

网络出版时间:2014-01-02 15:59

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.02.055

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.02.055.html>

砒砂岩与风沙土复配土壤的持水特性研究

张 露^{1,2}, 韩霁昌¹, 罗林涛^{1,3}, 马增辉¹, 王欢元¹

(1 陕西省地产开发服务总公司, 国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075;

2 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

[摘 要] 【目的】研究毛乌素沙地砒砂岩与风沙土(其中砂粒含量为 95.31%)不同质量比复配土壤的持水情况, 为砒砂岩改良风沙土的应用提供参考。【方法】将砒砂岩与风沙土分别按 0:1, 1:5, 1:2, 1:1, 2:1, 5:1 和 1:0 的质量比复配, 采用离心机法测定各复配土壤在不同水吸力(1, 3, 5, 7, 10, 30, 50, 70, 100, 200, 300, 500, 700, 1 000 和 1 200 kPa)下的容积含水量, 利用 Gardner 模型拟合并绘制其水分特征曲线, 计算各复配土壤在各水吸力下的比水容量、田间持水量、萎蔫系数、有效水含量和毛管孔隙度及有效水孔隙度。【结果】Gardner 模型能很好地拟合 7 种砒砂岩与风沙土不同质量比复配土壤的水分特征曲线, 随着砒砂岩质量的增加, 水分特征曲线逐渐右移; 在同一水吸力(1~1 200 kPa)条件下, 复配土壤含水量和比水容量均随砒砂岩质量的增加而增大。当砒砂岩质量大于或等于风沙土时, 比水容量出现 10^{-2} 数量级时的水吸力值为 200 kPa, 此时比水容量较高, 土壤供水能力较强; 当砒砂岩质量小于风沙土时, 比水容量出现 10^{-2} 数量级时的水吸力值为 100 kPa(当全为风沙土时, 此条件下的水吸力值为 70 kPa), 此时土壤向作物供水的能力相对较弱。随着复配土壤中砒砂岩质量的增加, 其田间持水量由 4.46% 增加到 17.32%, 全有效水含量由 3.17% 增加到 8.37%, 萎蔫系数由 1.29% 增加到 8.96%; 毛管孔隙度先减小后增大, 呈二次函数趋势变化; 而有效水孔隙度呈指数型增长, 由 7.82% 增加到 15.35%。【结论】砒砂岩与风沙土复配后, 复配土壤的持水保水能力随砒砂岩质量的增加而增强, 但以砒砂岩与风沙土按 5:1 质量比进行复配为宜。

[关键词] 砒砂岩; 风沙土; 复配土壤; 水分特征曲线; Gardner 模型; 土壤改良

[中图分类号] S152.7

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2014)02-0207-08

Water-holding characteristics of compounded soil with feldspathic sandstone and aeolian sandy soil

ZHANG Lu^{1,2}, HAN Ji-chang¹, LUO Lin-tao^{1,3}, MA Zeng-hui¹, WANG Huan-yuan¹

(1 Shaanxi Estate Development Service Corporation, Key Laboratory of Degraded and Unused Land

Consolidation Engineering the Ministry of Land and Resources of China, Xi'an, Shaanxi 710075, China;

2 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3 Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: 【Objective】We studied the water retention properties of compound soil with feldspathic sandstone and aeolian sandy soil (the content of sand was 95.31%) by different mass ratios in Mu Us Sandy Land, to improve the application of feldspathic sandstone to aeolian sandy soil. 【Method】Mixing Feldspathic sandstone and aeolian sandy soil were mixed with mass ratios of 0:1, 1:5, 1:2, 1:1, 2:1, 5:1 and 1:0. Centrifuge method was used to measure the soil volume moistures of each compound soil

[收稿日期] 2013-02-27

[基金项目] 国土资源部公益性行业科研专项(201311005); 陕西省科技新星计划项目(2011KJXX60); 陕西省农业攻关计划项目(2012K01-34)

[作者简介] 张 露(1987—), 女, 四川南部人, 在读博士, 主要从事土壤物理及其改良研究。E-mail: luluqiaofeng@126.com

[通信作者] 韩霁昌(1968—), 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士, 主要从事土地工程及土地资源利用。

E-mail: sxdnetcenter@sohu.com

with various suctions(1,3,5,7,10,30,50,70,100,200,300,500,700,1 000 and 1 200 kPa). Gardner model was used to fit and draw water characteristic curves and specific water capacity,field capacity,permanent wilting coefficient,available water content,capillary porosity and available water porosity were calculated. 【Result】 Gardner model well fitted water characteristic curve for each compound soil of feldspathic sandstone and aeolian sandy soil. With the increase of feldspathic sandstone mass ratio,the water characteristic curves gradually moved to the right. With identical suction (1—1 200 kPa),the compound soil moisture content and specific water capacity increased as the mass ratio of feldspathic sandstone. When mass ratio of feldspathic sandstone was no less than that of aeolian sandy soil, the suction was 200 kPa with large water capacity and strong water supply capacity when specific water capacity was 10^{-2} . When mass ratio of feldspathic sandstone was less than that of aeolian sandy soil,the suction was 100 kPa with weak soil water supply capacity when specific water capacity was 10^{-2} (the suction for pure aeolian sandy soil was 70 kPa). As the increase of feldspathic sandstone mass ratio in compound soil, field water capacity increased from 4.46% to 17.32%,total available water content increased from 3.17% to 8.37%,and permanent wilting coefficient increased from 1.29% to 8.96%. The capillary porosity decreased first followed by increase with quadratic function trend while the available water porosity increased exponentially from 7.82% to 15.35%. 【Conclusion】 Water holding capacity of compound soil increased as the increase of feldspathic sandstone mass ratio,and the best mass ratio of feldspathic sandstone to aeolian sandy soil was 5 : 1.

Key words: feldspathic sandstone; aeolian sandy soil; compound soil; water characteristic curve; Gardner model; soil improvement

毛乌素沙地存在着大量的砒砂岩和风沙土(其中砂粒含量为 95.31%),二者对环境及农业生产的危害甚大,但砒砂岩具有较好的持水保水性^[1-3],风沙土有较强的透水性,将二者结合,既有利于当地生态环境问题的解决,又能提高土地生产力,增加经济效益。目前,国内外对砒砂岩与风沙土复配的研究甚少。李晓丽等^[4]对砒砂岩结构的研究表明,砒砂岩中粒径小于 0.002 mm 的黏粒含量仅有 5%~6%,虽然黏粒缺乏但具有一定的保水性^[5-7]。Han 等^[3]对砒砂岩与风沙土复配后的土壤饱和导水率进行了测定,指出复配土壤的渗透性随着砒砂岩的加入而减小。由于砒砂岩与风沙土复配的研究才刚刚起步,关于复配土壤保水机理及水分随砒砂岩质量的变化趋势还有待深入探究,从水分特征曲线角度研究砒砂岩与风沙土在不同复配质量比下的持水性能还未见报道。故本研究采用 Gardner 模型拟合砒

砂岩与风沙土在 7 种不同质量比下复配土壤的水分特征曲线,并测定各复配土壤在不同水吸力下的比水容量、田间持水量、萎蔫系数、有效水含量和毛管孔隙度及有效水孔隙度,进而分析砒砂岩与风沙土复配土壤在不同质量比下的持水性能,以期确定适宜当地农业生产的砒砂岩与风沙土最优复配方案并指导生产实践。

1 材料与方法

1.1 材 料

在陕北榆林市榆阳区小纪汗乡分别采集砒砂岩和风沙土。其粒径分布情况如表 1 所示。将所采集的砒砂岩和风沙土自然风干后,研磨过孔径 2 mm 筛;然后将砒砂岩(F)与风沙土(S)按照不同质量比($m(F) : m(S) = 0 : 1, 1 : 5, 1 : 2, 1 : 1, 2 : 1, 5 : 1, 1 : 0$)充分混合后备用。

表 1 砒砂岩与风沙土的机械组成
Table 1 Composition of feldspathic sandstone and aeolian sandy soil %

样品 Sample	颗粒组成 Texture			质地类别 Texture style
	黏粒(<0.002 mm) Clay	粉粒(≥0.002~<0.05 mm) Silty	砂粒(≥0.05~<2 mm) Sand	
风沙土 Aeolian sandy soil	0.24	4.45	95.31	砂土 Sand
砒砂岩 Feldspathic sandstone	7.06	58.09	34.85	粉砂土 Silt loam

1.2 土壤水分特征曲线的测定及拟合

分别取砒砂岩与风沙土按不同质量比混合的复配土壤样品,均按 1.35 g/cm^3 体积质量装到容积 100 cm^3 的环刀中,经吸水、控水、平衡后,用 CR21G III 高速冷冻离心机测定各土样的水分特征曲线(在离心机脱水过程中,不考虑环刀中土样体积质量的变化),选取 15 个水吸力点(1,3,5,7,10,30,50,70,100,200,300,500,700,1 000 和 1 200 kPa)进行土样含水量的测定^[8],然后利用 Gardner 模型对试验数据进行拟合。Gardner 模型形式简单,符合脱水曲线中低水吸力段,能较好地表达土壤水分特征曲线的变化趋势^[5,7,9-12]。有学者应用 Gardner 模型对不同沙土配比的运动草坪根系层土壤持水性进行的研究表明,Gardner 模型能很好地拟合不同配比土壤的水分特征曲线^[6]。

描述土壤水分特征曲线的 Gardner 模型^[13-14]可表示为:

$$S = a\theta^b. \quad (1)$$

式中: S 为土壤水吸力,单位为 100 kPa; a 、 b 为相应的经验常数; θ 为容积含水量,单位为 cm^3/cm^3 。

式(1)经转换得出以 θ 为因变量的关系式为:

$$\theta = a^{-\frac{1}{b}} S^{\frac{1}{b}} = AB^{-B}. \quad (2)$$

式中:参数 A 为土壤水吸力 $S = 100 \text{ kPa}$ 时的容积含水量,一般表征水分特征曲线的高低,也指持水能力的大小,但不能绝对地指示持水能力;参数 B 反映当土壤水吸力变化时土壤含水量变化的快慢程度($0 \leq B \leq 1$),反映持水能力的大小^[6]。

利用 Excel 将土壤水吸力 S 与容积含水量 θ 进行 Gardner 模型乘幂拟合后,得到砒砂岩与风沙土各质量比复配土壤的水分特征曲线,最后计算各复配土壤的比水容量、水分参数(田间持水量、萎蔫系数、有效水含量^[15])和当量孔径分布(毛管孔隙度及有效水孔隙度)。

1.3 复配土壤比水容量、水分参数和当量孔径分布的计算

1.3.1 比水容量

土壤比水容量 $C(S)$ 是进行土壤水运移模拟的重要参数。对式(2)求导得到比水容量的表达式为^[16]:

$$C(S) = \frac{d\theta}{dS} = -\frac{1}{b} a^{-\frac{1}{b}} S^{\frac{1}{b}-1} = A \cdot B \cdot S^{-(B+1)}. \quad (3)$$

式中: A 、 B 的意义同前, $A \cdot B$ 是土壤水吸力为 100 kPa 时的比水容量值 C_0 。

1.3.2 水分参数

利用水分特征曲线能获得一些

重要的水分参数。田间持水量是土壤水分有效性的上限,大约相当于水吸力为 33 kPa 时的土壤含水量;萎蔫系数是土壤水分有效性的下限,土壤含水量低于此值时,作物便难以生长,甚至枯死,大约相当于水吸力为 1 500 kPa 时的土壤含水量。在田间持水量和萎蔫系数之间的水分被认为是有效的,田间持水量减去萎蔫系数为最大有效含水量,即全有效水含量^[17-18]。因吸收难易程度不同,全有效水又可以分为速效水(易效水)和迟效水(难效水),速效水含量指田间持水量减去水吸力为 600 kPa 时的土壤含水量,迟效水含量指水吸力为 600 kPa 时的土壤含水量减去萎蔫系数^[6]。

1.3.3 毛管孔隙度和有效水孔隙度

若将土壤中的孔隙设想为各种孔径的圆形毛管,则土壤水吸力 S 和毛管直径 d 的关系可简单地由茹林公式表示^[19]:

$$S = 4\sigma/d. \quad (4)$$

式中: S 的意义同前; σ 为水的表面张力系数,室温条件下一般取 $75 \times 10^{-5} \text{ N/(cm/d)}$; d 为毛管直径。若水吸力单位用 Pa,毛管直径单位用 mm,则毛管直径 d 和水吸力 S 的关系可表示为 $d = 300/S$,由该式计算出的孔径称为当量孔径(以区别于土壤的真实孔径)。毛管孔隙的孔径范围为 0.03~0.1 mm,有效水孔隙的孔径范围为 0.002~0.06 mm^[19]。用 $d = 300/S$ 求得毛管孔隙和有效水孔隙所对应的水吸力范围(3~10 kPa,5~150 kPa),然后利用水分特征曲线找出毛管孔隙和有效水孔隙所对应水吸力段的容积含水量范围,再用各自范围内的高容积含水量减去低容积含水量,即得毛管孔隙度和有效水孔隙度。

2 结果与分析

2.1 砒砂岩与风沙土复配土壤的水分特征曲线

水分特征曲线反映了土壤水能量与其含水量之间的量化关系,可进行土壤含水量与土壤水吸力间的换算,可用原状土或填装土进行测定^[20-21]。水分特征曲线依赖于土壤性状,在不同阶段影响因素也不同,土壤水吸力为 0~100 kPa 时,水分特征曲线的形状依赖于土壤的结构特性(大孔隙);随着土壤水吸力的增大,水分特征曲线的形状逐渐转为依赖于质地类型,特别是在水吸力为 1 500 kPa 以上时表现得更为明显。总体而言,土壤水分特征曲线受到土壤有机质含量、黏粒含量、比表面积大小以及孔隙度等因素的影响^[22-23]。

砒砂岩与风沙土在不同质量比下复配后的土壤

水分特征曲线如图 1 所示,图 1 中的点为实测值,线为拟合值。从图 1 可以看出,随着复配土壤中砷砂岩质量的增加,其水分特征曲线逐渐向右移动,即在同一水吸力(1~1 200 kPa)下,随着砷砂岩质量的增加,其含水量逐渐增大。说明在风沙土中加入砷砂岩后能增加其持水能力,为土壤储存水分创造了条件。复配土壤中,当全为砷砂岩时,Gardner 模型的拟合精度最高,为 0.996 2;当全为风沙土时,Gardner 模型的拟合精度最低,为 0.938 8。因此,Gardner 模型能很好地拟合这 7 种砷砂岩与风沙土复配土壤的水分特征曲线。

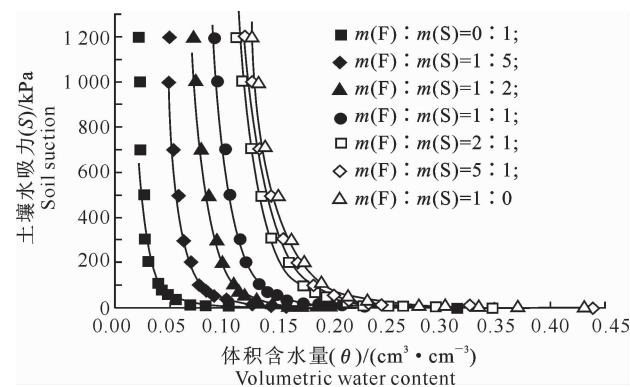


图 1 砷砂岩(F)与风沙土(S)不同质量比复配土壤的水分特征曲线

Fig. 1 Water characteristic curves of compound soils with feldspathic sandstone (F) and aeolian sandy soil (S)

2.2 砷砂岩与风沙土复配土壤的比水容量

比水容量或水容量是土壤释水能力即供水能力

表 2 7 种砷砂岩与风沙土不同质量比复配土壤比水容量 C(S)的计算参数

Table 2 Calculating parameters values of specific water capacity C(S) of 7 kinds of feldspathic sandstone and aeolian sandy soil compound soil in different mass ratios							
$m(\text{砷砂岩}):m(\text{风沙土})$ $m(\text{Feldspathic sandstone}):m(\text{Aeolian sandy soil})$	A	A · B	B+1	$m(\text{砷砂岩}):m(\text{风沙土})$ $m(\text{Feldspathic sandstone}):m(\text{Aeolian sandy soil})$	A	A · B	B+1
0 : 1	0.031	0.041	1.326	2 : 1	0.126	0.146	1.156
1 : 5	0.060	0.073	1.222	5 : 1	0.136	0.158	1.162
1 : 2	0.082	0.096	1.177	1 : 0	0.143	0.168	1.173
1 : 1	0.099	0.114	1.154				

砷砂岩与风沙土不同质量比复配土壤在水吸力为1~1 200 kPa时的比水容量见表 3。由表 3 可知,在中低水吸力(1~1 200 kPa)条件下,各复配土壤的比水容量均随砷砂岩质量的增加而增大,说明在同一水吸力(1~1 200 kPa)下,砷砂岩质量越高的复配土壤,其水分随水吸力的变化越快,失水量越多,对作物的供水能力越强。但随着水吸力增大,比水容量增加趋势渐趋平缓,这是因为在土壤孔隙较大处毛管势较小,其中的水分在较小水吸力下就能

的量化指标,可以反映土壤水分含量随水吸力变化的快慢程度,在评价土壤水分及其对植物的有效性上具有重要意义^[6,24]。利用水分特征曲线,得到的砷砂岩与风沙土复配土壤比水容量表达式中的参数如表 2 所示。由表 2 可知,随着复配土壤中砷砂岩质量的增加,A 值增大,从全风沙土的 0.031 增加到全砷砂岩的 0.143,复配土壤的持水能力呈增强趋势,且 A 值与砷砂岩质量有显著的线性关系,其线性方程为 $y=0.114x+0.0397(R^2=0.969)$ (其中 y 为参数 A,x 为复配土壤中砷砂岩质量),所以可以简单地从参数 A 入手来判断复配土壤的持水性能。由前文式(2)和式(3)可以看出,B 值对比水容量的影响较其对含水量的影响小,指数(B+1)表明比水容量随水吸力的变化远要比含水量随水吸力的变化快。从指数(B+1)还可知,当砷砂岩质量小于或等于风沙土时,随砷砂岩质量的增加,比水容量随水吸力变化程度逐渐减慢;而当砷砂岩质量大于风沙土时,随砷砂岩质量的增加,比水容量随水吸力的变化程度又逐渐加快,其变化快慢的趋势与砷砂岩质量符合二次函数关系,其关系式可表示为 $y=0.3771x^2-0.5057x+1.3124$ (其中 y 为比水容量表达式中的指数 B+1,x 为复配土壤中砷砂岩质量),相关性 $R^2=0.9604$ 。A · B 值随砷砂岩质量的增加而增大,从全风沙土的 0.041 增加到全砷砂岩的 0.168,表明当土壤水吸力为 100 kPa 时,比水容量值 C₀ 随砷砂岩质量的增加而增大。

排出,而土壤孔隙较大处的空间较大,在持水情况下,能储存相对较多的水分,在增加相同水吸力的情况下能排出较多水分,从而引起土壤含水量变化较大,所以在水吸力较小时比水容量较大,且比水容量随水吸力的变化趋势也较快,但随着水吸力的逐渐升高,土壤大孔隙中水分被排尽,当继续增加水吸力时,此时小孔隙便开始失水,但小孔隙的失水情况与大孔隙刚好相反,所以随着水吸力的继续增加,其比水容量减小,且变化幅度也有所减慢^[25]。

一般认为,当比水容量达到 10^{-2} 数量级时,土壤水分处于或相当于毛管断裂含水量的水平,此时土壤的供水能力不再能及时地满足作物生长需要^[26]。由表 3 可知,当水吸力为 70~500 kPa 且砷砂岩质量小于风沙土时,复配土壤的比水容量变化幅度不大,基本处于 10^{-2} 数量级,说明当砷砂岩质量小于风沙土时,土壤水分在水吸力为 70~500 kPa 时的变化幅度小;当水吸力为 200~700 kPa 且砷砂岩与风沙土质量相等时,复配土壤的比水容量变化幅度不大,也基本处于 10^{-2} 数量级,说明当砷砂岩与风沙土质量一样时,土壤水分在水吸力为 200~700 kPa 时的变化幅度也不大;在水吸力为 200~1 000 kPa 且砷砂岩质量大于风沙土时,复配

土壤的比水容量变化幅度不大,基本也处于 10^{-2} 数量级,说明当砷砂岩质量小于风沙土时,土壤水分在水吸力为 200~1 000 kPa 时的变化幅度也不大;当水吸力增加到 1 200 kPa 时,各复配土壤的比水容量均达到了 10^{-3} 数量级,说明此时所有复配土壤中的水分基本处于植物难以利用的状态。当砷砂岩质量小于或等于风沙土时,比水容量达到 10^{-3} 数量级的水吸力值小于 1 200 kPa;当比水容量出现 10^{-3} 数量级时最小的水吸力值为 300 kPa(全风沙土时)。由此可见,随着砷砂岩质量的增加,比水容量出现 10^{-3} 数量级的水吸力值越大,这种土壤中水分的利用程度及效率就越低。

表 3 不同水吸力下砷砂岩与风沙土不同质量比复配土壤的比水容量

Table 3 Specific water capacity of compound soils with feldspathic sandstone and aeolian sandy soil								
in different suctions								
		mL/(100 kPa · g)						
土壤水吸力/kPa Soil suction		$m(\text{砒砂岩}) : m(\text{风沙土})$ $m(\text{Feldspathic sandstone}) : m(\text{Aeolian sandy soil})$						
		0 : 1	1 : 5	1 : 2	1 : 1	2 : 1	5 : 1	1 : 0
1	1.85×10 ¹	2.03×10 ¹	2.17×10 ¹	2.32×10 ¹	2.98×10 ¹	3.32×10 ¹	3.73×10 ¹	
3	0.43×10 ¹	0.53×10 ¹	0.60×10 ¹	0.65×10 ¹	0.84×10 ¹	0.93×10 ¹	1.03×10 ¹	
5	0.22×10 ¹	0.28×10 ¹	0.33×10 ¹	0.36×10 ¹	0.46×10 ¹	0.51×10 ¹	0.57×10 ¹	
7	0.14×10 ¹	0.19×10 ¹	0.22×10 ¹	0.25×10 ¹	0.32×10 ¹	0.35×10 ¹	0.38×10 ¹	
10	8.76×10 ⁻¹	0.12×10 ¹	0.15×10 ¹	0.16×10 ¹	0.21×10 ¹	0.23×10 ¹	0.25×10 ¹	
30	2.04×10 ⁻¹	3.19×10 ⁻¹	3.97×10 ⁻¹	4.58×10 ⁻¹	5.85×10 ⁻¹	6.38×10 ⁻¹	6.90×10 ⁻¹	
50	1.04×10 ⁻¹	1.71×10 ⁻¹	2.18×10 ⁻¹	2.54×10 ⁻¹	3.24×10 ⁻¹	3.53×10 ⁻¹	3.79×10 ⁻¹	
70	6.64×10 ⁻²	1.13×10 ⁻¹	1.46×10 ⁻¹	1.72×10 ⁻¹	2.20×10 ⁻¹	2.38×10 ⁻¹	2.55×10 ⁻¹	
100	4.14×10 ⁻²	7.33×10 ⁻²	9.62×10 ⁻²	1.14×10 ⁻¹	1.46×10 ⁻¹	1.58×10 ⁻¹	1.68×10 ⁻¹	
200	1.65×10 ⁻²	3.14×10 ⁻²	4.25×10 ⁻²	5.13×10 ⁻²	6.54×10 ⁻²	7.04×10 ⁻²	7.45×10 ⁻²	
300	9.64×10 ⁻³	1.92×10 ⁻²	2.64×10 ⁻²	3.22×10 ⁻²	4.09×10 ⁻²	4.40×10 ⁻²	4.63×10 ⁻²	
500	4.90×10 ⁻³	1.03×10 ⁻²	1.45×10 ⁻²	1.78×10 ⁻²	2.27×10 ⁻²	2.43×10 ⁻²	2.54×10 ⁻²	
700	3.13×10 ⁻³	6.81×10 ⁻³	9.74×10 ⁻³	1.21×10 ⁻²	1.54×10 ⁻²	1.64×10 ⁻²	1.71×10 ⁻²	
1 000	1.95×10 ⁻³	4.40×10 ⁻³	6.40×10 ⁻³	8.02×10 ⁻³	1.02×10 ⁻²	1.09×10 ⁻²	1.13×10 ⁻²	
1 200	1.53×10 ⁻³	3.52×10 ⁻³	5.16×10 ⁻³	6.50×10 ⁻³	8.24×10 ⁻³	8.78×10 ⁻³	9.10×10 ⁻³	

依据比水容量达到 10^{-2} 数量级的先后顺序,可将本试验 7 种复配土壤的供水能力分为以下 2 类:砷砂岩质量大于或等于风沙土时为第Ⅰ类,比水容量出现 10^{-2} 数量级的水吸力值为 200 kPa,此时土壤比水容量较高,土壤供水能力较强;砷砂岩质量小于风沙土时为第Ⅱ类,比水容量出现 10^{-2} 数量级的水吸力值为 100 kPa(当全为风沙土时,比水容量出现 10^{-2} 数量级的水吸力值为 70 kPa),此时土壤向作物供水的能力相对较弱,特别是全风沙土时,土壤的供水能力最弱。

2.3 砷砂岩与风沙土复配土壤的水分有效性

根据图 1 得到砷砂岩与风沙土不同质量比复配土壤的水分参数见表 4。从表 4 可以看出,砷砂岩与风沙土复配土壤持水保水能力存在较大差异。7 种复配土壤的持水能力随砷砂岩质量的增加而增

强,全有效水含量从全风沙土的 3.17% 增加到全砷砂岩的 8.37%。土壤有效水的绝对含量(速效水含量/全有效水含量)在砷砂岩质量小于或等于风沙土时,随砷砂岩质量的增加而减小,从 0.858 0 减小到 0.809 2,表明此时土壤中作物可利用的水分在下降;而在砷砂岩质量大于风沙土时,土壤有效水的绝对含量随着砷砂岩质量的增大而略有增加,从 0.809 9 增加到 0.816 0,虽然作物可利用水分量有所上升,但增加趋势并不明显。拟合结果表明,土壤有效水的绝对含量与砷砂岩质量呈现出较好的二次函数关系,其关系式为 $y=0.108x^2-0.1441x+0.8549$ (其中 y 为复配土壤有效水的绝对含量, x 为复配土壤中砷砂岩质量), $R^2=0.9713$ 。各复配土壤的田间持水量和萎蔫系数(无效水)均呈现出随砷砂岩质量增加而增大的趋势,田间持水量从全风

沙土的 4.46% 增加到全砒砂岩的 17.32%，萎焉系数从全风沙土的 1.29% 增加到全砒砂岩的 8.96%。在 7 种复配土壤中，迟效水的变化幅度最小，且随砒砂岩质量的增加呈上升趋势。总之，向风沙土中加

入一定量的砒砂岩后，可以增加复配土壤的有效水分含量，增强土壤的持水能力，达到天旱而地不旱的效果，从而可以为作物生长提供必要的水分支持。

表 4 砒砂岩与风沙土不同质量比复配土壤的水分参数

Table 4 Water parameters of compound soils with feldspathic sandstone and aeolian sandy soil						%
$m(\text{砒砂岩}) : m(\text{风沙土})$ $m(\text{Feldspathic sandstone}) :$ $m(\text{Aeolian sandy soil})$	田间持水量 Field capacity	有效水 Available water			萎焉系数 Permanent wilting coefficient	
		全有效水 Total available water	速效水 Quick available water	迟效水 Slow available water		
0 : 1	4.46	3.17	2.72	0.45	1.29	
1 : 5	7.65	4.35	3.61	0.74	3.30	
1 : 2	9.92	4.87	3.98	0.89	5.06	
1 : 1	11.72	5.19	4.20	0.99	6.53	
2 : 1	14.95	6.68	5.41	1.27	8.27	
5 : 1	16.20	7.46	6.06	1.40	8.74	
1 : 0	17.32	8.37	6.83	1.54	8.96	

2.4 砒砂岩与风沙土复配土壤的当量孔径分布

土壤孔隙分布状况主要由颗粒组成和土壤结构所决定，其会对土壤水分特征曲线产生一定影响。了解复配土壤毛管孔隙度和有效水孔隙度的分布情况，对分析其水分吸持运移能力、土壤通气透水性能

及作物对水分吸收的难易程度有重要的参考价值^[13,24]。根据图 1 计算出 7 种砒砂岩与风沙土复配土壤的毛管孔隙度和有效水孔隙度，结果如表 5 所示。

表 5 不同水吸力下砒砂岩与风沙土不同质量比复配土壤的当量孔径分布

Table 5 Equivalent diameter distribution of compound soils with feldspathic sandstone and aeolian sandy soil in different water suctions						%
$m(\text{砒砂岩}) : m(\text{风沙土})$ $m(\text{Feldspathic sandstone}) :$ $m(\text{Aeolian sandy soil})$	毛管孔隙度 Capillary porosity	有效水孔隙度 Available water porosity	$m(\text{砒砂岩}) : m(\text{风沙土})$ $m(\text{Feldspathic sandstone}) :$ $m(\text{Aeolian sandy soil})$	毛管孔隙度 Capillary porosity	有效水孔隙度 Available water porosity	
0 : 1	4.28	7.82	2 : 1	5.01	11.83	
1 : 5	4.11	8.76	5 : 1	5.72	13.38	
1 : 2	3.94	8.99	1 : 0	6.68	15.35	
1 : 1	3.86	9.15				

由表 5 可知，在砒砂岩质量小于或等于风沙土时，毛管孔隙度(传导孔隙度)随砒砂岩质量的增加而减小，从 4.28% 减小到 3.86%；当砒砂岩质量大于风沙土时，毛管孔隙度随砒砂岩质量的增加而增大，从 5.01% 增加到 6.68%。拟合分析发现，毛管孔隙度与砒砂岩质量呈现出较好的二次函数关系，其关系式可表示为 $y = 5.361 4x^2 - 2.899 3x + 4.313 6$ (其中 y 为毛管孔隙度， x 为复配土壤中砒砂岩质量)， $R^2 = 0.968 1$ 。毛管孔隙度的增加有利于土壤水分的传导，能降低土壤内部和表层积水，使土壤处于较好的水分环境下，可以保证作物生长良好。有效水孔隙度随复配土壤中砒砂岩质量的增加从全风沙土的 7.82% 增加到全砒砂岩的 15.35%，呈现较好的指数型增长关系，其关系式可表示为 $y = 7.467 1e^{0.673 9x}$ (其中 y 为有效水孔隙度， x 为复配土壤中砒砂岩质量)， $R^2 = 0.930 1$ 。有效水孔隙度的增大有利于土壤透水保水以及形成良好的土壤结

构。从对毛管孔隙度和有效水孔隙度的分析可以看出，在风沙土中加入砒砂岩后，复配土壤的当量孔径分布发生变化，土壤水分的传导性得到改善，但有效水孔隙度仍远未达到结构良好土壤的有效水孔隙度标准(20%~35%)^[19]。所以就土壤有效水孔隙度而言，还有待进一步探索分析砒砂岩与风沙土的混合比例，以寻求孔隙分布最优时二者的最佳配比方案。

3 讨论

本研究结果表明，Gardner 模型($S = a\theta^b$)能很好地拟合本试验所设计的 7 种砒砂岩与风沙土不同质量比复配土壤的水分特征曲线，且随着砒砂岩质量的增加，其水分特征曲线呈右移的趋势，拟合结果显示，当水吸力一定时，土壤容积含水量随砒砂岩质量的增加而增大，其储水潜力逐渐增强。

本研究中，在同一水吸力(1~1 200 kPa)下，7

种砒砂岩与风沙土复配土壤的比水容量随砒砂岩质量的增加而增大,根据各复配土壤比水容量出现 10^{-2} 数量级的先后顺序,可将7种复配土壤的供水能力分为2类,即砒砂岩质量大于或等于风沙土时为第Ⅰ类,比水容量出现 10^{-2} 数量级的水吸力值为200 kPa,此时土壤供水能力较强;砒砂岩质量小于风沙土时为第Ⅱ类,比水容量出现 10^{-2} 数量级的水吸力值为100 kPa(当为全风沙土时,此水吸力值为70 kPa),此时土壤向作物供水的能力相对较弱。当水吸力增加到300 kPa时,全风沙土土样的比水容量开始出现 10^{-3} 数量级;当水吸力增加到1 200 kPa时,各复配土壤的比水容量均达到了 10^{-3} 数量级,此时土壤中的水分基本处于植物难以利用的状态,需要及时补水(合理灌溉),以保障作物的正常生长。

本研究中,在7种砒砂岩与风沙土复配土壤中,随着砒砂岩质量的增加,田间持水量从全风沙土的4.46%增加到全砒砂岩的17.32%,全有效水含量从全风沙土的3.17%增加到全砒砂岩的8.37%,萎蔫系数从全风沙土的1.29%增加到全砒砂岩的8.96%。田间持水量的增加表明,随着砒砂岩的加入,土壤能容纳更多的水分;而有效水含量的增加,表明当砒砂岩质量增加时,土壤持水蓄水能力增强,有利于协调气候与水分之间的矛盾,可以有效保障作物生长期间的水分所需,为作物生长提供必要的水分支持。

本研究中,在砒砂岩与风沙土复配土壤中,其毛管孔隙度随砒砂岩的加入呈现先减小后增加的二次函数关系;有效水孔隙度随砒砂岩的增加而增大,从全风沙土的7.82%增加到全砒砂岩的15.35%,呈指数型增长趋势。但本研究所获得的试验数据不足以覆盖7种复配土壤通气孔隙的分布情况,且7种复配土壤的有效水孔隙度均在20%以下,尚未达到结构良好土壤的有效水孔隙度标准,所以今后在这2方面还有待进行深入研究,进而为分析砒砂岩与风沙土复配土壤的结构及保水性做出更全面的评价。

4 结 论

在砒砂岩与风沙土不同质量比复配土壤中,随着砒砂岩质量的增加,复配土壤的持水保水能力逐渐增强。综合考虑复配土壤的水分特征曲线、土壤含水量、比水容量、有效水含量、毛管孔隙度和有效水孔隙度,推荐当地进行风沙土改良时将砒砂岩与风沙土以5:1质量比混合进行农业生产,此时土壤

能达到较好的保水效果,能满足作物生长对水分的需求。

[参考文献]

- [1] 朱晓梅,臧春鑫,宋炳煜.皇甫川流域砒砂岩及栗钙土的土壤水分特征[J].人民黄河,2007,29(7):40-42.
Zhu X M, Zang C X, Song B Y. The soil moisture characteristics of feldspathic sandstone and chestnut soil in Huangfuchuan watershed [J]. Yellow River, 2007, 29(7): 40-42. (in Chinese)
- [2] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.
Wang Y C, Wu Y H, Kou Q, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 14-18. (in Chinese)
- [3] Han J C, Xie J C, Zhang Y. Potential role of feldspathic sandstone as a natural water retaining agent in Mu Us Sandy Land, northwest China [J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22(5): 550-555.
- [4] 李晓丽,苏雅,齐晓华.高原丘陵区砒砂岩土壤特性的实验分析研究[J].内蒙古农业大学学报,2011,32(1):315-318.
Li X L, Su Y, Qi X H. The experimental analysis study of soft sandstone soil properties in the plateau hilly region [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2011, 32(1): 315-318. (in Chinese)
- [5] 钱天伟,陈繁荣,杜晓丽,等.一种推求 van Genuchten 方程参数的高性能优化方法[J].土壤学报,2004,41(6):138-140.
Qian T W, Chen F R, Du X L, et al. An optimization method with high performance for estimating the parameters of the van Genuchten's equation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 138-140. (in Chinese)
- [6] 宋桂龙,韩烈保,李德颖.不同沙土配比根系层土壤的持水特性研究[J].土壤通报,2008,39(2):233-237.
Song G L, Han L B, Li D Y. Effect of different sand/soil ratio on soil water-holding characteristic of sports turf rootzone [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(2): 233-237. (in Chinese)
- [7] 姚其华,邓银霞.土壤水分特征曲线模型及其预测方法的研究进展[J].土壤通报,1992,23(3):142-145.
Yao Q H, Deng Y X. The research progress of soil water characteristic curve model and forecasting methods [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1992, 23(3): 142-145. (in Chinese)
- [8] 徐敏.非饱和带水分特征曲线的实验研究[D].西安:长安大学,2008.
Xu M. Experiment study on soil-water characteristic curve in unsaturated zone [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [9] 刘慧,刘建立.估计土壤水分特征曲线的简化分形方法[J].土壤,2004,36(6):97-99.
Liu H, Liu J L. A simplified fractal method to estimate soil water retention characteristics [J]. Soils, 2004, 36(6): 97-99. (in Chinese)
- [10] 张俊,徐绍辉.数值反演方法在确定土壤水力性质中的研究

- 进展 [J]. 土壤, 2003, 35(3): 36-40.
- Zhang J, Xu S H. Advances in study on inverse method to determine soil hydraulic properties [J]. Soils, 2003, 35(3): 36-40. (in Chinese)
- [11] Huang G H, Zhang R D, Huang Q Z. Modeling soil water retention curve with a fractal method [J]. Pedosphere, 2006, 16(2): 3-12.
- [12] 袁剑舫. 土壤水分特征曲线和土壤水分的滞后现象 [J]. 土壤通报, 1986, 17(1): 43-47.
- Yuan J F. The hysteresis of soil water characteristic curve and soil moisture [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1986, 17(1): 43-47. (in Chinese)
- [13] Leij F J, Russell W B, Lesch S M. Closed-form expressions for water retention and conductivity data [J]. Ground Water, 1997, 35(5): 848-858.
- [14] 李云龙, 郭春颖, 徐敏. 非饱和带水分特征曲线经验公式研究 [J]. 中国矿业, 2010, 19(18): 105-109.
- Li Y L, Guo C Y, Xu M. Non-saturated layer moisture content characteristic curve empirical formula research [J]. China Mining Magazine, 2010, 19(18): 105-109. (in Chinese)
- [15] Filogueira R R. Comparison of fractal dimensions estimated from aggregate mass-size distribution and water retention scaling [J]. Soil Science, 1999, 164(4): 217-223.
- [16] 沈思渊, 席承藩. 淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系 [J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 306-312.
- Shen S Y, Xi C P. Soil water retention and its relationship with particle size distribution in north Anhui Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23(4): 306-312. (in Chinese)
- [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.
- Li Z. Simulated experiment on effects of soil mechanical composition and soil bulk density on soil water characteristic parameters [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- [18] 徐敬华. 黄土丘陵区人工植被恢复对土壤水力性质的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- Xu J H. The impact of artificial vegetation restoration on soil hydraulic and hydrological properties in loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)
- [19] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 104-110.
- Huang C Y. Soil science [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 104-110. (in Chinese)
- [20] 邵明安, 吕殿青, 付晓莉, 等. 土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系: I. 填装土壤 [J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1003-1009.
- Shao M A, Lü D Q, Fu X L, et al. Quantitative relationship between mass water content, pressure head and bulk density in determination of soil Water retention characteristics: I. Packed soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6): 1003-1009. (in Chinese)
- [21] 付晓莉, 邵明安, 吕殿青. 土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间定量关系: II. 原状土壤 [J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 50-55.
- Fu X L, Shao M A, Lü D Q. Quantitative relationship between mass water content, pressure head and bulk density in determination of soil water retention characteristics: II. Undisturbed soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(1): 50-55. (in Chinese)
- [22] 张小泉, 张清华, 毕树峰. 太行山北部中山幼林地土壤水分的研究 [J]. 林业科学, 1994, 30(3): 193-199.
- Zhang X Q, Zhang Q H, Bi S F. Study on the dynamics of soil moisture in young plantations on the mid-slopes of northern Taihang Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1994, 30(3): 193-199. (in Chinese)
- [23] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data [J]. Soil Sci, 1974, 117(6): 311-314.
- [24] 李开元, 李玉山. 土壤水分特征曲线的意义及其应用 [J]. 陕西农业科学, 1991(4): 47-48.
- Li K Y, Li Y S. The meaning and application of soil water characteristic curve [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 1991(4): 47-48. (in Chinese)
- [25] 尚慢廷, 张建云, 刘九夫, 等. 大孔隙对土壤比水容重及非饱和导水率影响的实验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(2): 1-5.
- Shang M T, Zhang J Y, Liu J F, et al. Effects of macropore on soil specific water capacity and unsaturated hydraulic conductivity [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 1-5. (in Chinese)
- [26] 庄季屏, 王伟. 土壤低吸力段持水性能及其与早期土壤干旱的关系研究 [J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 306-312.
- Zhuang J P, Wang W. Studies on the relationship between soil water-retention characters in low suction range and the early stage of soil drought [J]. Acta Pedologica Sinica, 1986, 23(4): 306-312. (in Chinese)