

气化渣改良风沙土对土壤水分物理性质的影响

赵 炜¹, 赵 举², 魏占民¹, 尹春艳², 刘 虎³, 朱 波⁴

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2.内蒙古农牧业科学院 资源环境与检测技术研究所, 呼和浩特 010031;

3.水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 4.内蒙古博大实地化学有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000)

摘 要:为了探讨气化渣对毛乌素沙漠风沙土的改良效果,利用气化渣作为一种风沙土改良材料,与风沙土按不同掺入量混合,通过对土壤粒径组成、保水性能以及土壤水分特征曲线的变化情况,探讨了气化渣对风沙土土壤水分物理性质的影响。结果表明:添加气化渣使风沙土的粒径组成得到明显改善,砂粒含量降低 5.89%~35.8%,黏粒、粉粒含量分别提高 0.89%~2.92%,7.94%~32.88%,风沙土土壤容重显著降低($p<0.05$),降低幅度为 7.75%~55.5%;风沙土土壤质地也由砂土转向砂质壤土,保水性能也随之呈现上升的趋势,显著影响了土壤饱和含水量、毛管持水量和田间持水量($p<0.05$),增长幅度分别为 13.53%~158.93%,7.12%~126.95%,23.19%~252.47%;Van Genuchten模型可以很好地拟合气化渣添加后风沙土的土壤水分特征曲线,表明气化渣的添加明显提高了土壤保水性,并且风沙土土壤保水性能的主成分分析结果表明气化渣添加量越高土壤保水性提高越明显。由此可以得出,水煤浆气化渣能够有效地改善风沙土的水分物理性质,显著提高风沙土的保水性能,对风沙土改良效果明显。

关键词:土壤改良; 保水性能; 水分特征曲线; 气化渣; 风沙土

中图分类号:S152

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0064-06

Effect of Aeolian Sandy Soil Improved by Gasification Slag on Soil Water Physical Properties

ZHAO Wei¹, ZHAO Ju², WEI Zhanmin¹, YIN Chunyan², LIU Hu³, ZHU Bo⁴

(1.Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.Institute of Resources Environment and Detection Technology, Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, China; 3.Institute of Water Resources for Pastoral Area, MWR, Hohhot 010020, China; 4.Inner Mongolia Broad Field Chemical Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 017000, China)

Abstract: In order to explore the effect of gasification slag on the aeolian sandy soil of the Mu Us Desert, the effects of mixture of the aeolian sand soil with different amounts of the gasification slag used as a kind of aeolian sand soil improvement material on the soil moisture physical properties of aeolian sandy soil were examined through analyzing of the changes in the particle size composition, water retention performance and moisture characteristic curve of the aeolian sand soil mixed with the gasification slag. The results show that the addition of gasification slag can significantly improve the particle size composition of the aeolian sandy soil; the sand content is reduced by 5.89%~35.8%, and the content of clay and silt particles are increased by 0.89%~2.92% and 7.94%~32.88%, respectively, which the aeolian sand soil bulk density significantly reduces ($p<0.05$), the decrease range is 7.75%~55.5%; the soil texture of aeolian sandy soil has also changed from sandy soil to sandy loam, and the water retention performance also shows an upward trend, which significantly affects the saturated water content of the soil and the capillary water holding capacity and field water holding capacity ($p<0.05$), the increase rates are 13.53%~158.93%, 7.12%~126.95%, 23.19%~252.47%, respectively; Van Genuchten model can well fit the aeolian sandy soil after adding gasifi-

收稿日期:2021-03-08

修回日期:2021-04-13

资助项目:内蒙古自治区科技计划项目(2019GG027, 2020CG0057);内蒙古农科院创新资助项目(2020CXJJN06);内蒙古自治区人才开发基金(2020CXJJN06)

第一作者:赵炜(1996—),男,内蒙古阿拉善人,硕士研究生,研究方向为寒旱区农业水利与信息化技术。E-mail:543117458@qq.com

通信作者:魏占民(1960—),男,内蒙古呼和浩特人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究工作。E-mail:weizhanmin@aliyun.com

cation slag; the soil moisture characteristic curve shows that the addition of gasification slag significantly improves soil water retention, and the principal component analysis results of the soil water retention performance of aeolian sandy soil indicate that the higher the addition of gasification slag is, the more obvious the improvement of soil water retention is. It can be concluded that the coal water slurry gasification slag can effectively improve the water physical properties of the aeolian sandy soil, significantly improve the water retention performance of the aeolian sandy soil, and have a significant effect on the improvement of the aeolian sandy soil.

Keywords:soil improvement; water retention; water characteristic curves; gasification slag; sandy soil

气化渣包括粗渣和细渣,是煤化工生产中的固体废弃物。随着国家能源结构的战略调整,以煤气化技术为龙头的现代煤化工在气化过程中产生大量的气化渣^[1],处理方式以堆放和填埋为主,长期堆存既占用土地资源,又容易对周边环境造成污染,每年处理还要耗费大量人力物力,给当地企业和社会带来沉重负担,已经成为影响区域经济社会高质量发展的一个重要生态问题^[2]。随着国家对环保方面的压力增大,提出了对固体废物源头减量和资源化利用的政策,这给政府与企业快速推进气化渣的综合利用提出更高的要求^[3]。

本文的研究区域位于内蒙古鄂尔多斯市乌审旗,研究区土地荒漠化严重,沙化土地的类型多,面积大,分布广,改良应用难度大,这严重影响和制约着当地生产和经济的可持续发展,也是另一个重要生态问题^[4-5]。风沙土是风成沙性母质上发育的土壤,其特征是成土作用经常受到风蚀和沙压,很不稳定,致使成土过程十分微弱,主要存在问题是质地疏松、结构性差、供给养分含量低、保水保肥能力差、改良应用难度大,主要分布在中国北部的半干旱、干旱和极端干旱地区,是我国重要的后备耕地资源之一,对其进行改良的重要性不言而喻^[5-6]。利用气化渣作为一种新的风沙土改良技术,由于都是利用当地的资源,可以省时省工降低成本,对当地的农业生产和生态环境的改善具有重要意义。

气化渣和粉煤灰的性质相近,并且这些年诸多学者对粉煤灰应用于土壤改良方面做了大量研究,说明了粉煤灰在土壤改良中的作用、问题及解决方法^[7-8],其中提及的首要考虑问题就是重金属污染问题,因此首先对气化渣进行了前期的毒理学试验和淋溶试验,结果分析表

明:气化渣中重金属含量均符合国家标准;施加气化渣不会导致被试样地土壤重金属含量超标;气化渣淋溶液中的重金属含量低于对人体健康造成危害的阈值,可以利用气化渣对当地的风沙土进行改良。

基于上述分析,本文将风沙土和水煤浆气化渣(包括粗渣和细渣)按不同掺入量混合,通过对土壤粒径组成、保水性能以及土壤水分特征曲线等土壤水分物理性质的变化情况来探讨气化渣对风沙土的改良效果,为当地沙化区气化渣改良风沙土提供技术支撑。

1 研究区概况

研究试验区位在内蒙古鄂尔多斯市乌审旗(东经 108°17′36″—109°40′22″,北纬 37°38′54″—39°23′50″)。乌审旗位于鄂尔多斯西南部、内蒙古自治区最南端,地处毛乌素沙漠腹部,纬度较高,边沿有山脉阻隔,气候以温带大陆性季风气候为主。地貌类型大部分为风积地貌,“沙滩相间,沙甸结合”,呈现毛乌素沙地特有的自然景观;土壤以风沙土为主,地带性植被属于草原植被带;多年平均降水量 360.4 mm,年内分配不均,冬春季降水稀少,夏秋季降水集中;水土流失的形式以风力侵蚀为主^[9-10]。

2 材料与方法

2.1 供试材料

试验供试土壤取自内蒙古鄂尔多斯市乌审旗表层 50 cm 风沙土土壤,供试气化渣来自内蒙古鄂尔多斯市乌审旗博大实地化学有限公司。试验区土壤的土壤与气化渣基本性质表 1。

表 1 试验土壤与气化渣基本性质

物理 性状	容重/ (g·cm ⁻³)	粒径组成/%			饱和 含水率/%	田间 持水量/%	土壤质地
		砂粒(<2 μm)	粉粒(2~50 μm)	黏粒(>50 μm)			
气化细渣	0.36	43.21	51.95	4.85	224	97	粉砂质壤土
气化粗渣	0.88	81.09	17.18	1.73	65	24	壤质砂土
风沙土	1.60	97.24	2.56	0.20	24	9.6	砂土

2.2 试验设计

风沙土土壤中颗粒间孔隙大,毛细管作用弱,土壤质地疏松,通透性好,由此导致沙质土壤保水性差、

蓄水力弱。由基础性质表可知,气化粗渣的粒径组成与风沙土的相差不大,所以气化粗渣比例不宜定太高,而气化细渣的粉粒含量为 51.95%,要远高于风沙土的粉粒含量,并且气化细渣的营养含量要高于气化

粗渣和风沙土的营养含量,因此对风沙土改良主要以细渣和沙土的搭配为主。试验选择气化细渣和气化粗渣两因素,共 9 种处理,每个处理 3 次重复。具体处理方案见表 2。

表 2 试验设计

处理	CK	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6	处理 7	处理 8
气化细渣	0	0.000	0.000	0.088	0.088	0.088	0.176	0.176	0.176
气化粗渣	0	0.036	0.072	0.108	0.108	0.144	0.144	0.180	0.216
气化渣总量	0	0.036	0.072	0.160	0.196	0.232	0.320	0.356	0.392

2.3 测试指标及方法

土壤粒径组成的测定采用激光粒度仪法。简要操作方法为,将土壤和气化渣放置阴凉处晾干,用木棒充分碾压,再用 1 mm 筛子进行筛分,将筛好的各处理土壤样品放入激光粒度分析仪进行测定,并用粒径分析软件 Talwin 处理数据,确定粒径组成及土壤质地。

保水性能的测定:采用环刀法进行测定。简要操作方法为,将装有各处理土壤样品的环刀称重后放到平底托盘中加水至环刀上缘,待其吸水 24 h 后进行称重。然后再将环刀放置于干砂上,待 2 h 和 24 h 后,分别称重。最后在 105℃ 条件下将环刀烘干并再次称重。根据上述称重的数据,分别计算求得各处理的饱和含水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度和非毛管孔隙度^[11]。

土壤水分特征曲线的测定:采用压力膜仪法测定改良后土壤水分特征曲线。简要操作方法为,将装有各处理土壤样品的环刀放到平底托盘中加水放置至完全饱和后称重,放入压力锅中加压,待水流不再流出达到平衡后取出称重,再放回压力锅中,提高压力值继续加压至平衡后称重,重复上述过程,得到一系列土壤水吸力和对应的土壤含水量,从而绘制土壤水分特征曲线^[12]。

2.4 数据处理

数据采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,差异显著性检验采用 LSD 法(显著 $p<0.05$,极显著 $p<0.01$);采用单因素方差分析(ANOVA)比较不同处理间的保水性能的差异,用 Duncan 法进行显著性检验;采用 RETC 软件进行土壤水分特征曲线拟合;用

主成分分析对各处理的改良效果进行评价。

3 结果与分析

3.1 掺入气化渣对风沙土土壤粒径组成的影响

从表 3 可以看出,掺入气化渣后,土壤容重、砂粒含量及非毛管孔隙度均呈现减小趋势,降低幅度分别为 7.75%~55.5%,8.82%~35.8%,1.11%~13.41%;黏粒含量、粉粒含量及毛管孔隙度均呈现升高趋势,提高幅度分别为 0.89%~2.92%,7.94%~32.88%,2.44%~18.99%。容重、非毛管孔隙度与砂粒含量均呈现显著正相关($r>0, p<0.05$),与粉粒、黏粒含量均呈现显著负相关($r<0, p<0.05$);毛管孔隙度与砂粒含量呈现显著负相关($r<0, p<0.05$),与粉粒、黏粒含量均呈现显著正相关($r>0, p<0.05$),说明随着粗渣和细渣的掺入量增加,黏粒和粉粒所占比例不断增高,并且填充到风沙土的大孔隙间,使内部大孔隙减少,小孔隙增多,因而土壤的容重逐渐降低,改善了风沙土的质地疏松、孔隙大的缺点。而且根据土壤质地分级来看,在随着气化粗渣和细渣掺入比例不断提高之后,重构土壤的土壤质地从砂土逐渐转变为壤质沙土进而转变为砂质壤土,改善了风沙土土壤质地。土壤改良中,由于壤土的结构性好,容重小,因此土壤改良的实质就是将各种极端劣质土壤向壤土方向改良。从试验数据来看,对风沙土的改良方案的方向符合一般规律。由此可见,气化渣的添加可以起到降低土壤容重的作用,有助于改善风沙土土壤粒径及孔隙结构,对沙土的粒径改良效果显著。

表 3 风沙土粒径试验结果分析

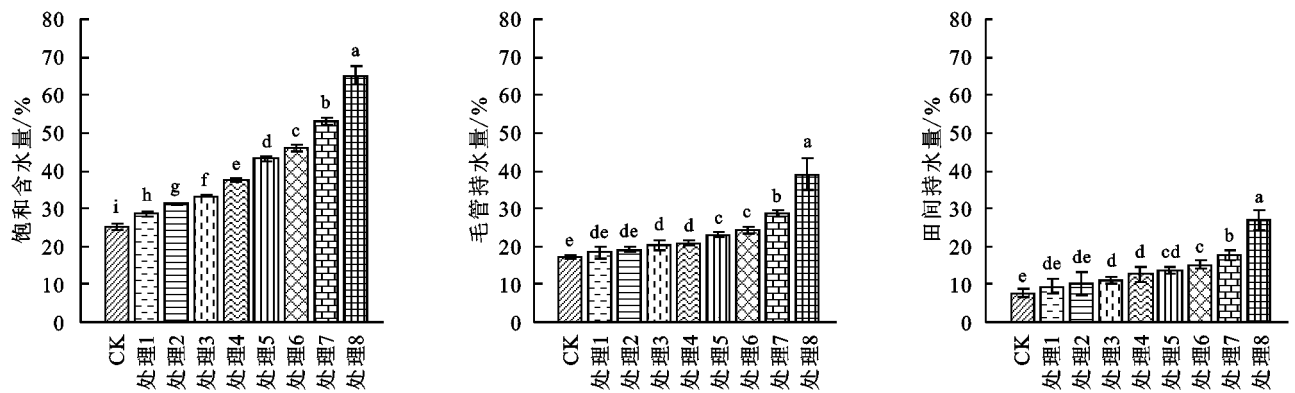
处理	CK	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6	处理 7	处理 8
容重/(g·cm ⁻³)	1.600a	1.476b	1.352c	1.280d	1.156e	1.032f	0.960g	0.836h	0.712i
砂粒/%	97.24s	91.35b	88.42c	85.15c	82.73cd	77.88e	79.53de	66.75f	61.44g
黏粒/%	0.20e	0.86d	1.09d	1.30cd	1.63bc	2.07b	1.93b	3.00a	3.12a
粉粒/%	2.56g	7.79e	10.50f	13.55e	15.64de	20.05c	18.55cd	30.25b	35.44a
毛管孔隙度/%	23.320b	23.889b	24.228b	24.297b	25.324ab	25.729ab	26.701a	27.553a	27.748a
非毛管孔隙度/%	20.767a	20.537a	20.403a	19.945a	19.484ab	19.331ab	18.143b	18.052b	17.984b
土壤质地	砂土	砂土	砂土	壤质砂土	壤质砂土	壤质砂土	壤质砂土	砂质壤土	砂质壤土

注:同一行中不同字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。

3.2 掺入气化渣对风沙土保水性能的影响

由图1可以看出,在掺入气化粗渣和细渣之后,随着掺入比例不断提高,对风沙土土壤保水性能均有所提高。饱和含水率呈现显著上升的趋势($p < 0.05$), $CK < \text{处理1} < \text{处理2} < \text{处理3} < \text{处理4} < \text{处理5} < \text{处理6} < \text{处理7} < \text{处理8}$,并且变化趋势线的斜率明显越来越大,说明增长的幅度也逐渐增大,提高幅度为 $13.53\% \sim 158.93\%$,处理1—8的饱和含水量与CK呈显著性差异($p < 0.05$),其中处理5—8与CK的饱和含水量达到了极显著性差异($p < 0.01$)。毛管持水量呈现上升的趋势,其规律为: $CK < \text{处理1} < \text{处理2} < \text{处理3} < \text{处理4} < \text{处理5} < \text{处理6} < \text{处理7} < \text{处理8}$,并且变化趋势线的斜率明显越来越大,说明增长的幅度逐渐增大,因此土壤毛管持水量随着风沙土中气化渣施用量的增加而增大;提高幅度为 $7.12\% \sim$

126.95% ;处理1—2的毛管持水量与CK无显著性差异,处理3—8的毛管持水量与CK呈显著性差异($p < 0.05$),其中处理7—8与CK的毛管持水量达到了极显著性差异($p < 0.01$)。田间持水量也呈现上升的趋势,其规律为: $CK < \text{处理1} < \text{处理2} < \text{处理3} < \text{处理4} < \text{处理5} < \text{处理6} < \text{处理7} < \text{处理8}$,因此随着风沙土中气化渣施用量的增加,土壤田间持水量有所提高,提高幅度为 $23.19\% \sim 252.47\%$;处理1—2的田间持水量与CK差异性不显著,处理3—8的田间持水量与CK呈显著性差异($p < 0.05$),其中处理6—8与CK的田间持水量达到了极显著性差异($p < 0.01$)。饱和含水量、毛管持水量和田间持水量均与砂粒含量呈现显著负相关($r < 0, p < 0.05$),与粉粒、黏粒含量均呈现显著正相关($r > 0, p < 0.05$),与由此可见,增加气化渣的用量,可以提高风沙土土壤的保水性能。



注:不同字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。

图1 气化渣对风沙土保水性能的影响

3.3 掺入气化渣对风沙土土壤水分特征曲线的影响

土壤水分特征曲线是描述土壤水吸力与土壤含水量的变化关系曲线,既可以说明土壤持水性和土壤水分的有效性,又能体现土壤水分的数量与能量的变化关系。由图2可以看出,掺入气化渣后对土壤特征曲线有影响,使土壤水分特征曲线较对照处理呈现整体上移,即相同PF值(土壤水吸力)下掺入气化渣的土壤含水率大于不掺入气化渣的处理,并且随着气化渣掺入量的增大,相同PF值下土壤含水率越大,其主要原因是掺入气化渣后,改善了土壤孔隙结构,减小了风沙土土壤孔隙度,增强了保水性;在相同PF值下处理7和处理8土壤含水率比其他处理的含水量相差极大;在吸力段PF为 $100 \sim 200$ kPa,相同PF值下处理4,5,6与对照组的土壤含水率相差不大,在其他吸力段内,相同PF值下处理4,5,6与对照组的土壤含水率相差较大;相同PF值下处理1,2,3与对照组的土壤含水率相差不大。可见,掺入气化渣能提高风沙土的含水率,增强土壤保水性,并且气化渣掺入量必须达到一定程度才会对土壤水分特征曲线具有明显的影响,为

定量分析气化渣含量对土壤水分特征曲线的影响,采用 Van Genuchten 模型做进一步分析。

在 Van Genuchten 模型中,由表4可知,决定系数 R^2 在 $0.971 \sim 0.996$,说明VG模型可以较好地模拟气化渣含量对土壤水分特征曲线的影响。滞留含水率(θ_{res})和饱和含水率(θ_{sat})呈现上升的趋势,其中CK的滞留含水率和饱和含水率均小于其他处理。 a 值是水分特征曲线接近饱和时拐点吸力值的倒数, a 值越大说明土壤持水性越差,气化渣的掺入使处理1—8的 a 值均低于CK; n 为形状系数, n 的取值影响拟合水土特征曲线的弯曲程度, n 值越小,拟合的水土特征曲线越平缓,而煤气化渣掺入量的变化对形状系数 n 值的影响无明显规律。由此可知,气化渣的添加明显提高了风沙土的土壤持水性能、增强了其保水性。

3.4 掺入气化渣对风沙土土壤保水性能影响的主成分分析

主成分分析方法可在复杂的指标体系中筛选出若干个彼此不相关的综合性指标,进行降维处理,这些综合指标能表明出原来全部指标所提供的大部分

信息。选取各处理的饱和含水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度和非毛管孔隙度 5 个因子,运用 SPSS 中的因子分析进一步求出矩阵的特征值、特征向量、贡献率和累积贡献率,见表 5,根据特征值 $\lambda \geq 1$ 的原则,提取了 1 个主成分,基本能说明土壤保水性能的基本信息。将 5 个因子原始数据进行标准化,根

据主成分得分系数(表 5)计算保水性能综合得分,综合得分的 IFI 值越高表示保水能力越高;反之,则表示保水能力越低,结果见表 6,得分排序为:配方 8>配方 7>配方 6>配方 5>配方 4>配方 3>配方 2>配方 1>CK,由此可见,随着掺入比例的增大,保水能力越来越高。

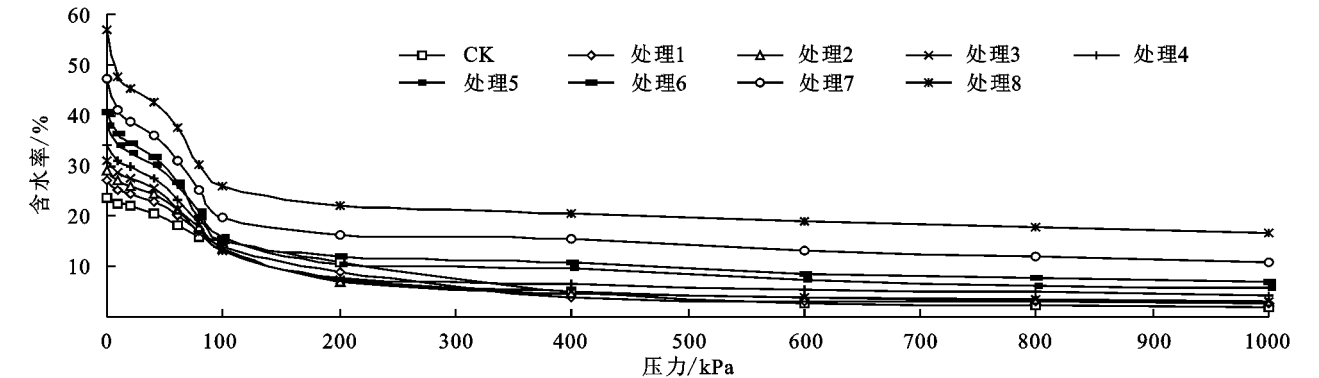


图 2 气化渣对风沙土土壤水分特征曲线的影响

表 4 土壤水分特征曲线模型参数

处理	CK	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6	处理 7	处理 8
θ_{res}	0.001	0.009	0.017	0.031	0.038	0.045	0.056	0.085	0.124
θ_{sat}	0.229	0.264	0.285	0.304	0.328	0.367	0.388	0.446	0.545
α	0.043	0.031	0.024	0.023	0.020	0.020	0.017	0.015	0.012
n	1.942	1.943	1.959	1.898	2.118	1.867	2.310	2.160	1.639
R^2	0.989	0.996	0.989	0.99	0.984	0.983	0.981	0.980	0.971

表 5 风沙土土壤保水性能主成分分析的计算数值

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	保水性能指标	因子荷载	得分系数
1	4.722	94.433	94.433	饱和含水量	0.998	0.46
2	0.257	5.148	99.580	毛管持水量	0.955	0.44
3	0.013	0.267	99.847	田间持水量	0.972	0.45
4	0.005	0.109	99.956	毛管孔隙度	0.974	0.45
5	0.002	0.044	100.000	非毛管孔隙度	-0.949	-0.44

表 6 风沙土土壤保水性能主成分分析的综合得分

处理	CK	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	处理 5	处理 6	处理 7	处理 8
IFI 值	-2.40	-1.85	-1.52	-1.14	-0.39	0.18	1.14	2.10	3.88
排名	9	8	7	6	5	4	3	2	1

4 讨论

气化渣包括粗渣和细渣。气化粗渣是在气化炉高温高压条件下经熔融、激冷、凝结等流程,由气化炉底部排出的渣类,粒径集中分布在 4 750~1 000 μm ,其特性表现为粒径组成中气化粗渣中砂粒比重大,砂粒粒径大,可以改善土壤的气孔结构,使内部孔隙增多,因而使土壤容重降低,土壤保水性增强;气化细渣是气化炉顶部由气流携出并经初步洗涤净化,沉淀得到的渣类,粒径均小于 1 000 μm ,其特性表现为黏粒比重大,黏粒的表面积大,具有较强的吸附作用,与土壤混合,其可以填充在土壤的大孔隙间,改善土壤的

质地,提高了土壤的保水性^[13]。由于风沙土土壤中大粒径颗粒所占比例大,形成了土壤中以大通气孔隙为主的孔隙结构,这种结构导致土壤孔隙弯曲少、紧实性差,对土壤水运移阻碍小,使土壤水传导性高,使土壤养分流失严重。而气化渣的施用改变了风沙土的孔隙结构,细小的气化渣颗粒可以填充到沙土的大孔隙中,有效地减少了大孔隙的比例,降低风沙土水力传导能力,有效地减弱了风沙土的土壤渗透性,减缓了土壤水运移,提高了土壤保水性。

在沙化干旱地区,土壤水分是影响植物生长的重要因素之一。土壤保水性能最为常见的指标就是土壤饱和含水量、毛管持水量和田间持水量。已有研究

表明在土壤中施用固体添加物可以提高土壤的总孔隙度,从而提高土壤的饱和体积含水量,明显改善土壤的保水性能,比如粉煤灰和生物炭^[14-15],本研究表明气化渣的掺入能提高风沙土的饱和含水量、毛管持水量和田间持水量,提高风沙土的持水性能,这一结果与前人研究结果一致^[16-17]。通过研究气化渣不同添加量对风沙土土壤水分特征曲线的影响,发现随着气化渣的添加明显提高了风沙土的持水性和保水性,原因是由于煤气化过程的高温(800~1 300℃)和激冷作用,气化渣呈现出比表面积大、多孔均孔特性^[18-19],使其可以吸附超过自身重量的水分,从而产生改善土壤结构、增加团聚体等的作用,提高土壤持水性和保水性。土壤持水性的提高不但可以防止水土流失及侵蚀而且还有利于农作物生长^[20]。虽然气化渣的掺入提高了风沙土土壤的持水性和保水性,但是这种作用所持续的时间及对作物的有效性及对养分、蒸发等的影响还需进一步研究和探讨。

5 结 论

(1) 试验结果表明气化渣的添加可以起到降低风沙土土壤容重的作用,随着气化渣量的添加风沙土土壤质地由砂土转向砂质壤土。因为土壤容重降低和气化渣的充填大孔隙的作用导致风沙土土壤孔隙增多,这极大的增加了风沙土土壤中水分的有效性、减缓了土壤水分运移速率,解决了风沙土的持水能力和保水性能差的问题。

(2) 风沙土土壤的保水性能随气化渣用量的增加呈现上升的趋势,土壤饱和含水量、毛管持水量和田间持水量与砂粒含量呈现显著负相关,与粉粒、黏粒含量均呈现显著正相关,表明气化渣掺入量增加对风沙土保水性能提高显著。

(3) Van Genuchten 模型可以很好地拟合气化渣添加后风沙土的土壤水分特征曲线,模型表明气化渣的添加明显提高了土壤持水性和保水性,而且对风沙土土壤保水性能的主成分分析进一步表明气化渣添加量对风沙土持水性和保水性具有显著提高作用,对风沙土的改良效果明显。

参考文献:

[1] Schwitalla D, Reinmiller M, Forman C, et al. Ash and slag properties for co-gasification of sewage sludge and coal: An experimentally validated modeling approach [J]. Fuel Processing Technology, 2018, 175: 1-9.

[2] 商晓甫,游洋洋,周金倩,等. 煤气化渣利用技术研究现状及应用趋势浅析[C]// 中国环境科学学会. 2016 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷). 海南: 中国环

境科学学会, 2016.

- [3] 中循新科环保科技有限公司. 中国大宗工业固体废弃物综合利用产业发展报告(2018-2019 年度)[R]. 北京: 中循新科环保科技有限公司, 2019.
- [4] 石辉, 刘秀花, 陈占飞, 等. 陕北榆林毛乌素沙地大规模土地整治开发的生态环境问题及其对策[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2228-2235.
- [5] 王陇, 高广磊, 张英, 等. 毛乌素沙地风沙土粒径分布特征及其影响因素[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 1003-1010.
- [6] 毛丽. 毛乌素沙地不同地类土壤粒度与有机质及其相关性研究[D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [7] 关红飞, 张雷, 张瑞庆. 粉煤灰在土壤改良和土地整治中的作用[J]. 农业工程, 2017, 7(5): 86-89.
- [8] 张亚蕾. 醋糟—粉煤灰基质对青稞生长状况及土壤理化性状的影响[J]. 现代农业科技, 2019(11): 19, 21.
- [9] 代海燕, 梁显丽, 宝秋利, 等. 近 46 年毛乌素沙地和科尔沁沙地潜在蒸散量的变化特征及影响因子分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 8-13, 27.
- [10] 张露, 韩霁昌, 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.
- [11] 张超英, 陈艳鑫, 耿玉清, 等. 生物炭和保水剂对煤矸石基质水分物理特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(9): 122-128.
- [12] 程东娟, 齐鸣, 刘淙琮. 秸秆还田量对土壤持水性影响的室内试验研究[J]. 节水灌溉, 2020(9): 30-32, 38.
- [13] 盛羽静. 气流床气化灰渣的理化特性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- [14] 赵亮, 唐泽军, 刘芳. 粉煤灰改良沙质土壤水分物理性质的室内试验[J]. 环境科学学报, 2009, 29(9): 1951-1957.
- [15] 潘金华, 庄舜尧, 曹志洪, 等. 生物炭添加对皖南旱地土壤物理性质及水分特征的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 320-326.
- [16] 相玉琳, 焦玉荣, 王立鹏. 可溶性有机质改性气化渣对黑沙蒿生长及重金属迁移转化的影响[J]. 榆林学院学报, 2019, 29(6): 1-3.
- [17] 李强, 孙利鹏, 亢福仁, 等. 煤气化渣—沙土复配对毛乌素沙地苜蓿生长及重金属迁移的影响[C]// 中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2019 年科学技术年会: 环境工程技术创新与应用分论坛论文集(四). 西安: 中国环境科学学会环境工程分会《环境工程》编辑部, 2019.
- [18] 孙立, 沈中杰, 梁钦锋, 等. 气流床气化炉水激冷固态熔渣理化特性研究[J]. 化学工程, 2014, 42(5): 61-65, 71.
- [19] 郭端华, 高敏红, 吴德礼, 等. 利用蚯蚓处理水煤浆气化渣[J]. 化工技术与开发, 2016, 45(11): 51-53.
- [20] 包维斌, 白一茹, 赵云鹏, 等. 生物炭添加对宁夏中部旱区土壤水分入渗及持水性的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1326-1332.