

# 晋陕蒙地区土壤质地重构对土壤水力性质的影响

郭拿拿<sup>1</sup>, 黄明斌<sup>2</sup>, 郭天崎<sup>1</sup>, 张锐<sup>1</sup>, 朱溢远<sup>1</sup>, 武小飞<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

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

**摘要:** [目的] 探究晋陕蒙地区土壤质地重构对土壤水力性质的影响, 评价砒砂岩不同添加量对砂黄土的改良效果, 为该区沙化土地修复工作提供理论依据。[方法] 将砒砂岩与砂黄土按照不同配比进行重构, 研究其饱和导水率、土壤水分特征曲线、土壤有效持水量等指标。[结果] ①随着砒砂岩比例的增加(0%~100%), 重构土中砂粒(0.05~2 mm)含量下降8.1%~33.5%, 粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)含量分别增加5.2%~21.0%, 2.9%~12.5%。当砒砂岩与砂黄土比例达到75:25时, 重构土壤质地由砂壤土转变为壤土; 当砒砂岩与砂黄土按照25:75比例混合时, 该处理在10℃时的 $K_s$ 为 $4.07 \times 10^{-6}$  m/s, 与黄土高原地区典型的黄绵土田间自然状态下的 $K_s$ 值相近; ②砒砂岩添加量对土壤水分特征曲线的影响主要在高吸力段, 当砒砂岩与砂黄土的比例为25:75时, 土壤水分有效性相对较高; ③随着砒砂岩含量增加土壤保水性能呈现上升趋势, 砒砂岩的添加比例越高, 重构土壤饱和含水量( $\theta_s$ )和残余含水量( $\theta_r$ )越大。[结论] 砒砂岩与砂黄土按25:75比例重构(土壤容重 $1.41 \text{ g/cm}^3$ )土壤有效持水量显著高于其他处理, 是晋陕蒙地区土壤改良的有效方法。

**关键词:** 质地重构; 饱和导水率; 土壤水分特征曲线; 砒砂岩; 砂黄土

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0077-06

中图分类号: S152.7

**文献参数:** 郭拿拿, 黄明斌, 郭天崎, 等. 晋陕蒙地区土壤质地重构对土壤水力性质的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 77-82. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.010; Guo Nana, Huang Mingbin, Guo Tianqi, et al. Effects of soil texture reconstruction on soil hydraulic properties in Shanxi-Shaanxi-Mongolia region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 77-82.

## Effects of Soil Texture Reconstruction on Soil Hydraulic Properties in Shanxi-Shaanxi-Mongolia Region

Guo Nana<sup>1</sup>, Huang Mingbin<sup>2</sup>, Guo Tianqi<sup>1</sup>, Zhang Rui<sup>1</sup>, Zhu Miyuan<sup>1</sup>, Wu Xiaofei<sup>1</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess

Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of soil texture reconstruction on soil hydraulic properties in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia region, and the improvement effect of different amounts of arsenic sandstone on sandy loess were studied, in order to providing theoretical basis for the restoration work of sandy land in the region. [Methods] Pisha sandstone and sandy loess were combined in different ratios, and the saturated water conductivity, soil water characteristic curve, available soil water-holding capacity, and other indexes were measured. [Results] ① As the proportion of Pisha sandstone increased (0%~100%), the content of sand particles (0.05~2 mm) in the reconstructed soil decreased by 8.1%~33.5%, while the content of silt particles (0.002~0.05 mm) and clay particles (<0.002 mm) increased by 5.2%~21.0% and 2.9%~12.5%, respectively. When the content of Pisha sandstone in the reconstructed soil reached 75%, the reconstructed soil texture changed from sandy loam to loam. The  $K_s$  value of the reconstructed soil at 10℃ was  $4.07 \times 10^{-6}$  m/s,

收稿日期: 2023-02-19

修回日期: 2023-04-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“重构土壤结构变化对剖面水-溶质耦合迁移过程的影响”(42177287)

第一作者: 郭拿拿(1999—), 女(汉族), 河南省郸城县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤物理。Email: guonana@nwafu.edu.cn.

通讯作者: 黄明斌(1968—), 男(汉族), 湖北省荆门市人, 博士, 研究员, 主要从事生态水文和土壤物理方面的研究。Email: hmbd@nwafu.edu.cn.

which is similar to the  $K_s$  value of a typical Huangmian soil under natural field conditions; ② The effects of Pisha sandstone content on the soil water characteristic curve occurred primarily in the range of high suction. When the ratio of sandy loess to Pisha sandstone was 25 : 75, the soil water-holding capacity was the largest among seven ratio treatments; ③ The soil water retention capacity of reconstructed soil tended to increase as the proportion of Pisha sandstone increased. Saturated water content ( $\theta_s$ ) and residual water content ( $\theta_r$ ) values also increased. [Conclusion] The available soil water-holding capacity of the reconstituted soil was greater than observed for the other treatments when the ratio of sandy loess to Pisha sandstone was 25 : 75 (soil bulk density was  $1.41 \text{ g/cm}^3$ ). This ratio is recommended as an optimal soil reconstruction method for this region.

**Keywords:** texture reconstruction; saturated water conductivity; soil water characteristic curve; Pisha sandstone; sandy loess

目前,重构土壤已经成为国家重点关注的土地问题。我国未来新增生态用地和农业用地的主要土地资源就是重构土壤。通俗地讲,即“整地”<sup>[1]</sup>据资料统计,2016年,全国新增建设用地  $5.39 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,“十三五”时期计划通过土地整治补充耕地  $1.33 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[2]</sup>。这些新增土地数量众多,但普遍存在土壤蓄水保肥能力差,土地生产力不高的问题。尤其在生态环境脆弱的陕北地区,降雨量小于潜在蒸发量,使该地区土壤一直处于水分亏损状态,成为限制植物生长的主要因素。土壤质地重构作为提高新增土地生产力的基本方法,主要是将两种土壤按照合适的比例进行混合,形成有一定持水能力的新型土壤,从而改善植物生长的土壤环境<sup>[3]</sup>。

黄土高原北部晋陕蒙接壤地区土壤类型主要以粗砂土和砂黄土为主。这两种土壤质地疏松,砂粒含量高,蓄水保肥能力差,极易发生水土流失。近年来,煤炭资源过度开采更是加重了该地区的土地沙漠化。此外,晋陕蒙接壤地区的鄂尔多斯高原广泛分布的砒砂岩结构性差,无水时十分坚硬,过度吸水后松软如泥,植物难以生长,是该地区进行生态恢复的主要障碍<sup>[4]</sup>。目前,已有大量学者<sup>[5-7]</sup>尝试利用砒砂岩和风沙土在成土中的互补性,对风沙土进行改良。摄晓燕<sup>[8]</sup>通过研究不同容重梯度下砒砂岩对风沙土的改良效果发现,砒砂岩添加能够有效降低风沙土的饱和导水率,提高土壤持水能力。韩霁昌<sup>[5]</sup>研究结果表明,随着复配土壤中砒砂岩添加量的增多,重构土壤毛管孔隙度增加,从而提升了混合土的有效含水量。魏彬萌<sup>[9-11]</sup>研究发现,砒砂岩与沙复配比例在 1 : 1~1 : 2时改善土壤质地和结构的效果最佳<sup>[9]</sup>。罗林涛、孙增慧等的研究也证实,砒砂岩:沙=按 1 : 2 重构是适合玉米生长的最佳混合比。

土壤质地重构模式不仅受混合比例影响,还受容重等因素影响,很难确定一个最佳混合比。因此,本

研究结合黄土高原北部晋陕蒙接壤地区的土壤特性,就地取材将砒砂岩和砂黄土这两种土壤按照不同配比进行混合,控制各处理土壤容重相同,比较不同混合类型重构土壤的水力性质和有效持水量,确定适宜作物生长的最佳重构方案,为黄土高原晋陕蒙接壤区沙化土地修复提供理论依据。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 试验用土壤基本性质

试验所用砂黄土采自陕西省神木市神木镇,所用砒砂岩采自晋陕蒙接壤区的鄂尔多斯。采样时间为 2022 年 11 月 1 日。试验时间为 2022 年 12 月中旬。两种土壤颗粒组成如表 1 所示。砂黄土砂、粉、黏粒含量分别是 69.30%, 26.36% 和 4.34%, 质地砂质壤土。砒砂岩是岩石沙粒间的胶结物质经溶解,固结程度降低后所形成,其砂、粉、黏粒含量分别是 35.76%, 47.40% 和 16.85%, 质地壤土。砒砂岩抗侵蚀能力弱,干旱时坚硬如石;吸水膨胀后松软如泥,透水性差;遇风时极易发生侵蚀风化。

### 1.2 试验设计

砒砂岩土样含砾石较多,不利于环刀装填,因此砂黄土和砒砂岩样品风干,经碾压后过 2 mm 筛去除杂质和大颗粒,按照不同风干质量比混合均匀后备用。为研究砒砂岩与砂黄土按照不同比例混合后重构土壤理化性质的差异,依据前人经验,本试验共设置 7 个处理,即砒砂岩与砂黄土按照 0 : 100, 15 : 85, 25 : 75, 50 : 50, 75 : 25, 85 : 15, 100 : 0 的配比进行混合<sup>[8]</sup>,混合均匀后装填环刀,每个处理设置 3 个重复。结合文献资料,在装环刀时将不同配比的 重构土壤容重统一设置为  $1.41 \text{ g/cm}^3$ ,此时每个处理土样的紧实程度与自然土壤相近<sup>[8]</sup>。

### 1.3 样品测定和分析

土壤颗粒组成使用 MS 2000 马尔文激光粒度仪

进行测定。取不同配比的重构土壤 4~5 g 置于烧杯中,将有机质和碳酸钙处理干净,上机测试前加入分散剂。

饱和和导水率采用定水头法进行测定:选用内径 5 cm,高 5 cm 的环刀,按照设定的容重进行装填。测定时用马氏瓶供水,始终维持 5 cm 的水头,温度控制在 20 ℃。当环刀底部有水匀速流出后,每隔 20 min 收集并记录出水量,直到水流稳定停止记录。使用达西定律计算出饱和导水率( $K_t$ ),并根据公式换算成 10 ℃ 的饱和导水率( $K_{10}$ )<sup>[12]</sup>。计算公式为:

$$K_t = \frac{Q_n L}{[t_n A (H + L)]} \quad (1)$$

$$K_{10} = K_t / (0.7 + 0.03t) \quad (2)$$

式中: $K_t$  为  $t$  ℃ 时的饱和导水率(cm/s); $Q_n$  为第  $n$  次出水量( $\text{cm}^3$ ); $t_n$  为间隔时间(s); $A$  为环刀横截面积( $\text{cm}^2$ ); $L$  为环刀高度(cm); $H$  为水头高度(cm); $K_{10}$  为 10 ℃ 时土壤饱和导水率(cm/s); $t$  为测定时水温(℃)。

采用高速冷冻离心机测定土壤水分特征曲线,测定时温度控制在 20 ℃。使用 van Genuchten (VG) 模型对土壤水分特征曲线进行拟合。将饱和后的环刀置于干燥粗砂土上方,自由排水 2 d 后测得土壤含

水量。本研究通过 VG 模型计算出土壤水吸力为 1 500 kPa 时对应的体积含水量,其与田间持水量的差值即为土壤有效持水量。

## 1.4 数据处理

采用 Origin 软件建立 VG 模型函数来拟合土壤水分特征曲线<sup>[13]</sup>,并对拟合数据进行方差分析,采用 Microsoft Excel 对图表进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同配比重构土壤颗粒组成和质地差异

砒砂岩与砂黄土进行重构后,土壤颗粒组成发生明显变化。表 1 数据显示,砂黄土中砂粒含量达到 69.3%,粉粒含量为 26.36%,按照分类标准属于砂质壤土;砒砂岩中砂粒含量仅占 35.76%,低于粉粒含量,土壤质地为壤土。砒砂岩添加减少了重构土壤中砂粒的含量,而粉粒和黏粒含量随砒砂岩比例上升呈现逐级递增的趋势<sup>[14]</sup>。当砒砂岩与砂黄土比例达到 85:15 时,重构土壤中粉粒含量大于砂粒。随着重构土壤中砒砂岩比例的增加,重构土壤质地由砂质壤土变为壤土,质地条件变好<sup>[15]</sup>。其中,砒砂岩与砂黄土按照 75:25 进行重构是土壤质地由砂壤土变为壤土的临界点。

表 1 不同配比重构土壤颗粒组成及质地

Table 1 Particle composition and texture of reconstructed soils with different ratios

处理 样号	砒砂岩:砂黄土 (风干质量比)	砂粒/% (0.05~2 mm)	粉粒/% (0.002~0.05 mm)	黏粒/% (<0.002 mm)	质地 (美国制)	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
1	0:100	69.30	26.36	4.34	砂质壤土	1.41
2	15:85	61.24	31.55	7.21	砂质壤土	1.41
3	25:75	55.13	35.63	9.24	砂质壤土	1.41
4	50:50	52.72	36.98	10.30	砂质壤土	1.41
5	75:25	49.18	38.19	12.63	壤土	1.41
6	85:15	38.34	46.64	15.02	壤土	1.41
7	100:0	35.76	47.40	16.85	壤土	1.41

### 2.2 不同配比重构土壤饱和含水量和饱和导水率的差异

重构土壤饱和含水量受砒砂岩添加量影响如表 2 所示。如砒砂岩含量由 15% 增加至 100% 时,饱和含水量( $\theta_s$ )均值从 0.46  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  增加至 0.60  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。与处理 1 相比,处理 2—7 的  $\theta_s$  值分别增加了 2.2%,6.2%,9.2%,16.5%,21.3%,31.2%,与砒砂岩含量呈显著相关( $p < 0.05$ )。这是由于砒砂岩与砂黄土混合后,增加了砂黄土中黏、粉粒含量,从而增加了土壤对水的吸附能力<sup>[16]</sup>。其中,砒砂岩含量从 85% 增加到 100% 时, $\theta_s$  增加幅度最明显。土壤饱和和导水率( $K_s$ )是描述土壤渗透性能的参数,受土壤质

地的影响<sup>[17]</sup>。试验结果显示,砒砂岩含量越高,土壤饱和和导水率越低,呈负相关关系。

其中,砒砂岩  $K_s$  最小,砂黄土最大,是砒砂岩的 3.2 倍。这是由于砂黄土砂粒含量高,土壤中大孔隙数量多,介质孔隙的透水性强。砒砂岩含量从 0 增加到 100% 时,重构土壤饱和导水率从  $4.60 \pm 0.09 \times 10^{-6} \text{ m/s}$  逐步下降到  $1.43 \pm 0.19 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,但下降幅度无明显规律。当砒砂岩与砂黄土按照 25:75 比例混合时,重构土壤  $K_s$  平均值为  $4.07 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,与黄土高原地区典型的黄绵土田间自然状态下的  $K_s$  接近<sup>[18]</sup>。

表 2 不同配比下重构土壤水分参数

Table 2 Soil hydraulic parameters of reconstructed soils with different ratios

处理 样号	砒砂岩:砂黄土 (风干质量比)	饱和含水量/ ( $10^{-1} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	饱和导水率/ ( $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	0 : 100	0.43±0.10	4.60±0.09
2	15 : 85	0.44±0.10	4.09±0.14
3	25 : 75	0.45±0.03	4.07±0.20
4	50 : 50	0.47±0.11	3.97±0.03
5	75 : 25	0.50±0.03	3.40±0.18
6	85 : 15	0.52±0.09	2.53±0.36
7	100 : 0	0.60±0.34	1.43±0.19

注:数据为均值±标准差。

### 2.3 不同配比土壤水分特征曲线差异

重构土壤水分特征曲线受砒砂岩添加量的影响(图 1)。在各吸力水平下,砒砂岩的含水量均高于砂黄土。如饱和含水量和残余含水量均以砒砂岩最高,砂黄土最低。随着砒砂岩含量的增多,相同吸力水平下重构土壤含水量不断增大。分析土壤水分特征曲线数据可得,当土壤水吸力  $h \leq 40 \text{ kPa}$  时,土壤含水量随吸力增大下降明显,即土壤水分在低吸力阶段释放较快;当土壤水吸力  $h > 40 \text{ kPa}$  时,土壤水分释放缓慢。这是由于各处理土壤中  $0.05 \sim 2 \text{ mm}$  颗粒含量较高,在低吸力阶段,土壤大孔隙中的水分优先流失,因此,土壤含水量减小幅度较大;在高吸力阶段,土壤水分流失由大孔隙转为中小孔隙,土壤含水量变化较小<sup>[19]</sup>。

由图 1 可以看出,在中低吸力段,相同土壤水吸力下各混合处理的体积含水量相差较小。因此,砒砂岩添加量对土壤水分特征曲线的影响主要在高吸力段范围。

表 3 不同配比重构土壤水分特征曲线拟合结果

Table 3 Fitted soil water retention curves of reconstructed soils with different ratios

项目	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6	处理 7
$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.064	0.078	0.100	0.129	0.150	0.153	0.203
$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	0.426	0.436	0.453	0.466	0.497	0.517	0.559
$\alpha / \text{cm}$	0.503	0.516	0.483	0.517	0.504	0.761	0.357
$n$	1.676	3.983	3.890	1.535	3.442	4.056	10.169
$R^2$	0.999 4	0.999 6	0.999 5	0.999 5	0.999 4	0.999 6	0.999 5

注: $\theta_r$  为残余含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  为饱和含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\alpha$  为进气值倒数( $\text{cm}^{-1}$ );  $n$  为经验参数;  $R^2$  为拟合系数。

### 2.4 不同配比土壤有效持水量的差异

如图 2 所示,纯砒砂岩处理的田间持水量明显高于其他处理,混合土壤的田间持水量均高于纯砂黄土处理。这是由于砒砂岩中的黏粒、粉粒具有良好的保水作用。在混合处理中,砒砂岩添加量从 15% 增加到 25% 时,田间持水量的增加幅度最大,此时土壤田

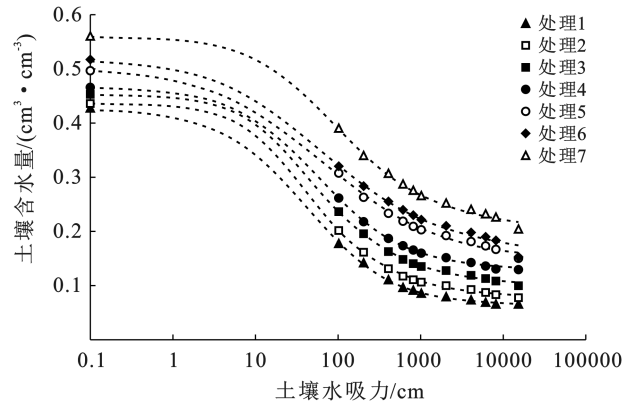


图 1 不同配比下重构土壤水分特征曲线

Fig.1 Soil water retention curves of reconstructed soils

本研究采用 VG 模型拟合不同重构土壤的水分特征曲线<sup>[20]</sup>(如表 3 所示),决定系数  $R^2$  达到 0.999 4 及以上,说明拟合效果很好。拟合结果中,  $n$  为形状系数,反映土壤水分特征曲线的弯曲程度,  $n$  值越小表示拟合的曲线越平缓<sup>[21]</sup>。而砒砂岩添加对重构土壤水分特征曲线的  $n$  值影响无明显规律;  $\alpha$  值是土壤进气吸力的倒数,是 VG 模型拟合土壤水分特征曲线的经验参数。  $\alpha$  值越小表示土壤释水越缓慢,水分有效性低;而  $\alpha$  值过大时,土壤水分因释放过快导致保水能力降低<sup>[22]</sup>;如表 3 所示,砒砂岩  $\alpha$  值为 0.357,是所有处理中的最小值,说明砒砂岩释水最缓慢,保水能力最强,但可供植物利用的有效水分含量低。本研究中,处理 2, 4, 5, 6 的  $\alpha$  值均大于砂黄土,表明该处理土壤水分比砂黄土更易流失,土壤保水能力差。而砒砂岩与砂黄土混合比例为 25 : 75 时,重构土壤  $\alpha$  值大于砒砂岩,且小于砂黄土,这表明该重构土壤水分有效性相对较高,且能够很好地改善砂黄土水分流失过快的缺点。

间持水量处于较高水平,继续增加砒砂岩的含量对田间持水量影响不大。各处理萎蔫点在  $0.064 \sim 0.203 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  之间,且随砒砂岩含量增加呈现递增趋势,砂黄土最小。根据田间持水量和萎蔫点计算出各处理土壤有效持水量(图 2 右),图形显示各处理之间无明显规律。当砒砂岩与砂黄土混合比例为

25:75时,土壤有效持水量明显高于其他处理,说明该混合比例对砂黄土的改良效果最好,能够改善黄土

高原北部晋陕蒙接壤地区土壤状况,为植物生长提供水分条件。

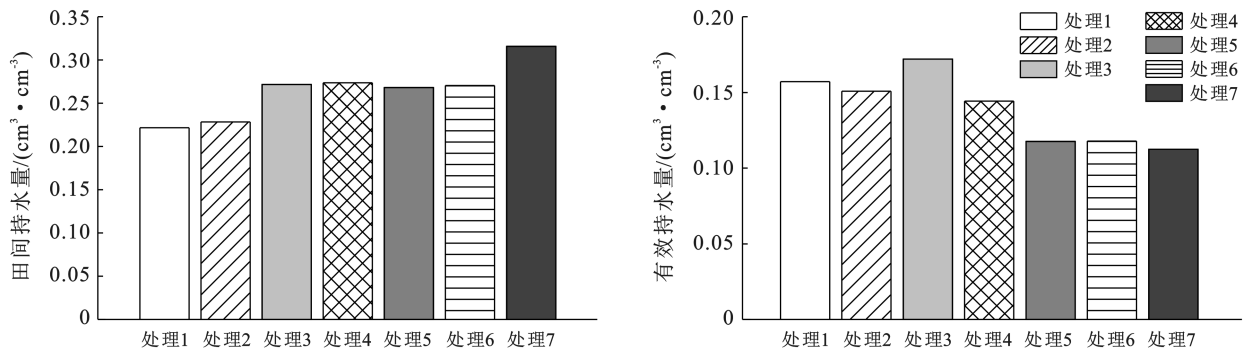


图2 不同配比下重构土壤田间持水量和有效持水量

Fig.2 Field capacity and available capacity of reconstructed soils with different ratios

### 3 讨论

土壤饱和导水率受容重、孔隙度和土壤机械组成的影响。本研究通过在砂黄土中添加砒砂岩进行土壤质地重构,直接改变了砂黄土的机械组成。结果显示,砒砂岩含量越多,重构土壤  $K_s$  值越小。这是由于砒砂岩黏、粉粒含量高,且具有不稳定团粒结构,吸水后崩解,细颗粒阻塞大孔隙的连接通道<sup>[14]</sup>,导致其  $K_s$  较低。当砂黄土中混入砒砂岩,土壤中砂粒含量减少,黏粒、粉粒含量增多。砒砂岩中的黏、粉粒填充到砂黄土的大孔隙中,减缓土壤水分运移,提高土壤保水性,从而有效降低了砂黄土的饱和导水率。因此,  $K_s$  越小的处理,土壤介质孔隙的透水性越低,田间持水量则相对较大<sup>[23-24]</sup>。

数据显示,处理3土壤有效持水量显著高于其他处理。这是因为当砒砂岩与砂黄土按25:75比例重构时,与其他处理相比,混合土壤中的非毛管孔隙数量处于最佳状态,当水分进入时,非毛管孔隙能够储存更多水分,从而起到保水固土的效果<sup>[25]</sup>。各处理间,砒砂岩的田间持水量最大,说明岩层中能够形成相对富水层,但是土壤渗透性弱、释水缓慢、水分有效性低,导致土壤有效持水量较小。

研究表明,将物理性质互补的砒砂岩与砂黄土按照一定比例进行重构,是行之有效的土壤物理改良方法。重构后的土壤能够有效减少土壤侵蚀、预防水土流失、涵养水源,砒砂岩与沙复配成土技术目前已在毛乌素沙地广泛应用<sup>[26]</sup>。然而,本研究为单一处理试验,仅研究了不同混合配比在容重为  $1.41 \text{ g/cm}^3$  时重构土壤水分有效性的差异,未考虑不同容重梯度对重构土壤质地、土壤水分特征曲线、有效持水量的影响。前人研究表明,同一改良模式下,装填容重越

大,重构土壤的饱和导水率<sup>[27]</sup>和水分蓄持能力越小<sup>[28]</sup>。因此,在实际应用过程中,进行土壤质地重构需要综合考虑混合配比、容重等现实因素。

### 4 结论

(1) 单位体积土体中,砒砂岩添加能够降低砂黄土中砂粒的含量,使重构土壤质地由砂壤土变为壤土,改善土壤质地。当砒砂岩与砂黄土按照25:75比例混合时(土壤容重  $1.41 \text{ g/cm}^3$ ),重构土壤  $K_s$  值为  $4.07 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ ,稍小于砂黄土。

(2) 砒砂岩添加量对土壤水分特征曲线的影响主要在高吸力段范围。砒砂岩与砂黄土混合比例为25:75时(土壤容重  $1.41 \text{ g/cm}^3$ ),经验参数  $\alpha$  值大于砒砂岩,且小于砂黄土,这表明该重构土壤水分有效性相对较高,且能够很好地改善砂黄土水分流失过快的缺点。

(3) 砒砂岩与砂黄土混合比例为25:75时(土壤容重  $1.41 \text{ g/cm}^3$ ),土壤有效持水量明显高于其他处理,该混合比例可作为改良砂黄土的最佳方案。

#### [参考文献]

- [1] 安佳怡.乡村振兴中的土地整治效果分析[J].科技风,2022,500(24):142-144.
- [2] 国家发展和改革委员会.全国土地整治规划(2016—2020年)[M].北京:社会科学文献出版社,2017.
- [3] 董杰,潘霞.复配土对土壤改良的作用及类型[J].内蒙古林业,2016,491(9):24-25.
- [4] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007(1):14-18.
- [5] 韩霖昌,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.

- [6] 李裕瑞,范朋灿,曹智,等.毛乌素沙地砒砂岩与沙复配农田的固沙效应及其微观机理[J].中国沙漠,2017,37(3):421-430.
- [7] 赵彤,韩霖昌,张扬,等.4年作物种植对不同比例砒砂岩与沙复配土水稳性团聚体的影响[J].江苏农业科学,2016,44(10):443-447.
- [8] 摄晓燕,张兴昌,魏孝荣.适量砒砂岩改良风沙土的吸水性和保水特性[J].农业工程学报,2014,30(14):115-123.
- [9] 魏彬萌,赵宣.添加砒砂岩对风沙土性质的改良及时间效应[J].水土保持研究,2017,24(6):16-21.
- [10] 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.
- [11] 孙增慧,韩霖昌,毛忠安,等.砒砂岩改良风沙土对作物产量影响的 RZWQM2 模型模拟[J].农业机械学报,2018,49(7):235-243.
- [12] 王金悦,邓羽松,李典云,等.连栽桉树人工林土壤大孔隙特征及其对饱和导水率的影响[J].生态学报,2021,41(19):7689-7699.
- [13] 甄雪,王红雨,李雨佳,等.利用 Origin 8.0 绘制土水特征曲线的方法[J].宁夏工程技术,2016,15(3):262-265,269.
- [14] 李娟,吴林川,李玲.砒砂岩与沙复配土的水土保持效应研究[J].土地开发工程研究,2018,3(6):35-40.
- [15] 张露,韩霖昌,王欢元,等.砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J].中国水土保持科学,2015,13(2):44-49.
- [16] 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.
- [17] 刘目兴,吴丹,吴四平,等.三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J].生态学报,2016,36(11):3189-3196.
- [18] 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.
- [19] 刘建立,徐绍辉.非相似介质方法在估计土壤水分特征曲线中的应用[J].水利学报,2003(4):80-84.
- [20] 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.
- [21] 赵炜,赵举,魏占民,等.气化渣改良风沙土对土壤水分物理性质的影响[J].水土保持研究,2022,29(2):64-69.
- [22] 文曼.黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [23] 胡雅.砒砂岩与沙复配土壤理化性状及作物产量研究[J].农业与技术,2018,38(17):4-6.
- [24] 孙婴婴,孙绪博,曹婷婷,等.砒砂岩对毛乌素沙地风沙土储水能力影响的研究[J].水土保持研究,2017,24(6):105-110,121.
- [25] 贺睿,王钧,钱前,等.互助北山国家森林公园下枯落物及土壤水源涵养能力[J].甘肃农业大学学报,2021,56(6):133-141.
- [26] 何振嘉,范王涛,杜宜春.砒砂岩与沙复配成土技术研究综述[J].人民长江,2021,52(2):60-65.
- [27] 吕殿青,邵明安,刘春平.容重对土壤饱和水分运动参数的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):154-157.
- [28] 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.

(上接第 67 页)

- [23] 李霞,朱万泽,舒树森,等.基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价[J].生态学报,2021,41(10):3891-3900.
- [24] 梅楠,谷岩,李德忠,等.基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2021,37(12):91-98.
- [25] 李桂林,陈杰,檀满枝,等.基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J].土壤学报,2008,45(1):16-25.
- [26] 信忠保,余新晓,张满良,等.黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征[J].干旱区研究,2012,29(3):379-384.
- [27] 张正杨.植烟土壤肥力变异特征研究[D].河南 郑州:河南农业大学,2008.
- [28] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial) [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997,61(1):4-10.
- [29] 张灵,王绪芳,王春燕,等.兰州市南北两山土壤养分空间分布及其影响因子[J].兰州大学学报(自然科学版),2007,43(3):53-57.
- [30] 赵同谦,赵阳,贺玉晓,等.不同植被恢复类型对矿山废弃地土壤理化性质的影响:以焦作缝山公园为例[J].河南理工大学学报(自然科学版),2017,36(4):60-67.
- [31] 王岩,李玉灵,石娟华,等.不同植被恢复模式对铁尾矿物种多样性及土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):112-117.
- [32] 阿丽娅·阿力木,丛小涵,夏晓莹,等.不同土地利用方式下土壤养分特征变化分析[J].新疆农业科学,2022,59(4):925-933.
- [33] 郭鑫,高永,张超,等.不同植被恢复类型对煤炭物流园区废弃地土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2022,42(2):67-73.
- [34] 刘畅,张建军,张海博,等.晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J].水土保持学报,2021,35(5):101-107.