

\*\*\*\*\*  
\* 试 \*  
\* 验 \*  
\* 研 \*  
\* 究 \*  
\*\*\*\*\*

# 不同治理措施下科尔沁沙地南缘 土壤质地与持水特性研究

高亮<sup>1</sup>, 高永<sup>1</sup>, 韩彦隆<sup>1</sup>, 吕新丰<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019;

2. 内蒙古自治区水土保持工作站, 内蒙古 呼和浩特 010019)

**摘要:** [目的] 研究不同治理措施下土壤结构及土壤水分的分异特征, 为合理选择沙化土地治理方式提供科学参考。[方法] 结合空间代替时间和相邻样地比较法, 利用压力膜仪和烘干法对科尔沁沙地治理过程中形成的樟子松人工林地、小叶杨人工林地、小叶锦鸡儿林地、围封草地、天然恢复的固定沙地以及流动沙地(CK)土壤水分特征曲线及土壤结构进行研究。[结果] ①各种治理措施均能明显增强土壤水分持蓄能力, 小叶锦鸡儿林地土壤有效水含量最高, 为  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。②各治理措施土壤沙粒含量、土壤容重降低; 小叶锦鸡儿对土壤粉粒恢复效果最高, 较流动沙地增加 7.49%; 围封措施下土壤黏粒含量最高, 为 1.08%。③土壤黏粒是影响土壤有效水含量和过剩水含量的主要因素, 回归系数分别达到 2.54 和 -2.65。[结论] 小叶锦鸡儿林地和围封措施能较好地改善沙化土地土壤结构和土壤水分持蓄能力。

**关键词:** 土壤有效水; 土壤过剩水; 土壤结构; 科尔沁沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)04-0001-06

中图分类号: S152.7

**文献参数:** 高亮, 高永, 韩彦隆, 等. 不同治理措施下科尔沁沙地南缘土壤质地与持水特性研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 1-6. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.001. Gao Liang, Gao Yong, Han Yanlong, et al. Soil structure and water retention capacity in Southern Horqin sandy land under different control measures[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 1-6.

## Soil Structure and Water Retention Capacity in Southern Horqin Sandy Land Under Different Control Measures

GAO Liang<sup>1</sup>, GAO Yong<sup>1</sup>, HAN Yanlong<sup>1</sup>, LÜ Xinfeng<sup>2</sup>

(1. Desert Science and Engineering Department of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2. Inner Mongolia Soil and Water Conservation Station, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

**Abstract:** [Objective] Characteristics of soil moisture and soil structure in different land types were studied, and the responses between them were analyzed, to provide a scientific reference for reasonable selection of desertification control. [Methods] Space-time-substitution and paired-sites methods were combined to research soil characteristics in lands with *Pinus sylvestris* plantation, *Populus simonii* plantation, *Caragana microphylla* community, and fencing land, fixed sandy land and shifting sandy land. Soil water characteristic curve was established by membrane pressure gauge, soil mechanical composition was analyzed by laser particle analyzer, soil bulk density was measured by oven drying method. [Results] ① Soil water holding capacity was significantly enhanced by the treatment measures, soil available water content in *Caragana microphylla* community was the highest of all control measures, which was  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . ② The soil sand content and soil bulk density were decreased in each treatment. *Caragana microphylla* community had the best recover effect on silt content, it was 7.49% higher than that of shifting sandy land. The highest clay content was observed in fencing land which was 1.08%. ③ Soil clay content is the main factor affecting soil

收稿日期: 2017-03-09

修回日期: 2017-04-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“沙区光伏电场与其环境的互馈机制”(41461001); 国家重点研发计划项目“北方农牧交错带草地退化机理及生态修复技术集成示范”(2016YFC0500708)

第一作者: 高亮(1986—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 博士研究生, 研究方向为荒漠化防治。E-mail: 335724907@qq.com。

通讯作者: 高永(1962—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治等方面的研究。E-mail: 13948815709@163.com。

available water and excess water, the regression coefficients of soil clay content to available and excess water were 2.54 and  $-2.65$ , respectively. [Conclusion] *Caragana microphylla* community and fencing treatment can improve the sandy land soil structure and soil water holding storage capacity.

**Keywords:** soil available water; soil excess water; soil structure; Horqin sandy land

在干旱半干旱的科尔沁沙地南缘,采取植物措施、工程措施等荒漠化防治手段,建立稳定的人工植被、促进天然植被的更新、复壮,是该地区防治土地沙化的重要手段<sup>[1]</sup>。在沙区干旱的自然条件下,土壤水分是该地区重要的生态因子和限制因子<sup>[2-3]</sup>。土壤水分状况不仅影响着建植短期内植被的成活率和保存率<sup>[4]</sup>,更与建植后植被长期的稳定息息相关<sup>[5]</sup>。因此研究不同治理措施下的土壤水分状况,对于确保固沙植被的生长与长期稳定具有重要意义。

目前对土壤水分状况的研究已有很多,石莎<sup>[6]</sup>、潘颜霞<sup>[7]</sup>、李传荣<sup>[8]</sup>、史志华<sup>[9]</sup>等分别从植被状况、群落动态、降水、土层厚度、相对高程等方面对土壤水分状况做了详尽而科学的分析阐述。但究其根本,上述研究纷纷以“土壤含水率”作为表征土壤水分状况的指标,总体上可以归纳为对土壤含水率空间分布和时间动态两个方面的研究,并未从土壤结构等自身特性入手,分析产生土壤水分状况差异的客观原因。由于土壤含水率是一个即时值,其受地形、气象等因素影响巨大<sup>[10]</sup>,利用土壤含水率来说明土壤水分状况具有一定的随机性和局限性,并不能客观反映出土壤本身水分持蓄性能。因此本文引入土壤水势能的概念,即土水势<sup>[11]</sup>,研究科尔沁沙地南缘不同的荒漠化治理措施下土壤含水率与土壤水势的耦合变化规律,分别测算土壤有效水及过剩水含量,分析土壤水分状况与土壤结构的相关关系,为解释不同治理措施下土壤水分状况差异找到科学的依据,也为该地区合理的选择荒漠化防治措施提供有效的参考。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区通辽市奈曼旗,是我国北方重要农牧交错带<sup>[12]</sup>、森林草原—干旱草原过渡带<sup>[13-14]</sup>、半湿润—半干旱过渡带<sup>[15]</sup>交汇处的脆弱生

态区,属科尔沁沙地南缘,中心坐标为  $120^{\circ}41'57''E$ ,  $42^{\circ}55'58''N$ ,属北温带大陆性季风干旱气候,地形坳垫相间,平均海拔 450 m,年平均气温  $6.0\sim 6.5\text{ }^{\circ}C$ ,多年平均降水量  $250\sim 300\text{ mm}$ ,多集中在夏秋两季,占全年降水的  $70\%\sim 80\%$ ,年平均潜在蒸发量达  $1\ 500\sim 2\ 500\text{ mm}$ 。土壤以非地带性棕壤、暗棕壤、黑垆土和地带性的风沙土、草甸土、盐碱土为主,其中风沙土所占比重最大,占土壤总面积的  $44\%$ 。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地的布设及采样方法 选择该地区常见的治沙措施植物措施:樟子松(*Pinus sylvestris*)人工林、小叶杨(*Populus simonii*)人工林,小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)群落(飞播);工程措施:围封;自然恢复:固定沙地为试验样地;以流动沙地为对照。样地当前基本信息详见表 1。所选样地在治理前均为流动沙地,治理年限为  $20\sim 23\text{ a}$ ,分布在以中科院寒旱所奈曼站为中心,东西 3 km,南北 4 km 范围内,采样区域内地势平缓,土壤类型单一(风沙土为主),减少了因地形及气候差异引起的地带性差异。采用空间代替时间法与相邻样地比较法,在每种样地类型下选取  $15\text{ m}\times 15\text{ m}$  的采样区各 6 块,在每块样区中随机选取 4 个  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  样方,挖取剖面,用环刀( $\Phi=5\text{ cm}$ )分别取  $0\text{—}10$ ,  $10\text{—}20$ ,  $20\text{—}40$  和  $40\text{—}60\text{ cm}$  层土样,每层取样一次,用于测定土壤干容重、土壤机械组成和土壤水分特征曲线。

1.2.2 样品检测方法 本研究中采用 V-G 模型描述土壤水分特征曲线。利用 SEC-1500F1 型 15 bar 压力膜仪分别测定 pF 为 0, 1.3, 1.6, 1.7, 1.9, 2.0, 2.5, 2.6, 2.9, 3.0, 3.5 时的土壤含水量;烘干法(环刀  $\Phi=5\text{ cm}$ )测定土壤容重;Mastersizer-3000 测定土壤机械组成。土壤粒径分级采用《国际制土壤颗粒分级标准》。

表 1 样地基本信息

土地覆盖方式	樟子松	小叶杨	小叶锦鸡儿	围封	流动沙地	固定沙地
平均株高/m	6.88	9.14	1.41	0.18	—	1.12
平均胸径/cm	10.13	13.77	—	—	—	—
郁闭度	0.7	0.6	0.6	—	—	—
地表盖度/%	70~80	60~70	45~50	80~90	<1	75~85
地表生物量/( $g\cdot m^{-2}$ )	115.98	58.76	131.98	158.65	18.24	161.85

1.2.3 分析方法 土壤水分特征曲线 V-G 模型的具体表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^m} \quad (1)$$

式中: $\theta$ ——土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $h$ ——负压水头( $-\text{cm}$ ); $\theta_s, \theta_r$ ——土壤饱和含水量和残余含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\alpha$ ——与土壤平均孔隙半径有关的参数( $\text{cm}$ ); $n$ ——曲线形状参数, $m = 1 - 1/n$ 。本文以土壤吸水值(+)替代压力水头(-), $h = 10^{pF}$ 。利用 DPS 软件进行 V-G 模型的参数求解。利用 SPSS 19.0 进行数据统计分析, Sigmaplot 12.5 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤质地

2.1.1 治理措施间土壤容重及机械组成差异性 对 6 种样地土壤机械组成的方差分析显示(表 2), 樟子

松和小叶杨样地土壤机械组成类似, 二者间差异不显著, 其余样地间差异均显著。其中沙粒含量最高的样地为流动沙地, 达到 97.36%, 含量最低的小叶锦鸡儿群落为 89.37%; 粉粒含量与之相反, 小叶锦鸡儿群落为 10.02%, 流动沙地为 2.53%; 而黏粒含量最高的样地类型为围封草地。

与流动沙地相比较, 不同治理措施均能起到增加土壤粉粒、黏粒含量, 降低土壤沙粒含量的作用, 这是因为植物的地上部分能起到增加地表粗糙度、降低风速作用, 一方面减少风蚀粗粒化现象, 另一方面风沙流中沙物质因为植物的阻碍而沉积, 增加细粒含量。5 种治理措施下土壤容重因植物的根系作用均有所降低, 对样地容重的分析显示, 流动沙地容重最高且与其余样地类型差异显著。小叶杨样地容重最低, 与樟子松和固定沙地差异不显著, 与其他样地差异均显著。

表 2 不同治理措施下沙地土壤 0—60 cm 容重及机械组成方差分析

样地类型	沙粒含量 % (2~0.05 mm)	粉粒含量 % (0.05~0.002 mm)	黏粒含量 % (<0.002 mm)	分形维数	容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
樟子松	94.16 <sup>c</sup>	5.16 <sup>b</sup>	0.68 <sup>c</sup>	2.28	1.61±0.04 <sup>ab</sup>
小叶杨	94.19 <sup>c</sup>	5.13 <sup>b</sup>	0.68 <sup>c</sup>	2.27	1.59±0.11 <sup>a</sup>
小叶锦鸡儿	89.37 <sup>a</sup>	10.02 <sup>d</sup>	0.61 <sup>bc</sup>	2.29	1.63±0.05 <sup>b</sup>
围封	89.82 <sup>b</sup>	9.10 <sup>c</sup>	1.08 <sup>d</sup>	2.19	1.65±0.06 <sup>bc</sup>
固定沙地	94.27 <sup>c</sup>	5.18 <sup>b</sup>	0.54 <sup>b</sup>	2.30	1.62±0.05 <sup>ab</sup>
流动沙地	97.36 <sup>d</sup>	2.53 <sup>a</sup>	0.11 <sup>a</sup>	2.46	1.67±0.05 <sup>c</sup>

注: 同列小写字母不同表示差异显著( $\alpha = 0.05$ )。

2.1.2 土壤机械组成垂直分布状况 对土壤机械组成的垂直分布分析显示(图 1), 不同治理措施下土壤沙粒含量随土层深度的增加总体呈现出先降低后增加的趋势, 具体表现为沙粒含量在 10—20 cm 层减小; 土壤粉粒含量在则总体表现为在 10—20 cm 层增加, 而后降低的趋势(图 1); 土壤黏粒含量变化规律在治理类型间有所分异, 其中围封样地土壤黏粒含量随深度的增加而增加, 其余样地出现降低或者波动降低的趋势; 总体上, 在 6 种治理措施下, 土壤细粒物质含量在 10—20 cm 层出现增加的趋势。土壤容重方面, 除流动沙地外, 其他样地土壤容重峰值均出现在 10—20 cm 层, 流动沙地土壤容重随土层深度的增加而降低。

### 2.2 土壤持水特性

2.2.1 土壤水分特征曲线 土壤水分特征曲线可以反映土壤水势和土壤含水率的关系(图 2), 当土壤水势相同时, 土壤含水率越高, 则土壤对水分吸持能力越强。6 种治理方式下不同土层土壤水分特征曲线变化趋势基本相同, 均为非线性过程, 表现为“S”形。通过对曲线斜率进行求解, 6 种治理方式下土壤水分特

征曲线大体上可分为 4 个部分: ①  $pF = 0$  时对应的土壤含水量为土壤饱和持水量,  $0 < pF < 1.4$  的低吸力阶段, 此时土壤含水量较高, 土壤水分处于过剩状态甚至饱和, 该部分土壤水分易受重力作用下排; ②  $1.4 \leq pF < 1.7$  时, 这部分水主要为毛管重力水, 土壤含水率随土壤水势变化显著; ③  $1.7 \leq pF \leq 2.0$  阶段时, 土壤含水率随  $pF$  值升高而降低的趋势开始减缓, 此时土壤水分主要以毛管悬着水的形式存在,  $pF = 2.0$  时曲线上的拐点对应的土壤含水率, 可以认为是实际生产中对应的田间持水量值; ④  $pF > 2.0$  时, 随着  $pF$  的升高, 土壤体积含水量下降并不明显, 水分与土壤结合较为紧密。由图 2 可以看出, 0—10 cm 层土壤水分特征曲线分布较为集中, 说明 6 种样地类型该层土壤水分吸持能力相近。10—20 cm 土壤分布开始分散, 其中小叶锦鸡儿群落与小叶杨人工林曲线右移明显, 水分吸持能力增强; 流动沙地水分特征曲线位移最小, 水分吸持能力与 0—10 cm 层基本相同。0—60 cm 剖面土壤对水分的吸持能力整体呈现出先增加后降低的趋势。

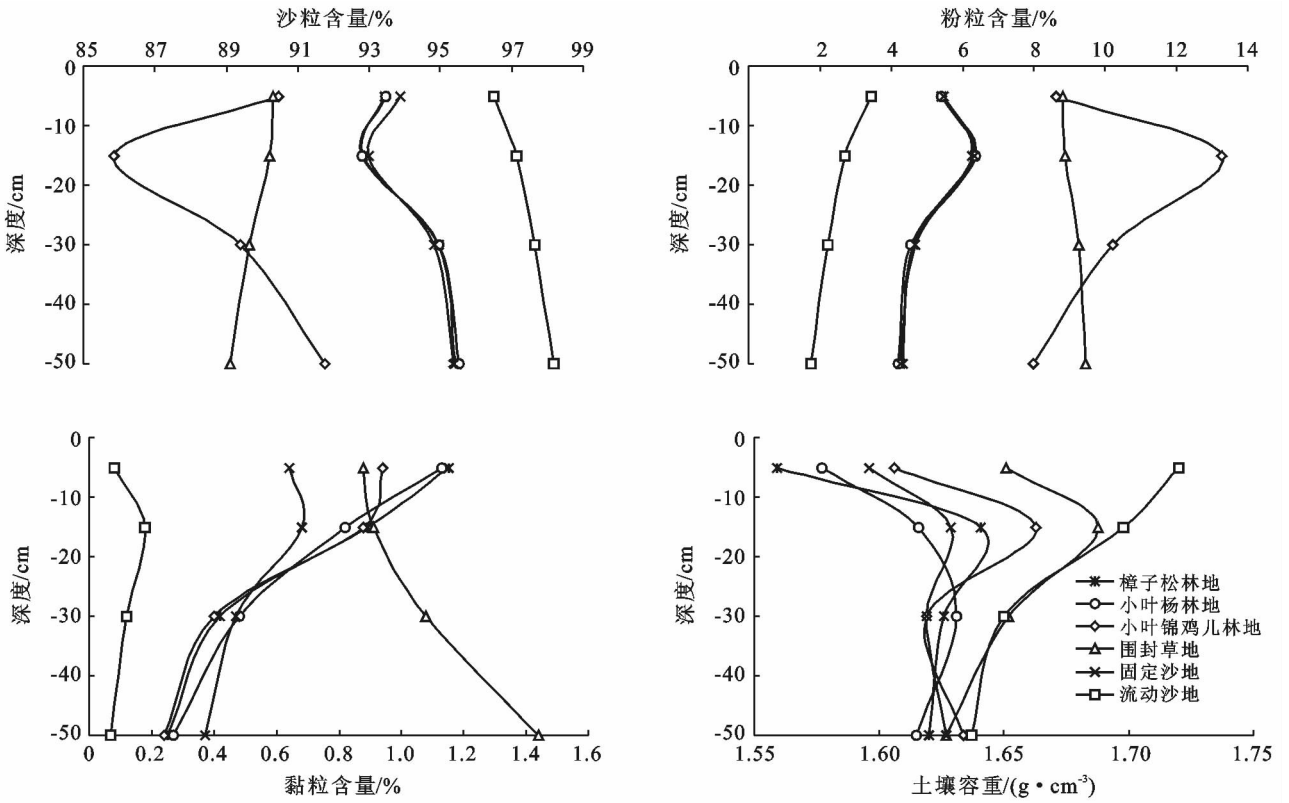


图 1 不同治理措施下沙地土壤机械组成及土壤容重垂直分布

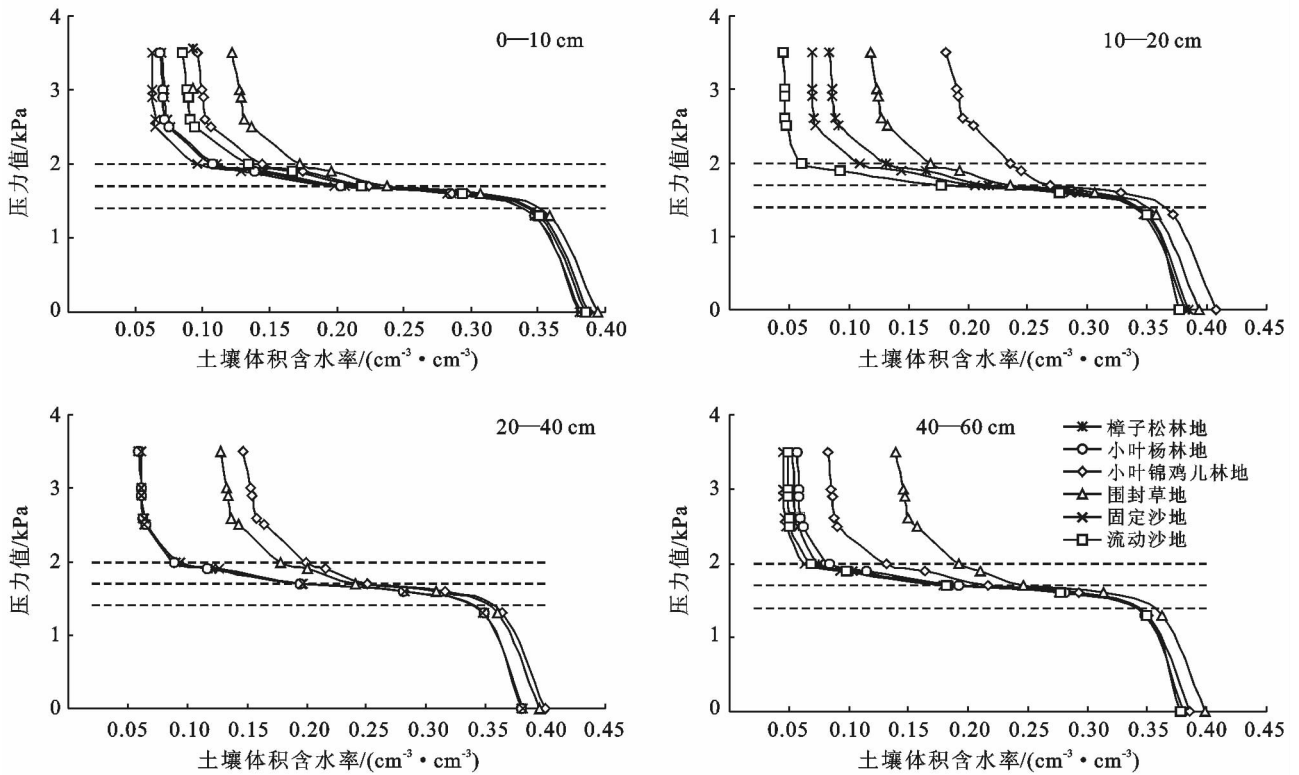


图 2 不同治理措施下沙地土壤水分特征曲线

2.2.2 土壤有效水和土壤过剩水含量 通常来讲, 将  $pF=4.2$  时的土壤含水率看作是永久凋萎点含水率, 此时的土壤水分已经很难被植物吸收利用, 因此

本文将  $pF \geq 4.2$  的土壤水分看作为无效水; 饱和持水量与田间持水量间的水分称为过剩水, 因为不能被土壤有效吸持而迅速下渗, 因此可以在一定程度上反映

出样地对地下水的补充能力;田间持水量与永久凋萎点含水量间的水分可以直接供植物生长所需,被称为有效水。本文通过对土壤水分特征曲线进行求解,计算出土壤有效水和过剩水总量及对应的土壤含水率范围,需指出的是上述两指标为理论值,并不是直接测量得到的土壤实时含水率。

图3中柱状的高低反映了土壤有效水和过剩水含量所对应的土壤体积含水率上的分布范围,柱状的长短代表二者含量的多少。不同样地间相同的土壤体积含水率能对植物起到的作用不同。对于小叶锦鸡儿群落和围封草地,15%左右的土壤含水率是可供植物有效利用的部分,而其他4种样地类型在该含水率下,土壤水分则处于过剩状态;同样,当土壤含水率降至5%~10%范围内时,小叶锦鸡儿群落和围封草地已经达到干旱状态,而其他样地类型土壤则能继续对植物供水。

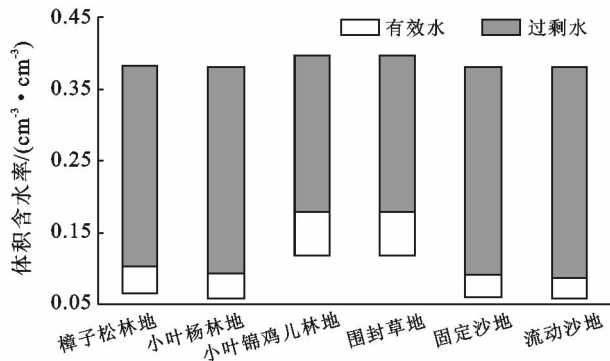


图3 不同治理措施下沙地土壤有效水和过剩水含量

6种样地类型间过剩水比例最低的为小叶锦鸡儿群落( $0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ),对应的土壤含水率范围为19.80%—39.68%,其次为围封草地( $0.21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ),对应的土壤含水率范围为18.19%~39.35%,二者间差异不显著,与剩余4种样地类型差异显著( $\alpha=0.05$ ,下同)。过剩水比例最高的样地类型为流动沙地( $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ),对应的土壤含水率范围为6.41%~36.62%。小叶杨树林、樟子松林、固定沙地间过剩水比例差异不显著。有效水比例最高的样地类型为小叶锦鸡儿群落 $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,对应的土壤体积含水率上下限14.84%~19.80%;最低的流动沙地 $0.02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,对应范围为4.42%~6.41%,二者间差异显著,其余样地类型间差异不显著。有效水比例和过剩水比例的相对大小,在一定程度上反映了土壤对水分的持续能力,在6中样地类型中,小叶锦鸡儿群落和围封草地土壤对水分的吸收、保持能力较强,能有效储存较多水分,其他4中样地类型土壤透水性较好,在降水充足情况下对地下水补充能力较好。

### 2.3 土壤质地对土壤持水性能的影响

对6种治理措施下土壤水分特征曲线和土壤机械组成的分析出现一个共同特征,即土壤水分特征曲线在10—20 cm明显右移,同时该层土壤机械组成沙粒含量降低,粉、黏粒含量增加,尤其粉粒含量增加明显。因此,本文分别以6种样地土壤有效水含量、土壤过剩水含量为因变量,土壤沙粒、粉粒、黏粒含量以及容重为自变量进行回归分析。得到如下结果:

(1)土壤机械组成和容重构建的有效水含量回归方程为:

$$AW=0.35S_i+2.54C_l-0.02\rho_b+0.03 \quad (2)$$

式中:AW——有效水含量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $S_i$ ——粉粒体积分数(%); $C_l$ ——黏粒体积分数(%); $\rho_b$ ——土壤容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

结果显示,土壤有效水含量与土壤粉粒、黏粒含量呈正相关关系,土壤黏粒这一指标的回归系数达到2.54,是影响土壤有效水含量的主要因素,黏粒含量的增加对提高土壤有效水比例有较大的贡献;与土壤容重呈负相关关系,回归系数为0.02,说明研究区土壤容重只在较小程度上引起土壤有效水的变化。土壤沙粒含量由于未通过假设检验而被排除。有效水含量的回归方程判决系数 $R^2$ 为0.71,即土壤有效水含量的变化在70%程度上可由土壤粉粒、黏粒以及土壤容重来解释。

(2)土壤机械组成和容重构建的过剩水含量回归方程为:

$$EW=0.42-1.04S_i-2.65C_l-0.05\rho_b \quad (3)$$

结果显示,土壤过剩水含量与土壤粉粒含量、黏粒含量以及土壤容重均呈负相关关系。与土壤有效水类似,黏粒仍是影响土壤过剩水含量的主要指标,黏粒含量的增加会显著减少土壤当中过剩水比例;土壤粉粒对过剩水含量的贡献率与有效水相比有大幅提高,土壤容重对其的影响仍在小尺度上发挥作用。土壤沙粒含量由于未通过假设检验而被排除。回归方程判决系数 $R^2=0.89$ 。说明土壤过剩水的变化可以在近90%程度上用土壤粉粒、黏粒、容重来解释。从上述3个指标与土壤有效水、土壤过剩水比例的相关系数可以判断,土壤黏粒含量、土壤粉粒含量及土壤容重对土壤过剩水的影响效果要更加明显。

## 3 讨论

在对土壤水分的研究中,土壤饱和持水量和土壤田间持水量一般采用环刀法进行测量,对于吸水过程需要人为判断,具有一定的主观性,还有学者利用马歇尔公式计算土壤饱和持水量<sup>[16]</sup>,由于公式中涉及

的土壤指标较多,需要对土壤总孔隙度、土壤容重以及土壤密度分别进行测量,较为复杂和不便。本文利用土壤水分特征曲线,通过对比曲线形状和分布情况,不仅能直观的展现各样地土壤不同压力水头下对水分吸释能力,而且能更精确的计算出饱和持水量和田间持水量,使研究结果更为科学可信。

在对土壤过剩水和土壤有效水的回归分析中,土壤沙粒含量均被排除,这是由于研究区处于科尔沁沙地,所选择的 6 种样地类型土壤母质均为风沙土,沙粒含量背景值本身较大,而其变化范围仅在 5% 左右,同时土壤水分运移情况主要受到土粒表面能的影响<sup>[17]</sup>,土壤颗粒越小,所具有的表面能越大,对水分的吸附能力越强。土壤过剩水和土壤有效水本质就是不同水势下土壤的持水能力,因此受土壤细粒物质含量影响最大。不同的治理措施通过改变地表覆盖情况,影响风沙侵蚀情况,改变土壤机械组成,增加土壤细粒物质含量,进而改变土壤水分持蓄能力,改善土壤水分状况。

## 4 结论

(1) 治理措施能明显改善土壤水分状况。与流动沙地相比,治理措施下土壤水分特征曲线均有右移趋势,在 10—20 cm 层表现最为明显;各治理措施下土壤有效水含量及对应含水率范围均有提高,过剩水含量降低,土壤对水分吸存能力增加。小叶锦鸡儿群有效水含量为各治理措施中最高,达到  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,对应土壤含水率范围为 14.84%~19.80%。

(2) 治理措施对土壤结构的影响差异显著。总体上各治理措施土壤沙粒含量降低,粉粒、黏粒含量增加;沙粒含量降低最多为小叶锦鸡儿群落,较流动沙地减少 7.99%;粉粒含量增加 7.49%,为各治理措施中最高;围封措施下土壤黏粒含量为各治理措施间最高,达到 1.08%。同时治理措施能有效降低 0—60 cm 层土壤平均容重,除围封外,其他措施与流动沙地土壤容重差异显著。

(3) 土壤过剩水含量的回归方程为:  $AW = 0.35S_i + 2.54C_i - 0.02\rho_b + 0.03$ ,判决系数为 0.71;土壤过剩水含量的回归方程为  $EW = 0.42 - 1.04S_i - 2.65C_i - 0.05\rho_b$ ,判决系数为 0.89。土壤黏粒含量是影响土壤有效水和土壤过剩水的主要因素,回归系数分别达到 2.54 和 -2.65,土壤粉粒含量和土壤容重也均对土壤有效水和过剩水含量产生影响。

(4) 土壤黏、粉粒含量是改善沙化土地土壤结构及水分吸持能力的主要因素。小叶锦鸡儿和围封措施下土壤细粒物质含量增加明显,水分持蓄能力的提

高更多的有效水分能供给植物生长、更新所用,是本研究中较为理想的治理方式;其他治理措施下土壤过剩水仍较高,可供植物利用的土壤水分较少,但同时地下水能起到较好的补充作用。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 赵文智,刘志民,常学礼,奈曼沙区植被土壤水分状况的研究[J]. 干旱区研究,1992(3):40-44.
- [2] 牛存洋,阿拉木萨,刘亚,等. 科尔沁沙地固沙植物根系与土壤水分特征研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(10):106-111.
- [3] 刘凯,高磊,彭新华,张中彬. 半干旱区科尔沁沙地土壤水分时空特征研究[J]. 土壤,2015(4):765-772.
- [4] 杨朝瀚. 黄土丘陵沟壑区几种主要水土保持型植被水分生态特征研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2006.
- [5] 刘丙霞. 黄土区典型灌草植被土壤水分时空分布及其植被承载力研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2015.
- [6] 石莎,马风云,刘立超,等. 沙坡头地区不同植被结构对沙地土壤水分的影响[J]. 中央民族大学学报:自然科学版,2004,13(2):137-141,145.
- [7] 潘颜霞,王新平,苏延桂,等. 荒漠人工固沙植被区浅层土壤水分动态的时间稳定性特征[J]. 中国沙漠,2009,29(1):81-86.
- [8] 李传荣,刘金文,陈永杰,等. 经济林下土壤水分和土壤结构动态变化的研究[J]. 水土保持研究,2018,8(3):131-134.
- [9] 史志华,朱华德,陈佳,等. 小流域土壤水分空间异质性及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报,2012,23(4):889-895.
- [10] 段旭. 六盘山地区水文要素坡面变化[D]. 北京:中国林业科学研究院,2011.
- [11] 袁剑舫. 土壤水的能量状态[J]. 土壤通报,1984,15(6):282-287.
- [12] 李秋月,潘学标. 气候变化对我国北方农牧交错带空间位移的影响[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(10):1-6.
- [13] 赵哈林,张铜会,崔建垣,等. 近 40 年我国北方农牧交错区气候变化及其与土地沙漠化的关系:以科尔沁沙地为例[J]. 中国沙漠,2000,20(S1):2-7.
- [14] 郭庆华,喻红,曹艳丽,等. 北方森林草原生态过渡带的遥感研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,1999,35(4):550-557.
- [15] 常学礼,赵学勇,王玮,等. 科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应[J]. 生态学报,2013,33(21):7002-7012.
- [16] 王龙,银小兵,吕晓航,等. 四川盆地区天然气开采对土壤饱和持水量的影响[J]. 中国水土保持,2016(8):60-62.
- [17] 李卓. 土壤机械组成及容重对水分特征参数影响模拟试验研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.