>。但砒砂岩改良风沙土是一种岩土混合物质, 现有的土壤水分特征曲线模型在改良风沙土上的

收稿日期: 2014-02-11 修订日期: 2014-07-10

基金项目: 中国科学院西部行动计划 (KZCX2-XB3-13-02); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-13-0487)

作者简介: 摄晓燕 (1983 - ), 女, 山西岢岚人, 博士, 主要从事水土保持与生态恢复方面的研究。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。Email: sxy0418@163.com

通信作者: 张兴昌 (1965 - ), 男, 陕西武功人, 博士生导师, 主要从事环境保护与生态修复方面的研究。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。Email: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

适用性尚不清楚。因此,确定不同土壤水分特征曲线模型对砒砂岩改良风沙土的适用性,是分析砒砂岩改良风沙土吸水和保水特性的重要理论基础。

本研究以晋陕蒙能源区的风沙土和砒砂岩为材料,通过测定不同比例的砒砂岩和风沙土复配模式的土壤水分特征曲线、导水率和入渗过程,分析了不同模型对改良风沙土水分特征曲线的适用性和不同改良模式的吸水和保水特性,以期对砒砂岩改良风沙土的水力学特性评价以及合理改良模式的筛选提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

本试验选取的风沙土采自内蒙古准格尔旗大路镇(40°2'44"N,111°22'14"E)。砒砂岩采自内蒙古准格尔旗暖水乡砒砂岩风景区内(39°44'23"N,110°34'34"E)。风沙土和砒砂岩样品风干后,粉碎通过 2 mm 筛孔备用。风沙土和砒砂岩样品中的矿物组成用粉晶 X 射线衍射仪(D/MAX-2600pc)进行分析(表 1)。

表 1 试验样品的矿物组成  
Table 1 Mineral composition of samples

试验样品 Samples	矿物组成质量百分数 Mass percentage of mineral composition/%						
	石英 Quartz	高岭石 Kaolinite	蒙脱石 Montmorillonite	长石 Feldspar	方解石 Calcite	白云石 Dolomite	闪石 Amphibole
风沙土 Sandy soil	82	4	0	10	2	0	2
砒砂岩 Soft rock	57	0	30	10	0	3	0

### 1.2 试验设计

为研究不同用量的砒砂岩对风沙土的改良效果,本试验复配了 0 100, 25 75, 50 50, 75 25 和 100 0(烘干质量比)5 个不同比例的砒砂岩和风沙土混合改良模式,0 100 和 100 0 处理容重为 1.60 和 1.30 g/cm<sup>3</sup>,其余 3 个处理设计 3 个容重梯度,每个处理的各容重梯度均重复 3 次。试验中由于砒砂岩的密度比风沙土小,所以在同一紧实度水平上,随着砒砂岩含量的增加,复配土壤的容重逐渐减小。前期的预填装试验发现,不同改良模式按表 2 所示容重进行环刀和土柱填装,可达到相近的紧实度,故本研究中 3 个复配模式的容重按表 2 进行填装。

表 2 各改良模式设定的土壤容重  
Table 2 Designed bulk density of each modified model

编号 Number	容重 Bulk density/(g·cm <sup>-3</sup> )	
A	A1	1.45
	A2	1.50
	A3	1.55
B	B1	1.38
	B2	1.44
	B3	1.49
C	C1	1.25
	C2	1.30
	C3	1.35

注: A (A1, A2, A3) B (B1, B2, B3) C (C1, C2, C3) 分别表示砒砂岩和风沙土复配比例为 25 75、50 50、75 25; 下同。  
Note: A (A1, A2, A3), B (B1, B2, B3) and C (C1, C2, C3) represent the compound proportions of soft rock and sandy soil of 25:75, 50:50 and 75:25, respectively; Same as below.

风沙土处理 0 100 按野外实测容重 1.60 g/cm<sup>3</sup> 进行填装(CK1)。砒砂岩实测容重为 1.55 g/cm<sup>3</sup>, 但预填装试验中发现,当砒砂岩的容重大于

1.30 g/cm<sup>3</sup> 时,填装后的环刀或土柱浸水后,由于砒砂岩膨胀土壤有所损失或体积发生变化。所以本试验对纯砒砂岩处理 100 0 按容重 1.30 g/cm<sup>3</sup> 进行填装(CK2)。

### 1.3 试验方法

1) 各改良模式的土壤颗粒组成采用吸管法测定<sup>[12]</sup>。

2) 入渗试验采用一维定水头垂直入渗法测定<sup>[13]</sup>: 选用内径 5 cm, 高 35 cm 的有机玻璃柱进行,装土土柱底部放置纱布和滤纸,土柱分层填装,装土到 25 cm 处。采用内径为 5 cm 的马氏瓶供水,供水水头控制在 3 cm 左右,试验过程中室内温度(22±1)。

3) 饱和导水率采用定水头法测定,达西定律计算,并换算为 10 时的饱和导水率<sup>[14]</sup>。

4) 土壤水分特征曲线用离心法测定<sup>[15]</sup>,使用日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 高速恒温冷冻离心机进行测定,测定时控制温度在 20 。

#### 5) 水分特征曲线的拟合模型

本研究利用 RETC 软件对土壤水分特征曲线进行拟合。RETC 软件中包含 8 个由 4 个水分特征曲线模型和 2 个导水率模型(理论模型)组成的不同的土壤水分特征曲线拟合模型。4 个水分特征曲线模型分别是 Brooks and Corey 模型(BC 模型)<sup>[16]</sup>、van Genuchten 模型(VG 模型)<sup>[17]</sup>、Log-Normal Distribution 模型(LND 模型)<sup>[18]</sup>和 Dual Porosity 模型(DP 模型)<sup>[19]</sup>;导水率拟合模型为 Burdine 模型<sup>[20]</sup>和 Mualem 模型<sup>[21]</sup>。各模型的描述分别见参考文献[16-21]。

8 个模型分别是通过 Burdine 模型与 BC 模型、

VG 模型 ( $m, n$  为不相关参数或  $m=1-2/n$ ) 匹配以及 Mualem 模型与 BC 模型、VG 模型 ( $m, n$  为不相关参数或  $m=1-1/n$ )、LND 模型及 DP 模型匹配来获得的。8 个模型相应的简称为 BCB、VGB( $m, n$ )、VGB( $m=1-2/n$ )、BCM、VGM( $m, n$ )、VGM( $m=1-1/n$ )、LNDM 和 DPM<sup>[11]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用 RETC 软件进行土壤水分特征曲线拟合，用 SPSS 16.0 进行方差分析和线性回归分析，采用 Excel 2007 作图。

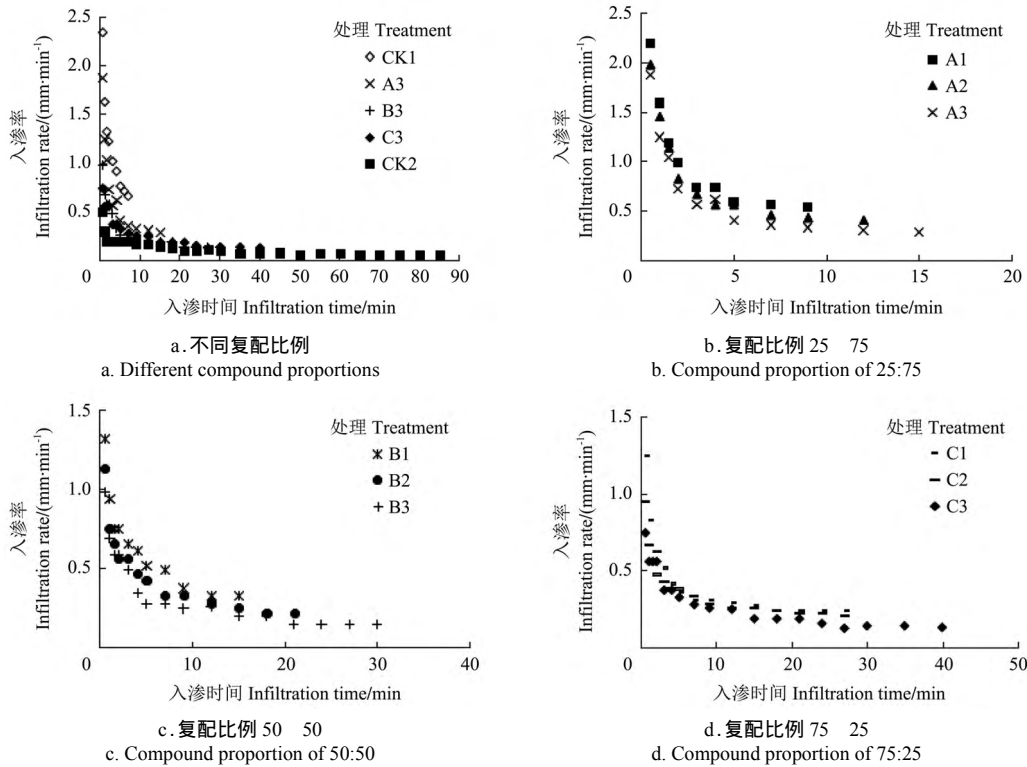
## 2 结果与分析

### 2.1 不同改良模式对土壤入渗特征的影响

各处理土壤的入渗率均随时间延长而逐渐变小，最后趋于稳定（图 1），而且各处理中风沙土的入渗率最大，随时间延长减小最快，湿润峰行进到土柱底部时所用时间最短（7 min）；砒砂岩入渗率

最小，随时间变化最缓，湿润峰行进到土柱底部时所用时间最长（85 min）。本研究中风沙土的稳定入渗率为 0.66 mm/min，是砒砂岩的 11 倍。随着砒砂岩混入量的增加，改良土壤的入渗率呈减小趋势，达到稳定入渗所需时间逐渐延长，这是因为风沙土中砂粒含量较高，大孔隙数量增多，促进水分在土体中的入渗。

改良土壤入渗特征还受填装容重的影响，随土壤容重的增大，不同改良模式土壤入渗率均呈减小趋势，达到稳定入渗所需时间变长（图 1b、c、d）。本研究中，随着容重的增大，砒砂岩和风沙土 25 : 75 复配模式稳定入渗率较风沙土减小了 17.41%~55.52%，50 : 50 复配模式减小了 50.12%~77.83%，75 : 25 复配模式减小了 63.52%~80.36%。这是由于随着土壤容重的增大，大孔隙数量逐渐减少，水分在土体中的入渗过程受阻，入渗率因此减小，这与李卓等<sup>[9]</sup>的研究结果一致。



注：CK1 和 CK2 分别表示砒砂岩和风沙土复配比例为 0 : 100 和 100 : 0；A1、A2、A3 表示砒砂岩和风沙土复配比例为 25 : 75 时土壤容重分别为 1.45、1.50 和 1.55 g/cm<sup>3</sup> 的处理；B1、B2、B3 表示砒砂岩和风沙土复配比例为 50 : 50 时土壤容重分别为 1.38、1.44 和 1.49 g/cm<sup>3</sup> 的处理；C1、C2、C3 表示砒砂岩和风沙土复配比例为 75 : 25 时土壤容重分别为 1.25、1.30 和 1.35 g/cm<sup>3</sup> 的处理；下同。  
 Note: CK1 and CK2 represent compound proportions of soft rock and sandy soil of 0:100 and 100:0, respectively; A1-A3 represent the proportion of soft rock and sandy soil of 25:75, and bulk densities of A1, A2 and A3 are 1.45, 1.50 and 1.55 g/cm<sup>3</sup>, respectively; B1-B3 represent the proportion of soft rock and sandy soil of 50:50, and bulk densities of B1, B2 and B3 are 1.38, 1.44 and 1.49 g/cm<sup>3</sup>, respectively; C1-C3 represent the proportion of soft rock and sandy soil of 75:25, and bulk densities of C1, C2 and C3 are 1.25, 1.30 and 1.35 g/cm<sup>3</sup>, respectively; Same as below.

图 1 砒砂岩和风沙土不同复配比例下土壤入渗率随入渗时间的变化

Fig.1 Change of soil infiltration rate with infiltration time for each treatment under different compound proportions of soft rock and sandy soil

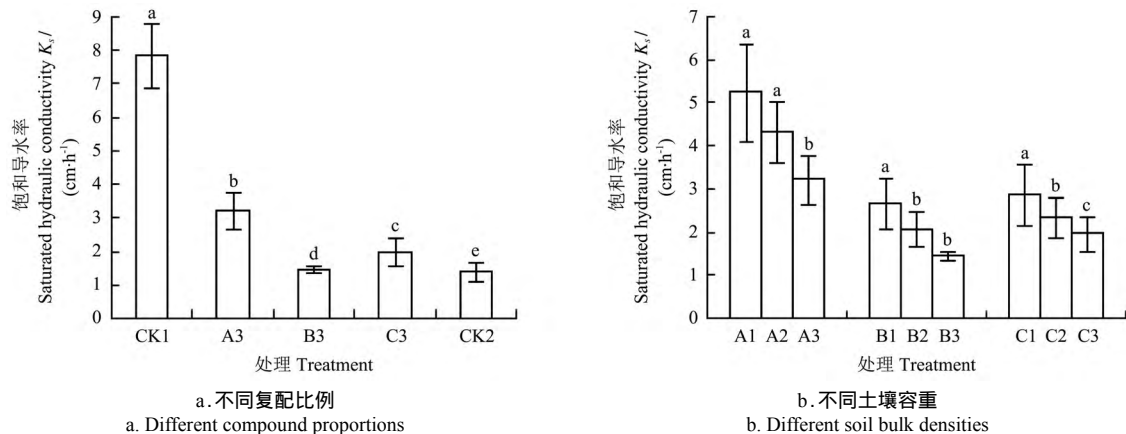
### 2.2 不同改良模式对土壤饱和导水率的影响

本研究中砒砂岩饱和导水率 ( $K_s$ ) 最小，风沙土最大，是砒砂岩的 5.6 倍（图 2a）。这是因为风

沙土砂粒含量高，大孔隙多，其  $K_s$  较高；砒砂岩砂粒含量少，同时砒砂岩中含 30% 的蒙脱石，具有不稳定团粒结构会遇水崩解，细的颗粒会阻塞较大孔

隙的连接通道<sup>[22]</sup>, 其  $K_s$  较小。砒砂岩混入到风沙土后, 混合介质中砂粒含量减小, 粉粒和黏粒含量

增加(表 3), 显著降低改良土壤的  $K_s$  (图 2)。且随砒砂岩混入量的增加, 改良风沙土的  $K_s$  逐渐降低。



注: 不同小写字母表示在 95% 的置信区间下差异显著。  
Note: Different lower cases mean significant at 95%.

图 2 砒砂岩和风沙土不同复配比例下的样品饱和导水率

Fig.2 Saturated hydraulic conductivity for each treatment under different compound proportions of soft rock and sandy soil

表 3 各处理样品的颗粒组成

Table 3 Particle composition of each treatment

处理 Treatment	颗粒组成 Particle composition/%			质地 Texture
	0.05 mm	>0.002 ~ 0.05 mm	0.002 mm	
CK1	87.54	5.27	7.18	砂土
A	78.88	5.71	15.41	砂壤
B	70.25	8.74	21.01	砂壤
C	60.85	12.74	26.41	砂黏壤
CK2	51.11	18.66	30.22	砂黏壤

注: CK1、A、B、C 和 CK2 分别表示砒砂岩和风沙土复配比例为 0:100、25:75、50:50、75:25 和 100:0; 美国制分级标准。

Note: CK1, A, B, C and CK2 represent the compound proportions of soft rock and sandy soil of 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 and 100:0, respectively; Classification uses American system.

对于同一砒砂岩-风沙土比例的复配土壤, 随着容重的增大,  $K_s$  呈减小趋势, 并且在不同的容重梯度下, 降低幅度不同(图 2b)。这是由于随着土壤容重的增加, 土壤大孔隙数量急剧减少而造成的, 这与吕殿青等<sup>[7]</sup>对变容重下土壤水力学性质的研究结果一致。

本研究中砒砂岩和风沙土为 25:75 改良模式的饱和导水率显著高于 50:50 和 75:25 模式, 而且其平均饱和导水率与黄土高原地区典型黄绵土自然状况下的饱和导水率接近<sup>[23]</sup>, 介于 3.2 ~ 5.3  $\text{cm}/\text{h}$  之间(图 2b), 表明该模式对风沙土饱和导水率的改良效果接近黄绵土。但是不同改良模式中最低的饱和导水率出现在 50:50 处理, 这与王慧芳等<sup>[24]</sup>对风化程度较高的粉泥页岩混入到土壤后饱和导水率变化趋势的研究结果相似。

## 2.3 不同改良模式下的土壤水分特征曲线

### 2.3.1 不同改良模式下土壤水分特征曲线模型的选取

本研究表明, RETC 软件中包含的 8 个模型均

可以用来拟合砒砂岩、风沙土以及砒砂岩和风沙土复配土壤的水分特征曲线, 但是拟合效果因改良模式的不同而相异(表 4)。这 8 个模型在风沙土和砒砂岩上的拟合效果优于复配土壤。如各个模型拟合的  $R^2$  和  $F$  值多在风沙土和砒砂岩上较大, 在不同砒砂岩改良风沙土模式处理中较小。

本研究所用到的 8 种模型中, VGM ( $m, n$ ) 和 DPM 模型对风沙土、砒砂岩以及复配土壤水分特征曲线的拟合效果较好, 且复配土壤中 VGM ( $m, n$ ) 模型的拟合效果略优于 DPM 模型。LNDM、BCM 和 BCB 模型的拟合效果较差。如对于 3 种改良模式来说, VGM ( $m, n$ ) 模型具有较高的  $F$  值(分别为 6 683, 5 760 和 5 119), 而 BCM 和 BCB 模型拟合的  $F$  值不到 VGM ( $m, n$ ) 的 20%。对于纯风沙土和砒砂岩来说, VGM ( $m, n$ ) 和 DPM 模型拟合的  $F$  值也远大于其他模型。因此推荐利用 VGM ( $m, n$ ) 模型对砒砂岩改良风沙土土壤水分特征曲线进行拟合。

### 2.3.2 不同改良模式的土壤水分特征曲线

砒砂岩含量显著影响改良后土壤的水分特征曲线(图 3)。受土壤质地的影响, 风沙土在各吸力段的持水量均小于砒砂岩。如饱和含水量  $\theta_s$  和滞留含水量  $\theta_r$  均以风沙土最小, 砒砂岩最大。随着砒砂岩混入量的增加, 同一吸力水平下复配土壤的含水量呈增加趋势, 而且特别是在低吸力段增加效果更为明显(图 3, 表 5)。随砒砂岩混入量的增加, 改良土壤饱和含水量和滞留含水量均显著增加 ( $P < 0.01$ ), 这与砒砂岩混入后土壤中粉粒和黏粒含量增加有关。土壤中黏粒含量越多, 细小孔隙和总孔隙越多, 而且土壤的比表面积越大, 对水分的吸附

能力也越强<sup>[25]</sup>，复配土壤的持水能力有所增加。同时，不同处理土壤水分特征曲线还与黏土矿物类型有关，随砒砂岩含量的增加，2 1 型胀缩性黏土矿

物蒙脱石的比例逐渐增加，介质吸水和持水能力增强，同一吸力下介质中所保持的水分含量也因此增加。

表 4 不同处理各模型拟合的统计特征值  
Table 4 Statistic values of fitting by various models for each treatment

处理 Treatment	VGM ( <i>m, n</i> )				VGM ( <i>m=1-1/n</i> )				VGB ( <i>m, n</i> )				VGB ( <i>m=1-2/n</i> )			
	判定系数 $R^2$	残差平方和 RSS	F 值 $F$ value	P 值 $P$ value	判定系数 $R^2$	残差平方和 RSS	F 值 $F$ value	P 值 $P$ value	判定系数 $R^2$	残差平方和 RSS	F 值 $F$ value	P 值 $P$ value	判定系数 $R^2$	残差平方和 RSS	F 值 $F$ value	P 值 $P$ value
CK1	0.9995	0.0001	18312	<0.01	0.9983	0.0003	5330	<0.01	0.9995	0.0001	18312	<0.01	0.9994	0.0001	15468	<0.01
A3	0.9986	0.0002	6683	<0.01	0.9985	0.0002	6039	<0.01	0.9978	0.0003	4078	<0.01	0.9776	0.0032	399	<0.01
B3	0.9984	0.0002	5760	<0.01	0.9984	0.0002	5758	<0.01	0.9982	0.0003	4978	<0.01	0.9867	0.0021	680	<0.01
C3	0.9982	0.0003	5119	<0.01	0.998	0.0003	4379	<0.01	0.9981	0.0003	4850	<0.01	0.9858	0.0022	634	<0.01
CK2	0.9994	0.0001	14192	<0.01	0.9993	0.0001	13291	<0.01	0.9982	0.0003	4954	<0.01	0.9815	0.0034	482	<0.01

处理 Treatment	BCM				BCB				LNDM				DPM			
	判定系数 $R^2$	残差平方和 RSS	F 值 $F$ value	P 值 $P$ value	判定系数 $R^2$	残差平方和 RSS	F 值 $F$ value	P 值 $P$ value	判定系数 $R^2$	残差平方和 RSS	F 值 $F$ value	P 值 $P$ value	判定系数 $R^2$	残差平方和 RSS	F 值 $F$ value	P 值 $P$ value
CK1	0.9975	0.0005	3542	<0.01	0.9975	0.0005	3542	<0.01	0.9942	0.0012	1552	<0.01	0.9996	0.0001	21209	<0.01
A3	0.9813	0.0026	473	<0.01	0.9813	0.0026	473	<0.01	0.9968	0.0005	2755	<0.01	0.9986	0.0002	6497	<0.01
B3	0.9802	0.0031	444	<0.01	0.9802	0.0031	444	<0.01	0.9531	0.0073	184	<0.01	0.9979	0.0003	4298	<0.01
C3	0.9891	0.0017	816	<0.01	0.9891	0.0017	816	<0.01	0.9481	0.0078	165	<0.01	0.9972	0.0004	3251	<0.01
CK2	0.9958	0.0008	2142	<0.01	0.9958	0.0008	2142	<0.01	0.9387	0.011	139	<0.01	0.9994	0.0001	14550	<0.01

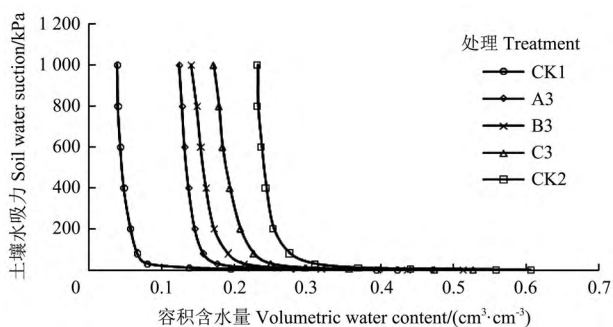


图 3 不同处理土壤水分特征曲线

Fig.3 Soil water characteristic curves of each treatment

表 5 VGM (*m, n*) 模型对各处理的拟合参数

Table 5 Parameters of VGM (*m, n*) model for each treatment

处理 Treatment	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )	$a$ /cm <sup>-1</sup>	<i>m</i>	<i>n</i>
CK1	0.4234	0.0376	0.0778	0.2006	3.2592
A1	0.4851	0.1221	0.0524	0.5411	1.2694
A2	0.4793	0.1223	0.0544	0.5339	1.2403
A3	0.4716	0.1226	0.0675	0.4653	1.2997
B1	0.5231	0.1223	0.1234	0.2562	1.7044
B2	0.5205	0.1243	0.1193	0.2669	1.5849
B3	0.5140	0.1262	0.1119	0.2729	1.5059
C1	0.5323	0.1447	0.1215	0.2467	1.4907
C2	0.5311	0.1468	0.1228	0.1672	2.2162
C3	0.5280	0.1487	0.1071	0.1909	1.9219
CK2	0.6064	0.2185	0.0485	0.3848	1.3787

注： $\theta_s$  和  $\theta_r$  分别是饱和含水量和滞留含水量； $a$ 、 $m$  和  $n$  均是影响水分特征曲线形状的经验参数。

Note:  $\theta_s$  and  $\theta_r$  are the saturated and residual water contents, respectively;  $a$ ,  $m$  and  $n$  are empirical parameters that affect the shape of soil water characteristic curves.

不同改良模式下土壤水分特征曲线结果还表明，当土壤水吸力 30 kPa 时，土壤的水分特征曲线较为平缓；而且砒砂岩含量越少，水分特征曲线越平缓。当土壤水吸力 > 30 kPa 时，水分特征曲线变得陡直，且风沙土的水分特征曲线最为陡直，3 种复配土壤较平缓（图 3、图 4）。这是因为各处理中砂粒含量都比较高，土壤大孔隙多，在低吸力段，随着水吸力的增加，土壤含水量减小幅度较大，水分特征曲线表现出平缓变化的特点；当土壤水吸力增到一定值后，大孔隙中水分会先排空，土壤中仅剩少量水存于小孔隙中，随着水吸力的继续增大，土壤持水量变化幅度较小，所以在高吸力段土壤的水分特征曲线表现出陡直的特点<sup>[25]</sup>。砂粒含量越高的土壤，这种现象越明显，如图 3 砂粒含量最高的风沙土，在低吸力段曲线最为平缓，高吸力段最为陡直。

拟合结果中  $\alpha$  值是进气吸力的倒数，是表征土壤水分特征曲线形状的经验参数，其值越小，表明土壤释水越缓慢<sup>[26]</sup>。自然土壤的水分特征曲线与土壤质地有关，但是对于复配土壤或混合土壤来说， $\alpha$  值并不受土壤中细颗粒或粗颗粒的影响。如胡振琪和张学礼<sup>[27]</sup>对复垦土壤水分特征曲线的研究表明，黏壤土的滞留含水量和饱和含水量分别是粉壤土的 9 和 1.2 倍，但是  $\alpha$  值却与粉壤土接近；刘建军等<sup>[28]</sup>发现土石混合介质土壤水分特征曲线的进气吸力（ $\alpha$  值的倒数）并不随碎石含量的

增加而呈增加或降低趋势;李卓等<sup>[10,25]</sup>对混合土壤水分特征曲线的研究结果也呈现出相似的趋势;Wang 等<sup>[29]</sup>对含碎石土壤水分特征曲线的研究表明,2~3 mm 粒径碎石的进气吸力最大( $\alpha$  值最小),但随着介质碎石含量的增加,土壤的进气吸力逐渐减小( $\alpha$  值逐渐增大)。本研究中砒砂岩的  $\alpha$  值最小(表 5),保水能力最强,释水最缓慢,水分有效性较低。随着复配土壤中砒砂岩含量的增

加, $\alpha$  值逐渐增大,表明土壤水分有效性有所改善;但  $\alpha$  值过大时,土壤中水分又会因释水过快而容易损失。本研究中,B 和 C 处理的  $\alpha$  值均大于风沙土,表明其处理中水分比风沙土更易损失,不利于水分的保持。而 A 处理的  $\alpha$  值小于风沙土,且大于砒砂岩,表明该处理可以保持较多的水分供植物利用,并且可以有效改善风沙土释水性过强而导致的漏水现象。

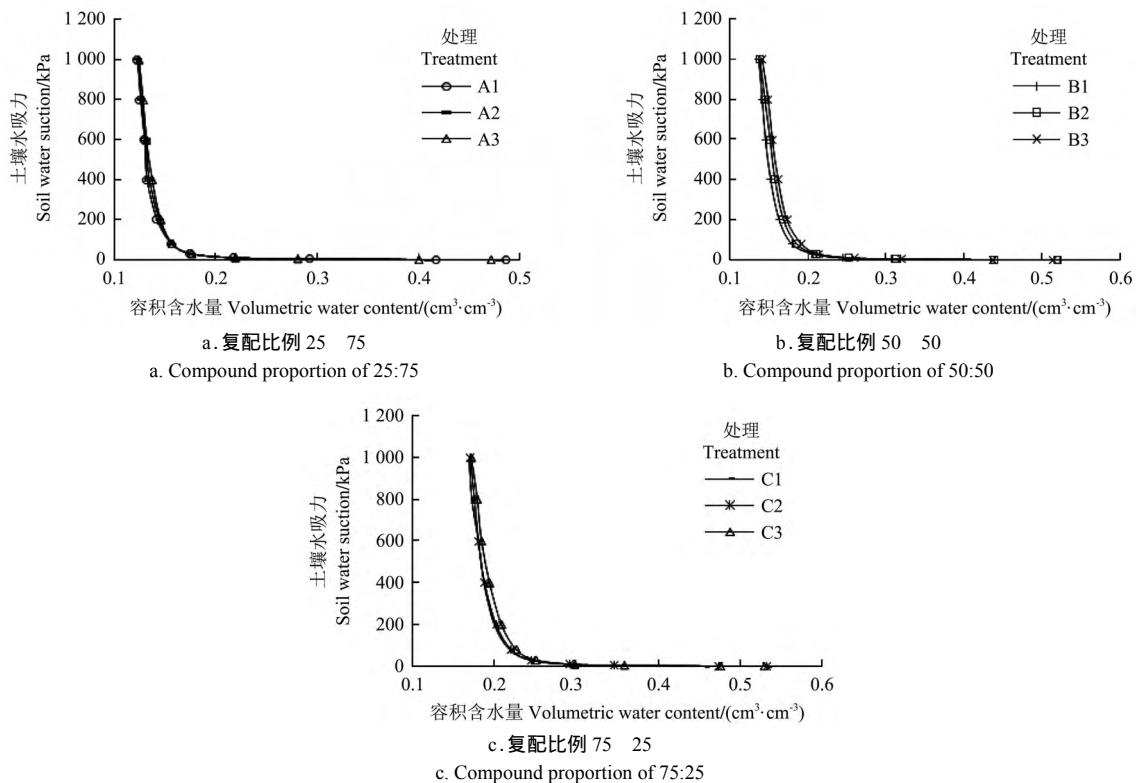


图 4 砒砂岩和风沙土不同复配比例下土壤容重对土壤水分特征曲线的影响

Fig.4 Effects of bulk density on soil water characteristic curves under different compound proportions of soft rock and sandy soil

### 2.3.3 容重对改良风沙土水分特征曲线的影响

复配土壤容积含水量在低吸力段随着土壤容重的增大而减小,在中高吸力段随容重的增加而增加(图 4,表 5),这与曹红霞等<sup>[30]</sup>对重壤土的研究结果一致。本研究中,随着容重的增加,复配土壤的饱和含水量减小,滞留含水量增加。这是因为低吸力段土壤水分主要靠大孔隙保存,随容重增大,土壤中大孔隙数量急剧减小,使土壤含水量减小。在中高吸力段,土壤中水分主要靠土壤的毛管孔隙保存<sup>[6]</sup>,随容重增大,土壤中大孔隙被压实为小孔隙,小孔隙数量有所增加,土壤的容积含水量呈现出一定的增大趋势<sup>[22,30]</sup>。

为评价砒砂岩对风沙土的改良效果,本研究比较了改良土壤和黄土高原自然状况下沙黄土的水分特征曲线<sup>[26]</sup>,砒砂岩和风沙土的复配比例为 25 75 模式下,复配土壤中除饱和含水量外,3 个容重

梯度下各吸力段的含水量均高于沙黄土。与自然状况下黄绵土水分特征曲线<sup>[26,31]</sup>的比较发现,砒砂岩和风沙土以 25 75 比例混合的复配土壤含水量在低吸力段略小于黄绵土,在中高吸力段与黄绵土近似。一般情况下,30 kPa 时的土壤含水量接近于田间持水量,田间持水量被认为是土壤有效水分的上限。本研究结果表明砒砂岩和风沙土以 25 75 比例混合模式对风沙土持水能力的改良效果优于沙黄土,接近黄绵土,可以在生产实践中推广。

## 3 结论

本试验尝试在风沙土中混入不同量的砒砂岩以复配新土壤,研究了不同复配土壤吸水和保水特性,分析砒砂岩对风沙土的改良效应,得到如下结论:

1) 砒砂岩可以显著降低风沙土的入渗率和饱

和导水率，且填装容重越大，复配土壤的入渗率和饱和导水率越小；砒砂岩和风沙土以 25 75 比例混合的复配土壤饱和导水率接近黄绵土。

2) 砒砂岩可以增加风沙土的持水性能，砒砂岩混入量越多，持水能力越好；同一改良模式下，随着容重的增大，容积含水量在低吸力段随容重增加逐渐减小，在中高吸力段逐渐增大。

3) VGM( $m, n$ )模型可对砒砂岩改良风沙土土壤水分特征曲线进行拟合；砒砂岩和风沙土混合比例的改良模式对土壤水分特征曲线参数的影响大于容重的影响；砒砂岩和风沙土以 25 75 比例混合的改良模式可以改善风沙土因释水性强而导致的漏水现象，提高土壤中水分的有效性，可在生产中推广。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王志,彭茹燕,王蕾,等. 毛乌素沙地南缘改良与利用风沙土性质研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 14 - 16, 21.  
Wang Zhi, Peng Ruyan, Wang Lei, et al. Studies on soil properties of aeolian sandy land improvement and utilization in south edge of musu desert[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 14 - 16, 21 (in Chinese with English abstract)
- [2] 韩霁昌,刘彦随,罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 87 - 94.  
Han Jichang, Liu Yansui, Luo Lintao. Research on the core technology of remixing soil by soft rock and sand in the Maowusu sand land region[J]. China Land Sciences, 2012, 26(8): 87 - 94. (in Chinese with English abstract)
- [3] 罗林涛,程杰,王欢元,等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 58 - 61, 66.  
Luo Lintao, Cheng Jie, Wang Huanyuan, et al. Nitrogen leaching characteristics in the compound soil of feldspathic sandstone and sand under corn conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 58 - 61, 66. (in Chinese with English abstract)
- [4] 柴苗苗,韩霁昌,罗林涛,等. 砒砂岩与沙混合比例及作物种植季数对复配土壤性质和作物产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(10): 179 - 184, 192.  
Chai Miaomiao, Han Jichang, Luo Lintao, et al. Effects of soft rock and sand mixing ratios and crop planting frequency on soil and crop yield[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 2013, 41(10): 179 - 184, 192. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李新举,胡振琪,李晶,等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 276 - 280.  
Li Xinju, Hu Zhenqi, Li Jing, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(6): 276 - 280. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨金玲,张甘霖,赵玉国,等. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响——以南京市为例[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 33 - 38.  
Yang Jinling, Zhang Ganlin, Zhao Yuguang, et al. Effect of compaction on soil water characteristics: A case study of Nanjing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 33 - 38. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吕殿青,邵明安,刘春平. 容重对土壤饱和和水分运动参数的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 154 - 157.  
Lü Dianqing, Shao Ming'an, Liu Chunping. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 154 - 157. (in Chinese with English abstract)
- [8] 潘云,吕殿青. 土壤容重对土壤水分入渗特性影响研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(2): 59 - 61, 77.  
Pan Yun, Lü Dianqing. Effects of soil bulk density on characteristics of soil infiltration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(2): 59 - 61, 77. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40 - 45.  
Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 40 - 45. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 611 - 620.  
Li Zhuo, Wu Pute, Feng Hao, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 611 - 620. (in Chinese with English abstract)
- [11] 栗现文,周金龙,靳孟贵,等. 高矿化度土壤水分特征曲线及拟合模型适宜性[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 135 - 141.  
Li Xianwen, Zhou Jinlong, Jin Menggui, et al. Soil-water characteristic curves of high-TDS and suitability of fitting models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(13): 135 - 141. (in Chinese with English abstract)
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上

- 海：上海科学技术出版社，1980.
- [13] 周蓓蓓, 邵明安. 不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 801 - 807.  
Zhou Beibei, Shao Ming'an. Effect of content and size of rock detritus on infiltration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 801 - 807. (in Chinese with English abstract)
- [14] 迟春明, 王志春. 水质和体积质量对碱土饱和导水率和盐分淋洗的影响[J]. 土壤, 2009, 41(6): 992 - 997.  
Chi Chunming, Wang Zhichun. Effects of water quality and bulk density on saturated hydraulic conductivity and salt leaching of sodic soil[J]. Soils, 2009, 41(6): 992 - 997. (in Chinese with English abstract)
- [15] Silva E M, Azevedo J A. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado[J]. Pesq Agropec Bras, 2002, 37(10): 1487 - 1494.
- [16] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media[R]. Hydrology Paper 3, Colorado State University, Fort Collins, 1964.
- [17] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [18] Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties[J]. Water Resources Research, 1996, 32(9): 2697 - 2703.
- [19] Durner W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure[J]. Water Resources Research, 1994, 30(2): 211 - 223.
- [20] Burdine N T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data[J]. Petroleum Transactions of the American Institute Mining Engineering, 1953, 198(1): 71 - 77.
- [21] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513 - 522.
- [22] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京：中国农业出版社，2000.
- [23] 勃海锋, 刘国彬, 王国梁. 黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3): 1 - 5, 31.  
Bo Haifeng, Liu Guobin, Wang Guoliang. Changes of infiltration characteristics of abandoned cropland with plant restoration in Loess Hilly Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(3): 1 - 5, 31. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王慧芳, 邵明安, 王明玉. 小碎石与细土混合介质的导水特性[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1086 - 1093.  
Wang Huifang, Shao Ming'an, Wang Mingyu. Hydraulic conductivity of mixtures of rock fragments and fine earth[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1086 - 1093. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李卓, 冯浩, 吴普特, 等. 砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 204 - 208.  
Li Zhuo, Feng Hao, Wu Pute, et al. Simulated experiment on effects of soil clay particle content on soil water holding capacity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(3): 204 - 208. (in Chinese with English abstract)
- [26] 文曼. 黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2012.  
Wen Man. Effect of Biochar on Soil Hydrodynamic Parameter in the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [27] 胡振琪, 张学礼. 基于 ANN 的复垦土壤水分特征曲线的预测研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 15 - 19.  
Hu Zhenqi, Zhang Xueli. Artificial neural network for predicting water retention curves of reclaimed soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 15 - 19. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘建军, 王全九, 王春霞, 等. 水平入渗法确定土石混合介质的水力参数分析[J]. 节水灌溉, 2009(12): 25 - 28.  
Liu Jianjun, Wang Quanjiu, Wang Chunxia, et al. Determination of hydraulic parameters of stony-soil media through horizontal infiltration[J]. Water Saving Irrigation, 2009(12): 25 - 28. (in Chinese with English abstract)
- [29] Wang Huifang, Xiao Bo, Wang Mingyu, et al. Modeling the soil water retention curves of soil-gravel mixtures with regression method on the loess plateau of China[J]. Plos One, 2013, 8(3): 1 - 11.
- [30] 曹红霞, 康绍忠, 武海霞. 同一质地(重壤土)土壤水分特征曲线的研究[J]. 西北农林科技大学学报：自然科学版, 2002, 30(1): 9 - 12.  
Cao Hongxia, Kang Shaozhong, Wu Haixia. Study on soil water characteristic curves of soils of same quality (heavy loam)[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 2002, 30(1): 9 - 12. (in Chinese with English abstract)
- [31] 杨浩, 王百田, 岳征文, 等. 应用保水剂对黄绵土水分特征的影响研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 182 - 186.  
Yang Hao, Wang Baitian, Yue Zhengwen, et al. Investigation on loess soil water characteristic as influenced by SAPs[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 182 - 186. (in Chinese with English abstract)



## Improvement of water absorbing and holding capacities of sandy soil by appropriate amount of soft rock

She Xiaoyan<sup>1</sup>, Zhang Xingchang<sup>1,2</sup>, Wei Xiaorong<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The contiguous areas of Shanxi, Shaanxi and Inner Mongolia in China are rich in mineral resources and serves as energy supply base. Desertification and soil - water losses are very serious problems in this area. Water is a main limiting factor of local ecological environment and the development of farming and animal husbandry. Soft rock is widely distributed in the area, which has strong water retention ability. Using soft rock to improve the sandy soil has a great potential, but little is known about the hydraulic properties of soft rock amended sandy soil. This study was conducted to understand the effect of different amount of soft rocks on water absorbing and holding capacities of sandy soil. In this paper, we measured the water infiltration, saturated hydraulic conductivity and soil water characteristic curves of soft rock and sandy soil mixtures. The various soil water characteristic curve models included in the RETC software was used to analyze the water absorbing and water holding properties of soft rock - sand soils mixtures. The objectives of this study were to evaluate the improvement of soft rock on the soil absorbing - holding water properties of sand soils, and to select optimal mixture ratio of the soft rock and sandy soil. The results showed that: 1) Soft rock significantly decreased the water infiltration rate and saturated hydraulic conductivity, but increased the saturate water content and residual water content, and hence increased the capacity of sandy soil to retain water. The saturated water content and residual water content of sandy soil increased with the amount of soft rock added into sandy soil. For the treatment of 25% soft rock and 75% sandy soil mixtures, the amended sandy soil have the similar saturated water content and soil water characteristic curve as the loess soils. 2) The effects of soft rock on water absorbing and holding capacities of sandy soil were significantly influenced by bulk density. Water infiltration rate, saturated hydraulic conductivity and saturated water content decreased with the increasing of the bulk density in the same mixture pattern. With the increase of bulk density of the mixture, the volumetric water content decreased at the low soil water suction condition, but increased at the relatively higher soil water suction condition. 3) RETC software contains eight models, and every model can be used to fit the soil water characteristic curves of soft rock amended sandy soil. Among the eight models, VGM ( $m, n$ ) was the best model with the largest  $R^2$  and F value. 4) Parameter of VGM ( $m, n$ ) model is an empirical parameter, the smaller the parameter, the slower the soil water released. Fitting results in VGM ( $m, n$ ) showed that the parameter of the soil with the 25% soft rock and 75% sandy soil was less than sandy soil and greater than soft rock. The results from this study suggested that the mixture of 25% soft rock and 75% sandy soil can significantly improve the water absorbing and holding capacities of sandy soil and this mixture pattern can be recommended in practice.

**Key words:** soils; moisture; infiltration; soft rock; sandy soil; saturated hydraulic conductivity; soil water characteristic curve