

DOI: 10.11766/trxb201802030436

## 三种土壤改良剂对风沙土抗剪强度的影响\*

喜银巧<sup>1, 2</sup> 赵英<sup>1†</sup> 李生字<sup>1</sup>

(1 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为探明不同土壤改良剂对风沙土力学特征的影响, 采用羧甲基纤维素钠、磷石膏及生物炭三种改良剂添加到风沙土中, 进行棉花盆栽实验, 通过直剪法测定改良前后的土壤内聚力和内摩擦角, 分析了两种土壤含水量条件下不同土壤改良剂添加风沙土的抗剪强度。结果表明: (1) 无论含水量高低, 经三种改良处理的风沙土内聚力均显著大于对照, 三者大小关系呈羧甲基纤维素钠>磷石膏>生物炭, 表明施用羧甲基纤维素钠对风沙土抗剪强度改良效果最佳; 与对照相比, 改良剂处理对内摩擦角影响未达到显著程度 ( $P > 0.05$ )。 (2) 随土壤改良剂添加量的增加, 土壤内聚力亦增大, 且拟合效果较好, 但内摩擦角变化不明显。 (3) 在同一添加量情况下, 低水处理的风沙土内聚力和内摩擦角均大于高水处理, 但处理间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。 (4) 土壤改良剂及含水量主要通过增大内聚力来提高土壤抗剪强度, 但各因素间交互作用均对内聚力无显著影响。

**关键词** 风沙土; 土壤改良剂; 土力学; 抗剪强度

**中图分类号** S156.99 **文献标识码** A

我国是世界上土地沙化最严重的国家之一<sup>[1]</sup>。第五次全国荒漠化和沙化监测结果<sup>[2]</sup>显示, 截至 2014 年, 我国沙化土地面积占国土总面积的 17.93%。随着西部大开发战略的持续推进及“一带一路”倡议的实施, 沙漠化成为中国特别是西北地区亟待解决的核心生态环境问题之一<sup>[3]</sup>。生物固沙措施是当前最有效的沙漠化防治措施, 但风沙土颗粒细小<sup>[4]</sup>, 结构松散, 保水保肥能力差<sup>[5-6]</sup>, 植物根系着生的沙土极易风蚀<sup>[7]</sup>。添加土壤改良剂, 可固定风沙土<sup>[8]</sup>, 更有利于植物生长, 将会极大提高生物固沙作用。已有研究表明, 在风沙土中添加土壤改良剂能够降低容重及 pH, 而孔隙度、团聚体数量、饱和含水量及持水能力均增加, 也能提高有机质及养分含量, 增加微生物数量及土壤酶活性等<sup>[9-11]</sup>。关于风沙土改良的研究目前多集中于土壤理化及生物性质方面, 而关于添加

土壤改良剂改变土壤力学性质, 以固定流沙, 进而促进植物生长繁殖的研究, 尚鲜有报道。

外力作用可导致土体发生剪切形变, 而土体抵抗剪切形变的极限值即为土壤抗剪强度<sup>[12]</sup>。在土木工程领域, 广泛使用固沙材料来提高沙土强度<sup>[13-18]</sup>。李驰和于浩<sup>[13]</sup>在风沙土中添加固化剂, 发现在最优含水率条件下 8% 掺量固化剂能显著提高风沙土的抗压强度和抗剪强度, 提高了风沙土的稳定性。Guo 等<sup>[14]</sup>使用水泥基材料稳定风沙土, 沙土抗剪强度随水泥填量增大而提高。Liu 和 Su<sup>[16]</sup>研究表明 10% 固化剂对土壤强度增加效果最好。抗剪强度反映了土体抵抗外力剪切的能力, 抗剪强度越小的土体在外界因素影响下越容易被破坏, 因此提高土壤抗剪强度对减少风蚀和稳固表土具有重要作用。Yi 和 Zhao<sup>[19]</sup>在沙土中添加改良剂, 使沙土拥有了土壤的生态-力学属性, 称为“沙子

\* 国家千人计划新疆项目 (Y472241001) 资助 Supported by the Thousand Youth Talents Plan Project (No. Y472241001)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yzhaosoils@gmail.com

作者简介: 喜银巧 (1992—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良与荒漠化防治研究。E-mail: xiyinqiaonk@163.com

收稿日期: 2018-02-12; 收到修改稿日期: 2018-05-20; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2018-08-15

土壤化”，相关报道引起社会广泛关注和热议。但该研究缺乏常规的力学指标的支撑，与传统土壤学知识体系没有很好衔接。基于此，本文以新疆沙漠边缘的风沙土作为研究对象，进行了添加土壤改良剂的盆栽棉花实验，通过直接剪切试验，分析土壤内聚力和内摩擦角的变化，探讨土壤改良剂类型、添加量及土壤含水量对风沙土抗剪强度指标的影响，以期对沙区流沙固定和退化生态恢复提供理论依据和技术途径。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

实验用风沙土取自库木塔格沙漠边缘

(90° 24' 77" E, 42° 85' 52" N)。用四分法随机采集0~40 cm的风沙土，去除杂质，放阴凉处自然风干，用于盆栽实验；用体积为100 cm<sup>3</sup>的环刀采取原状土，3次重复，用于测定风沙土的初始容重。磷石膏、秸秆生物炭、羧甲基纤维素钠分别从长沙兆宇建材公司、泰然有机肥有限公司、天津润圣纤维素科技有限公司获得。

用雷磁pH计测定沙土pH，用硫酸-重铬酸钾外加法测定有机质，用K1100全自动凯氏定氮仪测定全氮含量，用环刀烘干称重法测容重，用Bettersizea激光粒度仪（湿法）测定土壤机械组成。供试土样及改良剂基本性质见表1。供试棉花品种为新陆早50号，为新疆常见经济作物。

表1 试样的基本性质

Table 1 Properties of the tested soil and soil amendments

试样 Test sample	pH	有机质 Organic matter /(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen /(g·kg <sup>-1</sup> )	容重 Bulk density /(g·cm <sup>-3</sup> )	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
风沙土Aeolian soil	8.6	1.3	0.03	1.53	0	0.18	99.82
羧甲基纤维素钠 Carboxymethylcellulose sodium	8.3	—	—	—	—	—	—
磷石膏Phosphogypsum	3.7	0.005	0.007	—	—	—	—
生物炭Biochar	9.2	586.5	1.33	—	—	—	—

注：土壤机械组成采用美国土壤质地分类标准 Note: Soil mechanical composition is based on the American standard for soil texture classification

### 1.2 试验设计

2017年5月至10月在新疆乌鲁木齐市进行实验。乌鲁木齐属中温带大陆性干旱气候，夏季昼长夜短，昼夜温差大，年均气温9.2℃，月均最高温26℃，最低温-14℃。

试验设置两个含水量处理（表2）：高水处理（含水量20%），低水处理（含水量10%）；三个土壤改良剂用量：羧甲基纤维素钠（0.5、2.0、3.5 g·kg<sup>-1</sup>），磷石膏（5、15、25 g·kg<sup>-1</sup>），生物炭（15、30、45 g·kg<sup>-1</sup>）；并设置1组无改良剂添加的对照，共计20个处理，每个处理3个重复。

塑料花盆高35 cm，上口径30 cm，下口径28 cm，每盆装干土17.5 kg。盆底铺细纱布，将称好的土壤改良剂与风沙土充分混合，装入盆中。2017年5月6日播种棉花，每盆播种10颗，两到三片真叶后，每盆定苗3颗，管理方式与大田管理一致。

10月待实验结束后，拣出盆中的棉花根系（剔除棉花根系对沙土抗剪强度的影响），将盆中的风沙土混合均匀，随机取足量风沙土，风干后过孔径为2 mm筛，用于直剪试验。

### 1.3 测定方法

直剪试验：用EDJ-1型二速电动等应变直剪仪（南京土壤仪器厂生产）进行快剪试验，土样试件的制备和直剪试验严格按照土工试验方法标准<sup>[20]</sup>（GB/T 50123-1999）进行。根据剪切环刀容积和由环刀法测定的干密度换算得出各处理应称取的土样质量。各试验处理均设置20%和10%两个含水量水平，根据风干土含水率、设计的含水量和供试土样质量计算出相应添加水量，含水量调控采用喷壶均匀喷洒的方式，将试样充分搅拌后放置24 h以保证其均匀性。然后将试样放入剪切盒内，用千斤顶静压制样，分别采用100 kPa、200 kPa、300 kPa

表2 试验处理

Table 2 Treatment of the experiment

改良剂 Soil amendment	添加量 Application rate/ (g·kg <sup>-1</sup> )	低水 (10%) Low soil moisture content	高水 (20%) High soil moisture content
羧甲基纤维素钠 (CMC) Carboxymethylcellulose Sodium	0.5	AD1	AG1
	2.0	AD2	AG2
	3.5	AD3	AG3
磷石膏 (PG) Phosphogypsum	5	BD1	BG1
	15	BD2	BG2
	25	BD3	BG3
生物炭 (BC) Biochar	15	CD1	CG1
	30	CD2	CG2
	45	CD3	CG3
对照CK	0	CKD	CKG

和400 kPa四种垂直压力进行剪切，剪切速率为0.8 mm·min<sup>-1</sup>，直到试样剪切破坏。通常在3~5 min内完成测试，记录峰值读数，剪应力 ( $\tau$ ) 根据式 (1) 计算：

$$\tau = C \times R \times 10 / A_0 \quad (1)$$

式中， $C$ 为测力计率定系数 (0.01 mm)， $R$ 为测量表峰值读数 (0.01 mm)， $A_0$ 为剪切盒横截面积 (cm<sup>2</sup>)，10为单位换算系数。

以垂直压力  $\sigma$  (kPa) 为横坐标，剪应力  $\tau$  (kPa) 为纵坐标，绘制土壤抗剪强度包线，依据库仑式 (2) 计算抗剪强度：

$$\tau = C + \sigma \times (\tan \varphi) \quad (2)$$

式中， $C$  (kPa) 为内聚力，为抗剪强度包线的截距，包线的倾角为内摩擦角  $\varphi$  (°)。

#### 1.4 数据处理

数据整理和计算使用Excel，用SPSS statistics 19.0进行统计分析，采用Origin Pro 2016进行线性拟合及作图，用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和Duncan法多重比较来检验实验处理之间的差异显著性 ( $P > 0.05$ )，用Pearson法进行各变量间的相关分析，用多因素方差分析法表征土壤改良剂种类、添加量和含水量及其交互作用对风沙土内聚力和内摩擦角的影响。

## 2 结果

### 2.1 不同处理的风沙土内聚力变化

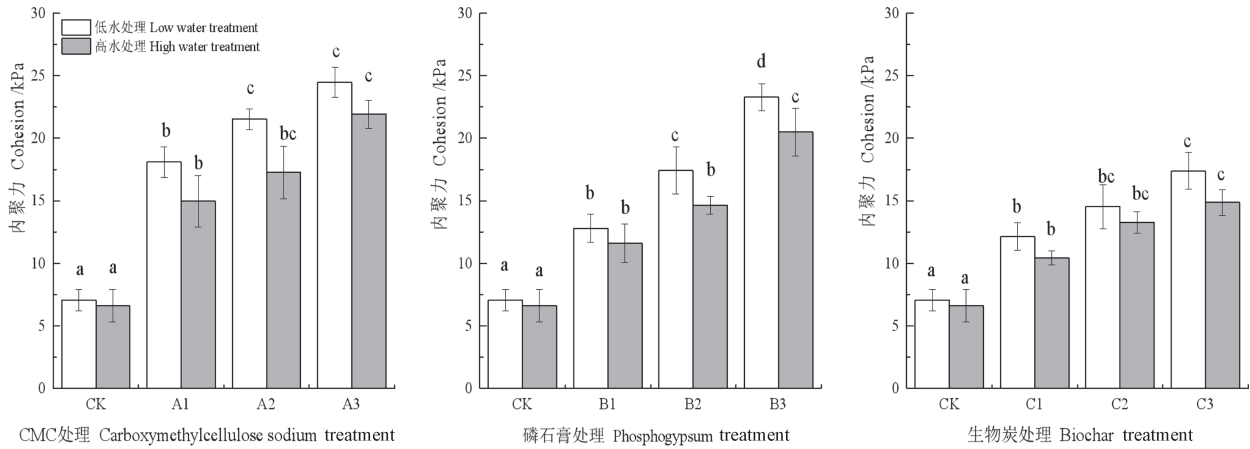
不同处理风沙土的内聚力变化及差异性检验结果见图1。在低水条件下，不同处理风沙土的内

聚力处于12.15 kPa~24.47 kPa之间，在高水条件下，介于10.43 kPa~21.93 kPa之间。

无论含水量高低，三种改良剂处理风沙土的内聚力均显著大于对照，增长率为羧甲基纤维素钠大于磷石膏大于生物炭，羧甲基纤维素钠的改良效果最好，在低水处理下内聚力可达到24.47 kPa。改良剂处理间大多数差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

内聚力随土壤改良剂添加量增加而增大，但三个梯度之间显著性水平不尽相同。在低水条件下，与对照相比，羧甲基纤维素钠处理的风沙土内聚力增加156.15%~246.18%，三个梯度间仅AD2与AD3差异不显著 ( $P > 0.05$ )。磷石膏处理使内聚力发生显著变化，增幅达81.06%~229.26%；生物炭处理的内聚力增幅最小，增大了71.91%~145.87%。在高水条件下，与对照相比，羧甲基纤维素钠处理的内聚力增大了126.3%~231.77%，但仅高、低添加量处理差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )；磷石膏处理的内聚力增加了75.52%~209.94%，仅高含量处理显著增加；而生物炭处理内聚力的增幅为57.79%~124.82%，各添加量处理间差异均未达到显著水平 ( $P > 0.05$ )。

在同一添加量情况下，低水处理的内聚力均大于高水处理，但均未达显著水平 ( $P > 0.05$ )。与高水处理相比，随添加量增加，羧甲基纤维素钠低水处理风沙土的内聚力增加了21.02%、24.69%、11.57%，磷石膏低水处理风沙土内聚力分别增加了10.3%、19.05%、13.59%，生物炭低水处理风沙土内聚力分别增加了16.49%、9.48%、16.93%。



注：不同小写字母代表相同含水量条件下，土壤改良剂不同添加量之间差异达到5%显著水平，下同 Note: Different lowercase letters represent significant difference (<5%) between treatments at the same soil water content. The same below

图1 不同处理下风沙土内聚力的变化

Fig. 1 Change in soil cohesion of the aeolian soil as affected by treatment

2.2 不同处理风沙土内摩擦角的变化

不同处理下风沙土内摩擦角的变化及差异性检验结果见图2。低水条件下，各改良剂处理的内摩擦角变化范围为17.22°~31.02°，高水条件下变化范围为19.79°~25.86°。

同一含水量条件下，三种土壤改良剂处理对沙土内摩擦角的影响较为复杂。在低水处理下，随羧甲基纤维素钠和生物炭添加量的增大，风沙土内摩擦角先减小后增加，但与对照相比，AD3处理和各生物炭处理差异未达显著水平(P>0.05)；随磷石膏添加量增大，内摩擦角先增加后减小，且各处

理与对照相比差异均显著(P<0.05)。在高水处理下，随羧甲基纤维素钠和磷石膏添加量增大，风沙土内摩擦角变化同低水处理，但与对照相比差异不显著(P>0.05)；生物炭处理组的内摩擦角变化则与低水条件下相反，且与对照相比差异均未达到显著水平(P>0.05)。

在同一改良剂添加量时，低水处理的内摩擦角总体上大于高水处理，但变化幅度较小，大多数含水量处理间差异不显著(P>0.05)，仅AD2与AG2、BD1与BG1处理之间差异显著。总体而言土壤改良剂及含水量对内摩擦角的影响较小。

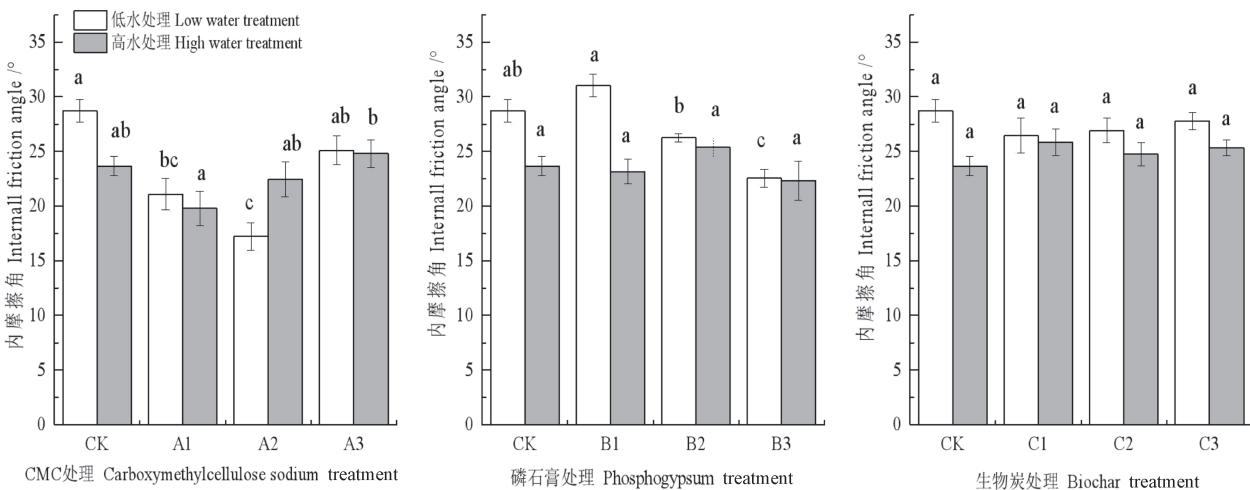


图2 不同处理下风沙土内摩擦角的变化

Fig. 2 Change in internal friction angle under in the aeolian soil as affected by treatment



### 2.3 不同处理的抗剪强度指标统计特征

土壤改良剂与沙土内聚力、内摩擦角的相关分析及回归分析结果见表3。内聚力与三种土壤改良剂的添加量均具有极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 改良剂不同程度地影响着风沙土内聚力, 且相关关系不受含水量的影响, 即在低水和高水条件下, 随着土壤改良剂添加量的增加, 土壤内聚力均随之增大, 回归拟合效果较好。而含水量对

各改良处理的内摩擦角有一定程度的影响, 其中在低水条件下, 内摩擦角均与各改良剂添加量呈负相关关系, 但仅磷石膏含量与内摩擦角相关关系达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); 在高水条件下, 内摩擦角与羧甲基纤维素钠及生物炭的添加量呈正相关关系, 内摩擦角与磷石膏添加量则呈负相关关系, 但内摩擦角与三种土壤改良剂添加量的相关性均不显著 ( $P > 0.05$ )。

表3 土壤改良剂含量与风沙土内聚力、内摩擦角的相关分析及回归分析

Table 3 Correlation and regression analyses of amendment application rate with soil cohesion ( $C$ ) and soil internal friction angle ( $\varphi$ ) in the aeolian soil

变量 Variable/(g·kg <sup>-1</sup> )	指标 Index	土壤含水量 Water content/%	相关系数 Correlation coefficient	$P$	拟合函数 Correlationship	$R^2$
羧甲基纤维素钠 Carboxymethylcellulose sodium (CMC)	$C$	10	0.838	0.01	$y=4.1327x+11.593$	0.703
		20	0.8328	0.01	$y=3.682x+9.668$	0.694
	$\varphi$	10	-0.208	0.516	$y=3.29x^2-12.22x+27.794$	0.812
		20	0.38	0.223	$y=0.808x^2-2.09x+22.48$	0.286
磷石膏 Phosphogypsum (PG)	$C$	10	0.944	<0.001	$y=0.6124x+8.25$	0.8906
		20	0.911	<0.001	$y=0.514x+7.546$	0.8308
	$\varphi$	10	-0.838	0.01	$y=-0.014x^2+0.0612x+29.53$	0.777
		20	-0.111	0.731	$y=-0.0127x^2+0.297x+23.086$	0.1725
生物炭 Biochar (BC)	$C$	10	0.88	<0.001	$y=0.222x+7.7847$	0.775
		20	0.902	<0.001	$y=0.184x+7.1545$	0.8134
	$\varphi$	10	-0.136	0.672	$y=0.0035x^2-0.1708x+28.591$	0.1894
		20	0.262	0.41	$y=-0.0018x^2+0.1059x+23.915$	0.1293

注:  $y$ 为内聚力或内摩擦角,  $x$ 为土壤改良剂添加量 Note:  $y$ : cohesion or internal friction angle,  $x$ : application rate of soil amendment

土壤含水量、土壤改良剂种类和添加量及其交互作用对风沙土内聚力和内摩擦角影响的方差分析结果见表4。土壤改良剂种类、添加量和含水量均能极显著地影响沙土内聚力 ( $P < 0.01$ ), 但两两因素间或三因素间的交互作用均对内聚力无显著影响 ( $P > 0.05$ )。土壤改良剂种类及改良剂种类和添加量的交互作用对内摩擦角有极显著影响 ( $P < 0.01$ ), 含水量、含水量和改良剂种类间交互作用、含水量和改良剂添加量间交互作用及三因素间的交互作用均对内摩擦角有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 而改良剂添加量对内摩擦角影响不大 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 内聚力变化的原因

内聚力由原始内聚力和固化内聚力组成, 原始内聚力是指水分子膜与周围颗粒间的静电引力及毛细管水压力等, 固化内聚力是指土壤中化合物形成的使土体胶结黏聚的作用力<sup>[21]</sup>。一般而言, 自然条件下的风沙土内聚力很小<sup>[22-23]</sup> (基本为零), 但本实验所用风沙土经过植物稳定改良, 且控制含水量, 使风沙土性质发生变化, 因此具有较小内聚力 (低水7.07 kPa、高水6.61 kPa)。

添加改良剂的处理内聚力大小为羧甲基纤维素

表4 不同处理及其交互作用与风沙土内聚力和内摩擦角的方差分析

Table 4 Variance analysis of soil cohesion and internal friction angle as affected by treatments and their interaction in the aeolian soil

处理 Test treatment	内聚力 Cohesion (C)		内摩擦角 Internal friction angle ( $\varphi$ )	
	F	P	F	P
A	14.282	0.001 **	4.164	0.049 *
B	27.576	<0.001 **	21.634	<0.001 **
C	39.152	<0.001 **	0.814	0.451
A × B	0.457	0.637	4.686	0.016 *
A × C	0.122	0.885	3.998	0.027 *
B × C	1.692	0.173	8.837	<0.001 **
A × B × C	0.202	0.936	3.263	0.022 *

注: A: 土壤含水量; B: 土壤改良剂种类; C: 土壤改良剂添加量 Note: A: Soil moisture content; B: Type of soil amendments; C: Application rate of soil amendment. \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$

钠>磷石膏>生物炭。可能是因为羧甲基纤维素钠具有高黏性,可大幅提高土壤颗粒的胶结能力,并促进颗粒的团聚,使沙土孔隙被具有黏性的CMC占据,土壤颗粒骨架更牢固,增加了沙土固化内聚力,从而抵抗剪切和变形的能力加强,王德银等<sup>[24]</sup>在黏土中添加纤维的研究也得到了相似的结论。磷石膏具有较大的比表面和较强静电场<sup>[25]</sup>,能将细颗粒吸附到其周围,同时磷石膏遇水溶解后能向土壤溶液中释放电解质,增加土壤溶液中阳离子的交换,从而防止土壤颗粒的分散,促使颗粒相互结合。相比而言,生物炭在提高土壤内聚力方面能力较弱,可能是因为生物炭颗粒细小,可包裹在土壤颗粒表面,增加了改良物料与土壤颗粒间的吸附和黏聚作用,且生物炭颗粒能填充土壤空隙,使沙土更密实,但与羧甲基纤维素钠的高黏性和磷石膏的吸附特性相似,生物炭仅能小幅提高风沙土内聚力。本研究发现内聚力随改良剂添加量增加而增大,可能是因为添加量较低时,改良剂对土壤颗粒的影响还未发挥出来,内聚力主要由毛细管内聚力提供,在剪切面上占主导地位的还是沙粒;而随着改良剂添加量的增加,改良剂填充了沙土颗粒的间隙,并紧紧包裹在沙土颗粒表面,从而提高了土壤颗粒间的胶结作用,改变了风沙土松散的结构,使内聚力增大。但随着改良剂的添加量进一步增大,内聚力是否持续增大,还需进一步研究。

低水条件下风沙土内聚力更大。可能是因为随着土壤含水量的增加,一方面通过改良剂的溶解增

加土壤颗粒间的胶结作用,另一方面由于土壤表面的水分子膜逐渐形成,由毛细管水压力组成的内聚力逐渐增加,在最优含水量条件下,内聚力达到峰值;但当含水量继续增加时,过高的水分相当于对土壤中改良剂产生了稀释作用,导致土壤表面的离子浓度降低,扩散层变厚,土壤颗粒间的静电引力削弱,降低了土壤颗粒间的粘聚能力;高水处理可能会提高沙土的液化程度,使沙土更易流动。因此,在一定改良剂添加量条件下,过高的土壤水分使风沙土抵抗外力的能力降低,这与许多研究结果一致<sup>[26-28]</sup>。

### 3.2 内摩擦角变化的原因

内摩擦角是由土壤颗粒间发生相对滑动、滚动而产生的摩擦阻力和土体颗粒由于接触挤压与其他颗粒镶嵌结合而产生的咬合力<sup>[29]</sup>组成的,它主要与土壤颗粒性质、密实度、土壤团聚体稳定性、颗粒形状及含水率等有关<sup>[30]</sup>。

土壤改良剂对风沙土的内摩擦角影响较小,可能是因为改良剂添加短期内只表现为外在影响,只增加了沙土颗粒与改良剂的接触,未改变沙土内在性质及颗粒表面接触特征,也未改变土壤颗粒咬合被破坏时颗粒顺序发生重新排列而做的功,因此对风沙土抗磨擦性能影响不大,这与林琳等<sup>[31]</sup>、金佳旭等<sup>[32]</sup>研究结果一致。

低水条件下内摩擦角较大,可能是因为过高的土壤水分使沙土颗粒间空隙几乎被填满,包裹在沙土颗粒周围的水分子膜变厚,增加了沙土间的润

滑<sup>[33]</sup>, 颗粒之间的接触点减少, 使沙土颗粒更容易发生滑动; 也使得相互嵌合的土壤颗粒更容易被拔出或破坏, 发生移动时所爬坡的角度与距离均降低, 抗摩擦能力降低, 从而导致内摩擦角减小, 但减小幅度不大。

### 3.3 抗剪强度的变化对沙土的影响

土体抗剪切的能力越弱, 土体越容易受风蚀等外力的影响, 稳定性越差<sup>[13]</sup>。添加改良物质后, 一定程度上提高了沙土的抗剪强度, 则土壤抵抗外部破坏的能力增强, 进而可以减少风蚀。另一方面, 固化内聚力的增加促使原本松散无黏性的沙土颗粒结合, 提高了沙土对植物根系的支撑保持作用, 改善了植物的立地条件, 从而促进植物生长。因此沙土力学性能的优化对植物生长会产生一定的促进作用, 其主要是通过固定流沙和提供根系稳固基质等实现的。

生物固沙前期, 植物较为脆弱, 固沙效果不理想。若将土壤改良剂与生物固沙技术相结合, 在种植固沙植物之前, 在沙土中施入适量土壤改良剂, 达到改善沙土力学性质的目的, 进而优化植物的生长环境, 为植物种植提供基础, 可提高固沙效率。同时改良措施也会一定程度地改善土壤理化性质, 促进土壤的形成发育<sup>[34]</sup>, 使植物长势得以改善。因此, 添加土壤改良剂后, 风沙土力学性质得以优化, 植物生长变好, 两者相互促进、良性循环, 能加速沙漠区域生态恢复, 有望成为一种新的沙漠治理技术措施。同时通过添加土壤改良剂和种植植物能改善沙漠边缘生态脆弱区域的沙土质量, 种植高抗旱经济作物, 可促进沙漠地区沙产业<sup>[35]</sup>的繁荣发展, 增加沙区人民经济收入。

## 4 结 论

本文采用控制试验, 测试分析了两种含水量条件下, 三种土壤改良剂(羧甲基纤维素钠、磷石膏和生物炭)的三个添加量梯度下, 风沙土的内聚力和内摩擦角的变化规律。主要结论如下: 改良剂的添加能显著提高沙土的内聚力, 改良效果排序为羧甲基纤维素钠>磷石膏>生物炭, 且随添加量的增加, 内聚力逐渐增大, 其中AD3处理的内聚力最大, 为24.47 KPa, 较CKD增幅高达246.2%, 但土壤改良剂对内摩擦角影响不明显。过高含水量使土壤内聚力及内摩擦角值均有所下降, 较低含水量更

有利于提高风沙土抗剪强度。不同土壤改良剂及含水量主要是通过增大内聚力来提高沙土抗剪强度, 抗剪强度的提高可减少风蚀破坏及改善沙土松散结构。通过研究发现添加改良剂确实可使沙土力学属性发生改变, 在沙漠区域可以通过添加土壤改良剂及控制含水量来稳定沙土及促进沙漠区域生态恢复。本研究结果对沙化土地占国土面积近五分之一的中国具有重大意义。但本研究仅开展了风沙土盆栽模拟试验, 与沙漠自然条件下风沙土的抗剪性能还有一定差异, 在实际应用中还需进一步确定最优的改良剂。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 移小勇, 赵哈林, 赵学勇, 等. 不同风沙土含水量因子的抗风蚀性. 土壤学报, 2006, 43 ( 4 ) : 684—687  
Yi X Y, Zhao H L, Zhao X Y, et al. Erodibility of aeolian soils in moisture content ( In Chinese ). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43 ( 4 ) : 684—687
- [ 2 ] 国家林业局. 第五次中国荒漠化和沙化状况公报, 2015  
State Forestry Administration. Fifth communique for the status of desertification and desertification in China ( In Chinese ), 2015
- [ 3 ] 王涛. 干旱区绿洲化、荒漠化研究的进展与趋势. 中国沙漠, 2009, 29 ( 1 ) : 1—9  
Wang T. Review and prospect of research on oasisification and desertification in arid regions ( In Chinese ). *Journal of Desert Research*, 2009, 29 ( 1 ) : 1—9
- [ 4 ] 王银梅, 谌文武. 用SH固化风沙土的力学性质. 西部探矿工程, 2004 ( 4 ) : 1—3  
Wang Y M, Chen W W. Mechanical properties of the aeolian sandy soil harding with SH ( In Chinese ). *West-China Exploration Engineering*, 2004 ( 4 ) : 1—3
- [ 5 ] 张媛媛, 马成仓, 韩磊, 等. 内蒙古高原荒漠区四种锦鸡儿属植物灌丛沙包形态和固沙能力比较. 生态学报, 2012, 32 ( 11 ) : 3343—3351  
Zhang Y Y, Ma C C, Han L, et al. Nabkha morphology and sand-fixing capability of four dominant Caragana species in the desert region of the Inner Mongolia Plateau ( In Chinese ). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 ( 11 ) : 3343—3351
- [ 6 ] 王少昆, 赵学勇, 张铜会, 等. 造林对沙地土壤微生物的数量、生物量碳及酶活性的影响. 中国沙漠, 2013, 33 ( 2 ) : 529—535  
Wang S K, Zhao X Y, Zhang T H, et al. Effects of

- afforestation on the abundance, biomass carbon and enzymatic activities of soil microorganism in sandy dunes (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2013, 33 (2): 529—535
- [ 7 ] 马洋, 王雪芹, 张波, 等. 风蚀和沙埋对塔克拉玛干沙漠南缘骆驼刺水分和光合作用的影响. *植物生态学报*, 2014, 38 (5): 491—498  
Ma Y, Wang X Q, Zhang B, et al. Effects of wind erosion and sand burial on water relations and photosynthesis in *Alhagi sparsifolia* in the southern edge of the Taklimakan Desert (In Chinese). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38 (5): 491—498
- [ 8 ] Graber E R, Fine P, Levy G J. Soil stabilization in semiarid and arid land agriculture. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2006, 18 (2): 190—205
- [ 9 ] 黄殿男, 谭杰, 傅金祥, 等. 城市污水处理厂污泥对沙漠化土壤的改良效果. *水土保持学报*, 2017, 31 (1): 323—327  
Huang D N, Tan J, Fu J X, et al. Amelioration effect of municipal sewage sludge on desertification soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (1): 323—327
- [ 10 ] 曹丽花, 赵世伟, 赵勇刚, 等. 土壤结构改良剂对风沙土水稳性团聚体改良效果及机理的研究. *水土保持学报*, 2007, 21 (2): 65—68  
Cao L H, Zhao S W, Zhao Y G, et al. Study on improvements of modifiers on soil water-stable aggregates and its mechanisms in aeolian sandy soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21 (2): 65—68
- [ 11 ] 顾美英, 葛春辉, 马海刚, 等. 生物炭对新疆沙土微生物区系及土壤酶活性的影响. *干旱地区农业研究*, 2016, 34 (4): 225—230  
Gu M Y, Ge C H, Ma H G, et al. Effects of biochar application amount on microbial flora and soil enzyme activities in sandy soil of Xinjiang (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34 (4): 225—230
- [ 12 ] 张克恭. 土力学. 第3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 150—155  
Zhang K G. *Soil mechanics* (In Chinese). 3rd Ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 150—155
- [ 13 ] 李驰, 于浩. 固化风沙土强度特性及固化机制试验研究. *岩土力学*, 2009, 30 (s2): 48—53  
Li C, Yu H. Experimental studies of strength characteristics and solidified mechanism for solidified aeolian sandy soil (In Chinese). *Rock & Soil Mechanics*, 2009, 30 (s2): 48—53
- [ 14 ] Guo G S, Zhang Y, Du S. Grassroots-level shear strength experimental study of aeolian sand with cement. *Science Technology & Engineering*, 2017 (15): 322—326
- [ 15 ] Lopez-Querol S, Arias-Trujillo J, Gm-Elipse M, et al. Improvement of the bearing capacity of confined and unconfined cement-stabilized aeolian sand. *Construction & Building Materials*, 2017, 153: 374—384
- [ 16 ] Liu J, Su Y. Analyses of the strength characteristics of solidified desert aeolian sandy soil. *Journal of Highway & Transportation Research & Development*, 2017, 11 (2): 32—36
- [ 17 ] 苏跃宏, 宋幸芳. 固化风沙土无侧限抗压强度试验研究. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 32 (3): 215—218  
Su Y H, Song X F. Experimental studys on solidified sandy soil unconfined compressive strength (In Chinese). *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2011, 32 (3): 215—218
- [ 18 ] 赵媛. 风积沙路基压实特性和强度特性试验研究. *内蒙古公路与运输*, 2014 (3): 4—6  
Zhao Y. Experimental study on compaction characteristics and strength characteristics of Aeolian Sand Subgrade (In Chinese). *Highways & Transportation in Inner Mongolia*, 2014 (3): 4—6
- [ 19 ] Yi Z J, Zhao C H. Desert “Soilization”: An eco-mechanical solution to desertification. *Engineering*. 2016, 2 (3) 270—273
- [ 20 ] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999土工试验方法标准. 北京: 中国计划出版社, 1999  
The Ministry of Water Resources, the People’s Republic of China. GB/T50123-1999 standard for soil test method (In Chinese). Beijing: China Planning Press, 1999
- [ 21 ] 丁小龙, 张兴昌, 王建玉. EN-1固化剂对4种土壤抗剪强度的影响. *水土保持通报*, 2015, 35 (1): 159—162  
Ding X L, Zhang X C, Wang J Y. Effect of EN-1 soil stabilizer on soil shear strength (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35 (1): 159—162
- [ 22 ] 陈永健, 赵艳林, 文松松, 等. 黏粒含量对砂土强度和压缩特性的影响. *科学技术与工程*, 2017, 17 (23): 281—286  
Chen Y J, Zhao Y L, Wen S S, et al. Effect of clay content on the strength and compressibility of sandy soil (In Chinese). *Science Technology and*



- Engineering, 2017, 17 (23): 281—286
- [23] Yin Y Z, Wang Y L. Determine the shear strength of Aeolian sand and bearing capacity. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 580/583: 165—168
- [24] 王德银, 唐朝生, 李建, 等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性. *岩土工程学报*, 2013, 35 (10): 1933—1940  
Wang D Y, Tang C S, Li J, et al. Shear strength characteristics of fiber-reinforced unsaturated cohesive soils (In Chinese). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35 (10): 1933—1940
- [25] Alomoush M. Wheat response to phosphogypsum and mycorrhizal fungi in alkaline soil. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25 (4): 873—883
- [26] Jin C, Zhang Y. Shear deformation characteristics of aeolian sand in Gurbantunggut Desert// *International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering*, 2015: 3081—3096
- [27] 张军, 郭凯玥, 付红梅. 纤维加筋黄土的抗剪强度特性研究. *岩土工程技术*, 2017, 31 (3): 119—124  
Zhang J, Guo K Y, Fu H M. Fiber reinforced soil shear strength of the experiment research (In Chinese). *Geotechnical Engineering Technique*, 2017, 31 (3): 119—124
- [28] 刘思奇, 孙皓, 冯文泉, 等. 木质纤维加筋土抗剪强度影响因素试验研究. *路基工程*, 2016 (3): 74—78  
Liu S Q, Sun H, Feng W Q, et al. Experimental research on influence factors of shear strength of wood fiber reinforced soil (In Chinese). *Subgrade Engineering*, 2016 (3): 74—78
- [29] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响. *农业工程学报*, 2007, 23 (2): 21—25  
Chen H X, Li F H, Hao S L, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2007, 23 (2): 21—25
- [30] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. SSA土壤固化剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响. *农业工程学报*, 2009, 25 (7): 45—49  
Zhang L P, Zhang X C, Sun Q. Effects of SSA soil stabilizer on compaction, shear strength and permeability characteristics of loess (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2009, 25 (7): 45—49
- [31] 林琳, 张程程, 王恩娟. 添加秸秆后黑土力学行为特征——秸秆含量的影响. *应用生态学报*, 2017, 28 (9): 2932—2938  
Lin L, Zhang C C, Wang E H. Mechanical properties of black soil after straw incorporation-Effect of straw mixing amount (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (9): 2932—2938
- [32] 金佳旭, 崔红志, 周宏源, 等. 聚丙烯纤维加筋尾矿砂力学特性试验研究. *非金属矿*, 2017, 40 (5): 29—31  
Jin J X, Cui H Z, Zhou H Y, et al. Experimental study on the polypropylene fibers on mechanical properties of reinforced tailing sand (In Chinese). *Non-Metallic Mines*, 2017, 40 (5): 29—31
- [33] 李丽华, 万畅, 刘永莉, 等. 玻璃纤维加筋砂土剪切强度特性研究. *武汉大学学报(工学版)*, 2017, 50 (1): 102—106  
Li L H, Wan C, Liu Y L, et al. Shear strength characteristics of glass fiber reinforced sandy soil (In Chinese). *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, 50 (1): 102—106
- [34] Li C, Lei J, Zhao Y, et al. Effect of saline water irrigation on soil development and plant growth in the Taklimakan Desert Highway shelterbelt. *Soil & Tillage Research*, 2015, 146: 99—107
- [35] 李发明, 张莹花, 贺访印, 等. 沙产业的发展历程和前景分析. *中国沙漠*, 2012, 32 (6): 1765—1772  
Li F M, Zhang Y H, He F Y, et al. Development process and prospect of deserticulture (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2012, 32 (6): 1765—1772

## Effects of Three Kinds of Soil Amendments on Shear Strength of Aeolian Soil

XI Yinqiao<sup>1,2</sup> ZHAO Ying<sup>1†</sup> LI Shengyu<sup>1</sup>

(1 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** 【Objective】Application of soil amendments to assist desert governance has recently been

considered as a promising strategy to improve sand fixing efficiency. However, researches in the past were focused mainly on effects of soil amendments on physicochemical and biological properties of the soil, while this study aimed to reveal those on shear strength of aeolian soils varying in soil water content, in an attempt to provide certain theoretical references for fixing aeolian sands, preventing wind erosion and restoring ecosystems in desert areas. 【Method】 In order to explore factors affecting soil mechanics of aeolian soil, soil samples were collected at the edge of the Kumtag Desert for a pot experiment, designed to investigate changes in soil cohesion and internal friction angle via direct shear test. Three kinds of soil amendments were applied, separately into the pots, at set rates, that is, 0.5, 2.0 and 3.5 g·kg<sup>-1</sup> for carboxymethylcellulose sodium (CMC); 5, 15 and 25 g·kg<sup>-1</sup> for phosphogypsum (PG); and 15, 30 and 45 g·kg<sup>-1</sup> for biochar (BC). For each group of treatments, two subgroups different in water content, i.e; 10% and 20%, were also designed. Cotton was planted in each pot and managed in line with the common practice for the crop in the field. At the end of the growth season, soil samples were collected from each pot and dried for analysis of cohesion and internal friction angle. Fast shear tests were carried out with a EDJ-1 type direct shear-meter. Four vertical pressures, 100, 200, 300 and 400 kPa were applied in the shearing tests, separately. 【Result】 Results showed: (1) being the same in soil moisture content, the soil cohesions in the three amended groups were greater than those in the CK group in coherence. Compared with that in CK, cohesion increased by 156.15% ~ 246.18% in Treatments CMC, by 81.06% ~ 229.3% in Treatments PG, and by 71.91% ~ 145.87% in Treatments BC in the subgroup of low water content, and by 126.3% ~ 231.8%, 75.52% ~ 209.9% and 57.79% ~ 124.8%, respectively, in the subgroup of high water content. However, application of soil amendment did not have much effect on soil internal friction angle in aeolian soil. (2) with increasing rising application rate of soil amendments, soil cohesion significantly increased, showing a positive relationship and good regression between cohesion and soil amendment application rate. (3) being the same in amendment application rate, the soils low in soil water content were higher than their corresponding ones high in soil water content in both cohesion and internal friction angle, but the difference was not significant ( $P > 0.05$ ), and the former was 21.02%, 24.69% and 11.57% higher in Treatments CMC, 10.3%, 19.05% and 13.59% higher in Treatments PG and 16.49%, 9.48% and 16.93% higher in Treatments BC. 【Conclusion】 In summary, application of soil amendments can significantly improve soil cohesion, but does not have much effect on soil internal friction angle. In terms of soil coherence enhancing efficiency, the three kinds of soil amendments exhibit an order of carboxymethylcellulose sodium > phosphogypsum > biochar. All the findings in this study demonstrate that low soil water content is more conducive to improvement of shear strength of aeolian soil, by enhancing soil cohesion, together with application of soil amendments, thus stabilizing aeolian soil and improving ecological environment of the desert area. Among the three kinds of soil amendments, CMC is the most effective one.

**Key words** Aeolian soil; Soil amendment; Soil mechanics; Shear strength

(责任编辑: 檀满枝)