

曲晓玲, 毛伟兵, 孙玉霞, 等. 配施泥沙对黏质盐土盐分吸附与淋洗的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(3): 599-605.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.03.010

配施泥沙对黏质盐土盐分吸附与淋洗的影响

曲晓玲, 毛伟兵, 孙玉霞, 孙雪蓉
(山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 为研究引黄泥沙对滨海黏质盐土盐分吸附与淋洗的影响机理, 利用黄河三角洲引黄灌区亟需处理的大量淤积泥沙, 对滨海黏质盐土进行室内和田间配施泥沙试验。室内试验采用土柱模拟的方法, 主要研究配施泥沙对土壤水盐吸附和盐分淋洗的影响与变化规律, 确定适宜的田间试验配施泥沙量范围。结果表明: (1) 配施泥沙可降低黏质盐土对盐分和水分的吸附能力, 土壤含盐量和饱和含水量均与配施泥沙量存在极显著负相关。(2) 随配施泥沙量的增加, 土壤饱和和导水率呈现指数递增, 但是土壤淋洗脱盐效率并不随饱和和导水率的升高而增加, 而在配施泥沙量 12.9 kg/m²至 139.4 kg/m²内保持较高水平。(3) 配施泥沙能有效抑制黏质盐土表层含盐量, 但表层含水量降低明显, 当田间配施泥沙量为 35 kg/m²时, 与未配施泥沙对照(CK)相比, 2016年、2017年表层土壤含盐量分别降低了 26.5%、26.6% ($P < 0.05$)。(4) 配施泥沙后小麦产量均显著提高, 2016年、2017年小麦产量最高分别比 CK 提高了 64.4%、29.3% ($P < 0.05$)。因此, 黏质盐土配施泥沙不仅能有效抑制土壤对盐分的吸附, 而且可提高土壤盐分淋洗效率, 增加冬小麦产量。

关键词: 黏质盐土; 引黄泥沙; 盐分吸附; 盐分淋洗

中图分类号: S156.4⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)03-0599-07

Effects of sediment distribution on salt adsorption and leaching in saline clay soil

QU Xiao-ling, MAO Wei-bing, SUN Yu-xia, SUN Xue-rong
(College of Hydraulic and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract: In order to study the influence mechanism of Yellow River sediment on salt adsorption and leaching of coastal saline clay soil, laboratory and field experiments were carried out by using a large number of silt urgently needed to be treated in Yellow River Delta irrigation area. In laboratory experiment, the effects and variation of sediment distribution on soil water and salt adsorption and salt leaching were studied by soil column simulation, and the suitable range of sediment distribution was determined for field experiment. The results showed that the sediment distribution could reduce the adsorption capacity of saline clay soil to salt and water. There was a significant negative correlation between soil salt content and saturated water content and sediment distribution. With the increase of sediment content, the soil saturated hydraulic conductivity increased exponentially. The desalting efficiency of soil elution did not increase with the increase of saturated hydraulic conductivity, but maintained a high level when the sediment content ranged from 12.9 kg/m² to 139.4 kg/m².

Sediment application could effectively inhibit the salt content in the top layer of the soil, but the soil surface water content was significantly reduced. When the sediment content was 35 kg/m², compared with the control (CK), the salt content in the top layer of the soil in 2016 and 2017 was reduced by 26.5% and 26.6% respectively ($P < 0.05$). The wheat yield after sand-dressing was signif-

收稿日期: 2019-08-03

基金项目: 山东省重大科技创新项目(2017CXGC0306)

作者简介: 曲晓玲(1995-), 女, 山东荣成人, 硕士研究生, 主要从事农业水土工程土壤改良方面的研究。(E-mail) qxdyx1995@163.com

通讯作者: 毛伟兵, (E-mail) maoweibing316@126.com

icantly increased. Moreover, the highest wheat yield in 2016 and 2017 was 64.4% and 29.3% higher than that of control, respectively ($P < 0.05$). Therefore, the sediment distribution in saline clay soil can not only effectively inhibit the adsorption of the soil to the salt, but also improve the salt-leaching efficiency and increase the yield of the winter wheat.

Key words: saline clay soil; Yellow River sediment; salt adsorption; salt-leaching

黄河三角洲地区的各类滨海盐土是中国重要的农业后备耕地资源,由于土壤质地黏重、物理性状不良,导致盐分淋洗困难、土壤含盐量高、植物难以生长^[1-4]。长期以来,一直缺乏适宜的改良材料和方法,土壤利用难度大,成为限制盐碱土改良与高效利用的关键问题^[5-7]。

目前,改良盐碱土最有效的措施是通过添加各种改良材料或改良剂,快速改变盐碱土恶劣的物理性状,改善土壤结构,提高土壤导水和入渗性能,促进土壤盐分的快速淋洗^[8-9]。由于粉磨石膏、沸石、氯化钙等化学改良剂价格昂贵,大面积农田应用受限^[10]。粉煤灰、煤矸石粉、陶瓷粉、铝土矿渣等有潜在的重金属污染,农田使用被严格控制^[11]。因此,研究适合不同区域水土资源条件和生态环境特点的,又高效低廉和环保实用的盐碱土改良材料,是盐碱土改良亟需解决的一个关键问题^[12]。土壤沙粒的表面积较小,一直被认为是土壤中的惰性成分,缺乏活性,对土壤养分、盐分的吸附性影响较小^[13],从而在有关研究中很少涉及。本课题组前期研究发现,虽然土壤沙粒不像黏粒那样具有巨大的表面积和高度的活性,但是这部分土壤颗粒的变化,特别是增加土壤极细沙粒的比例,对于减少土壤盐分吸附,降低盐碱土壤的含盐量具有重要的作用^[14-15]。黄河三角洲各引黄灌区每年有巨量的淤积泥沙亟需处理,也是调控黏质盐土质地,改善土壤物理性状、水分特性和水盐运移状况的良好材料,但对于引黄泥沙在改良盐碱土中的应用与作用却鲜有研究。

本研究通过土柱淋滤和田间试验方法探讨配沙改良对滨海盐土盐分吸附与淋洗脱盐的作用,为利用黄河三角洲亟需处理的大量引黄泥沙改良黏质盐土提供理论依据,以有效解决该地区长期存在的泥沙利用、盐碱土改良和生态环境保护之间的矛盾。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验地位于山东省滨州市渤海粮仓项目示范区(117°55'32"E,37°56'03"N,海拔3 m),属暖温带半

湿润大陆性季风气候,区域内多年平均降雨为545 mm,是山东省降雨最少的地区。6-8月降雨集中,约占全年总降雨量的80%,每年10月到次年5月,多年平均降雨量只有108 mm。多年平均水面蒸发量1994 mm,蒸降比约3.65。5、6月份土壤蒸发量最大,约占全年土壤总蒸发量的40%。由于缺少充足有效的降雨,使土壤在一年中有8个月都处在积盐阶段,导致土壤表层盐分难以向土壤下层淋洗和向土体外部迁移。浅层地下水深埋1.0~2.0 m,地下水矿化度为8~15 g/L,局部地区可达30 g/L,以氯化物为主。受气候、浅层地下水等影响,春季土壤含盐量一般在3 g/kg以上,盐碱化程度十分严重。

1.2 试验材料

引黄泥沙:引黄泥沙为小开河引黄灌区沉沙池入水口附近的清淤泥沙,主要由粒径<1.00 mm的各级颗粒组成,其中1.000~0.501 mm、0.500~0.251 mm、0.250~0.101 mm、0.100~0.051 mm和0.050~0.002 mm的泥沙颗粒分别为0.2%、0.1%、10.6%、84.6%和4.5%。由于粒径大于0.050 mm的泥沙颗粒在水流作用下输送困难,所以在引黄灌区的淤积泥沙中极细沙粒所占比例最多。

滨海黏质盐土:主要分布在滨海低平地上,土壤通体黏重,属黏土类。土壤容质量一般在1.45~1.55 g/cm³。土壤中粒径大于0.100 mm的各级沙粒仅为0.09%,0.100~0.051 mm的极细砂粒为3.40%,0.050~0.011 mm的粗粉粒含量最高,占47.40%,0.010~0.006 mm的细粉粒、0.005~0.002 mm的粗黏粒、<0.002 mm细黏粒分别占8.90%、10.90%、29.70%。由于质地黏重,春秋两季土壤含盐量较高时,地表常有盐结皮。土壤含盐量一般在5 g/kg以上,部分土壤甚至超过15 g/kg。大量盐分(特别是Na⁺)造成土壤颗粒分散、结构恶化、肥力低下,表现为土壤紧实板结、通透性差,土壤导水率和入渗率降低等恶劣的土壤物理性状,严重限制了各类作物的生长,小麦667 m²产量只有150~200 kg。

1.3 试验设计

1.3.1 室内试验设计 为了模拟配沙后,滨海黏质

盐土盐分吸附和淋洗的变化规律,在相同容质量下进行室内土柱模拟试验。使用高 10 cm、内径 7 cm 的 PVC 管,下面加打孔的底盖,土柱内下铺 2 cm 厚的细石英砂层。为防止淋洗过程中土壤损失,石英砂层下放 2 张直径与土柱相当的滤纸。所有土柱都按照 1.45 g/cm^3 的容质量装入混合均匀的引黄泥沙和黏质盐土,每个土柱总质量基本保持一致,只是盐土和泥沙的混合比例不同。室内试验中通过配沙量调控混合土壤颗粒组成变化,以明确不同土壤质地类型。试验分为 73 组,每组 3 个重复,土柱中引黄泥沙的配施量从 0 (CK, 黏质盐土) 开始,以每组 1.4% 的比例递增,一直到 100% (全引黄泥沙)。土柱填充完成后先用 250 ml 矿化度为 6.79 g/L 的咸水,以多次少量的方法淋洗土柱,使土柱内的混合土壤充分吸附盐分,然后再用 150 ml 去离子水(模拟田间洗盐的最大灌水量)淋洗土柱,分别测定每个土柱淋洗下水的体积与盐分含量。

为测定不同配施引黄泥沙量下土壤饱和导水率的变化,按模拟土柱的试验配比,将黏质盐土和引黄泥沙均匀混合后按 1.45 g/cm^3 的恒定容质量装入直径为 8 cm、高为 5 cm、体积为 250 cm^3 的环刀内,浸泡饱和后,测定不同土沙配比模拟土柱的饱和导水率。

1.3.2 田间试验设计 田间试验在滨州市无棣渤海粮仓项目示范区进行,采用单因素试验设计,共设 8 个处理,每个处理 3 个重复。小区面积 200 m^2 ($10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$),共 24 个小区,每个小区之间有隔离种植区。田间配沙也选用小开河引黄灌区沉沙池的淤积泥沙,共设置 8 个配施泥沙量处理,分别为 0 kg/m^2 (对照)、 5 kg/m^2 、 10 kg/m^2 、 15 kg/m^2 、 20 kg/m^2 、 25 kg/m^2 、 30 kg/m^2 、 35 kg/m^2 ,这 8 个不同配施泥沙量是根据室内土柱试验结果确定的。为了使试验区的农业耕作方式与当地保持一致,各试验小区均设为 10 m 宽畦,方便农业机械在田间运行以及长距离管道运输泥沙。在冬小麦种植前将定量泥沙均匀地洒在各处理的地表,经旋耕犁多次翻耕,使引黄泥沙与 0~20 cm 的土壤均匀混合。试验过程中,各处理的小麦播种量、灌溉水量、灌水时间、耕作施肥方式、施肥量等都与当地小麦种植方式保持一致。当地农业种植为一年两熟,是冬小麦和夏玉米轮作,由于夏季高温多雨,土壤含盐量一般较低,所以对夏季玉米生长没有影响。田间土壤取样分 0~20.0、

20.1~40.0、40.1~60.0、60.1~80.0、80.1~100.0 cm 共 5 个土层,每个小区 3 个点。田间试验从 2015 年 10 月开始,到 2018 年 6 月结束。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 田间土壤含盐量 采用 5:1 的水土比(质量比)与去离子水混合,振荡过滤后取上清液测定电导率(EC),然后根据 EC 值和土壤含盐量标准曲线,计算土壤含盐量。

1.4.2 土柱淋出液的含盐量 直接测定 EC 值,然后计算其矿化度。

1.4.3 土壤含水量 用烘干法测定。

1.4.4 土壤饱和导水率 采用 KSAT 饱和导水率仪测定不同处理模拟土柱的土壤饱和导水率。为了统一标准比较方便,采用 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的饱和导水率。

1.4.5 小麦产量 在各试验小区取 3 个样方,通过测定穗数、穗粒数和千粒质量,计算小麦产量。

1.5 数据处理

试验中数据的统计处理采用 Excel 进行,图表中数据均为各处理重复的平均值。使用 SPSS17.0 软件进行方差分析和相关性分析。数据平均值之间的差异采用 *t* 检验,差异显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 配施泥沙对黏质盐土水盐吸附与盐分淋洗的影响

2.1.1 对黏质盐土水盐吸附的影响 用高矿化度的盐水少量多次淋洗土柱后,测定混合土壤对盐分的吸附能力。由图 1 可以看出,黏质盐土配施泥沙后,土柱内混合土壤的含盐量和饱和含水量都随配施泥沙量的增加呈现线性递减的趋势,且递减幅度也基本相同,这说明土壤对盐分和水分的吸附规律明显一致性。把混合土壤含盐量和饱和含水量分别与配施泥沙量进行相关性分析,结果显示,土壤含盐量和饱和含水量与配施泥沙量呈现极显著相关,相关系数分别为 -0.793^{**} 和 -0.945^{**} 。所以,黏质盐土中沙粒增加或黏粒减少会降低土壤对水分和盐分的吸附^[16-19]。

2.1.2 对黏质盐土饱和导水率和盐分淋洗的影响

对于黄河三角洲地区的黏质盐土,灌溉和降雨时产生的土壤饱和流成为土壤盐分淋洗和排放的最主要途径。因此,确定黏质盐土的饱和导水率不仅是了解土壤水盐运移规律的前提条件,也是研究土壤

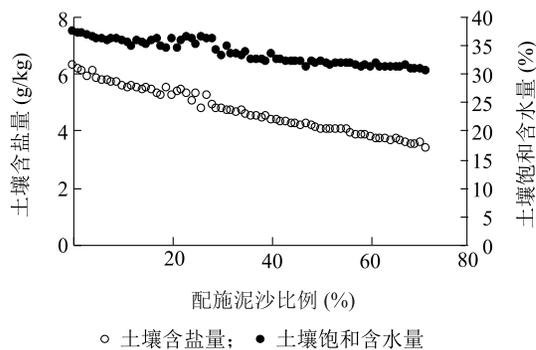


图1 不同配施泥沙处理黏质盐土水盐吸附的变化

Fig.1 Changes of water and salt adsorption in saline clay soil under different sediment distribution treatments

淋洗排盐效果的核心内容^[20]。由图2可见,土壤饱和和导水率的变化与土壤盐分吸附的变化相反,随配施泥沙(即土壤沙粒)量的增加,土壤饱和和导水率呈现指数递增的上升趋势。这是因为土壤饱和和导水率的变化与土壤质地密切相关,提高土壤中沙粒的比例,相应地增加了土壤大孔隙数量,也使土壤饱和和导水率明显增加。

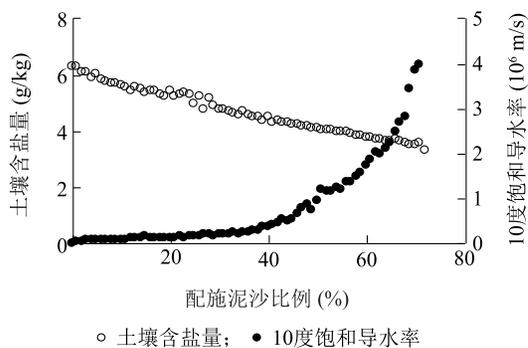


图2 不同配施泥沙处理黏质盐土盐分吸附与饱和和导水率的变化

Fig.2 Changes of salt adsorption and saturated hydraulic conductivity in saline clay soil under different sediment distribution treatments

用去离子水淋洗土柱后,混合土壤的含盐量也随配施泥沙量的增加显著降低,且土壤含盐量变化与盐水淋洗后土壤含盐量的变化趋势保持一致。但是,由于配施泥沙后土壤饱和含水量随之减少,所以当用150 ml去离子水淋洗高含盐量的混合土壤时,单位水量淋洗出土壤的盐分或淋洗后单位土壤排出的盐分数量与土柱内土壤含盐量降低的变化有明显不同(图3)。由此可见,当土壤配施泥沙量为0~

12.9 kg/m²时,随土壤配施泥沙量的增加,土壤盐分淋洗效率和土壤排盐量逐渐升高;土壤配施泥沙量为12.9~139.4 kg/m²时,土壤排盐量则维持在1.98~2.02 g/kg;当土壤配施泥沙量超过139.4 kg/m²时,土壤排盐量随配施泥沙量的增加逐渐降低。随土壤配施泥沙量的增加,虽然土壤吸附的盐分数量降低,但盐分淋洗效率呈现先增加,然后保持不变,再逐渐降低的趋势。根据室内土柱模拟试验结果,从配施泥沙对土壤含水量、盐分吸附能力、盐分淋洗效率的影响和经济实用的角度,决定田间试验的配施泥沙用量为0~35 kg/m²。

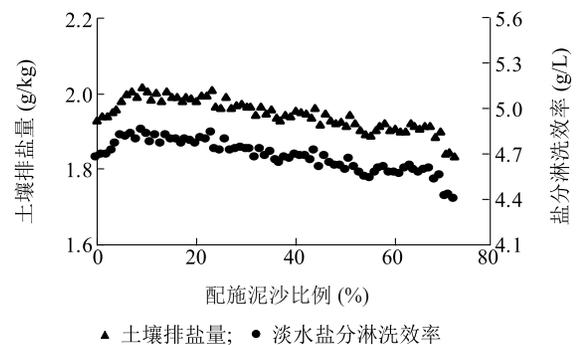


图3 不同配施泥沙处理黏质盐土盐分吸附与淋洗排盐的变化

Fig.3 Changes of salt adsorption and leaching in saline clay soil under different sediment distribution treatments

2.2 田间不同配施泥沙处理的黏质盐土水盐变化

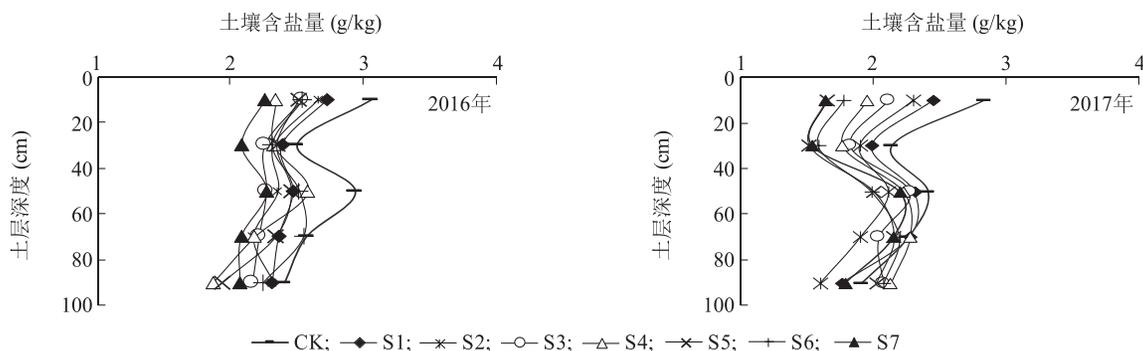
2.2.1 不同配施泥沙处理的黏质盐土含盐量变化

黄河三角洲地区春季降雨少,蒸发作用强烈,土壤盐分累积十分明显,是控制土壤盐分的关键时期。所以春季土壤含盐量变化可准确验证配施泥沙对滨海盐土的改良效果。2016年4月27日和2017年4月28日,取样测定各处理不同剖面土壤盐分含量。测定结果(图4)表明,配施泥沙能大幅度降低0~100 cm土层土体的土壤含盐量,2016年和2017年各处理土壤含盐量变化趋势一致。随土壤配施泥沙量的增加土壤含盐量逐渐降低,说明配施泥沙可以有效改善土壤的颗粒组成,降低土壤中黏粒含量^[21-22],抑制土壤对盐分的吸附。与未配施泥沙对照相比,配施泥沙各处理0~20.0 cm和20.1~40.0 cm土层中土壤含盐量均明显降低,且差异性均达到显著水平($P < 0.05$);在40.1~100.0 cm土层中土壤含盐量虽有降低但各处理间差异不显著($P > 0.05$)。

黄河三角洲地区地下水埋深较浅且地下水矿化

度较高,而黏质盐土的黏粒含量高,黏粒具有较大的比表面积和高度的活性,加强了土壤对盐分的吸附性能,因此,在春季强蒸发条件下,0~20.0 cm 表层土壤最容易发生盐分积累,导致作物生长不良。2016年、2017年配施泥沙量 35 kg/m² 处理土壤含盐

量均最低,分别比未配施泥沙对照降低了 26.5%、26.6%,表明配施泥沙改良可以通过调控黏质盐土的极细砂粒含量,改善土壤的盐分吸附性能,抑制黏质盐土春季强蒸发条件下表层土壤盐分的累积。



CK:对照(配施泥沙量 0 kg/m²);S1~S7:配施泥沙量依次为 5 kg/m²、10 kg/m²、15 kg/m²、20 kg/m²、25 kg/m²、30 kg/m²、35 kg/m²。

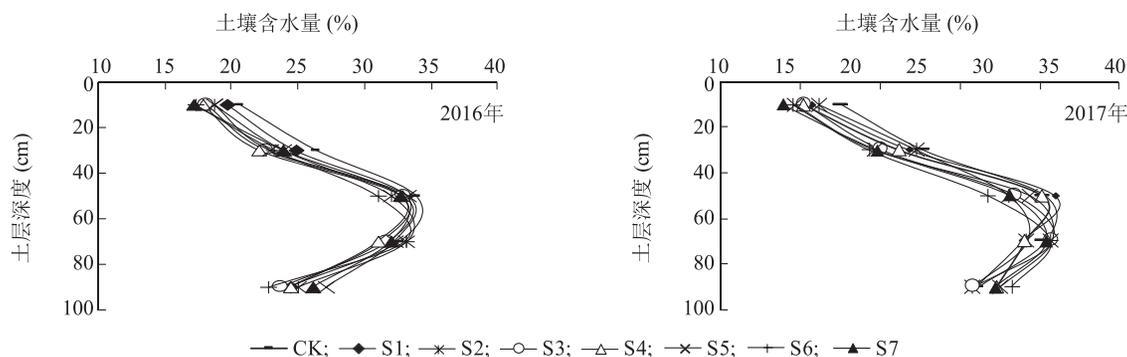
图4 2016年和2017年不同配施泥沙处理黏质盐土含盐量剖面图

Fig.4 Profiles of soil salinity under different sediment distribution treatments in 2016 and 2017

2.2.2 配施泥沙处理对黏质盐土含水量的影响 土壤含水量是反映土壤物理性质的重要因素,受到多种因素的影响,其中土壤颗粒组成是主要的影响因素^[23-24]。田间试验结果表明,配施泥沙处理虽然明显降低了土壤含盐量,但是也在一定程度上减少了0~20.0 cm 土层的土壤水分含量。以2016年和2017年春季田间土壤剖面水分变化为例(图5),配施泥沙后,2016年和2017年各处理在0~20.0 cm 和20.1~40.0 cm 土层土壤含水量降低较明显,随配施泥沙量的增加土壤含水量的变化趋势基本一致,且各处理与

未配施泥沙对照相比差异达显著水平($P < 0.05$)。随配施泥沙量的增加,土壤持水能力逐渐降低。

对比图4可以发现,不同年份在0~20.0 cm 和20.0 cm 以下土层,各处理土壤含水量与含盐量的变化呈现基本相同的规律性。黄河三角洲地区春季干旱少雨,土壤蒸发作用强烈,配沙改良可以通过增加土壤极细砂粒的比例,降低土壤比表面积,增加土壤大孔隙的数量,调控土壤的吸附特性,降低土壤对盐分的吸附能力^[8,25],抑制土壤盐分在表层的积累,但也降低了表层土壤蓄水保水能力。



各处理见图4注。

图5 2016年和2017年各配施泥沙处理黏质盐土含水量剖面图

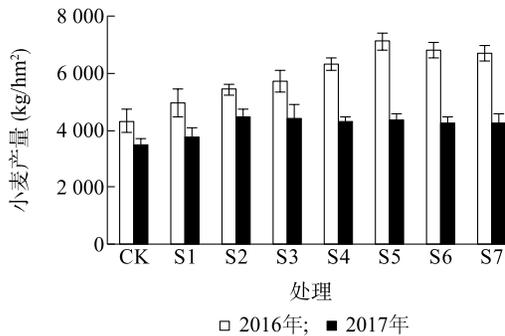
Fig.5 Profiles of soil moisture content under different sediment distribution treatments in 2016 and 2017

2.3 配施泥沙处理对小麦产量的影响

黄河三角洲地区土壤含盐量是决定种植结构的

主导因素,目前区域内中度盐碱地一般以种植耐盐作物棉花为主,投入成本高,产量和收入较低;轻度

盐碱耕地中也只有小部分种植小麦,产量低且不稳定,限制了该区域的农业生产和发展^[26]。由于2017年小麦整个生育期内降雨量仅为2016年的53.4%,2016年、2017年小麦产量随土壤配施泥沙量的增加变化趋势存在明显差异。2016年小麦产量随配施泥沙量的增加S5处理(泥沙配施量为25%)产量最高,与未配施泥沙对照(CK)相比提高64.4%;2017年小麦产量S2处理(泥沙配施量为10%)比CK提高29.3%(图6)。由于各处理的施肥、灌溉等保持一致,只是配施泥沙量不同,所以试验结果说明配施泥沙能有效降低土壤含盐量,提高小麦产量。但在干旱年份,配施泥沙量过大会对土壤保水能力产生影响,进而对小麦产量产生影响,应通过其他措施加以弥补。



各处理见图4注。

图6 2016年、2017年黏质盐土不同配施泥沙处理小麦产量变化

Fig.6 Changes of wheat yield under different sediment distribution treatments in 2016 and 2017

3 讨论

3.1 配施泥沙对黏质盐土改良中节水降盐的影响

如何提高土壤盐分的淋洗效率,一直是盐碱土改良的核心问题之一^[27]。黄河三角洲地区的各类盐碱土主要分布在靠近滨海的洼地和低平地上,这些盐碱土质地黏重、物理性状差、土壤水分运动缓慢,导致盐分淋洗困难、土壤含盐量高,农田灌溉(洗盐)用水量大。由于区域内淡水资源短缺,且位于各引黄灌区的下游,农田灌溉用水量难以得到有效保证,经常出现农田缺水 and 灌溉延迟的问题,所以节水降盐成为盐碱土改良中亟需解决的关键问题。本研究发现,黏质盐土配施泥沙后,不仅土壤饱和含水量明显降低,而且土壤盐分淋洗效率也随之增加,

使得相同灌溉用水量可以淋洗更多的盐分,在一定程度上减少了土壤降盐的灌溉洗盐水量,可有效满足盐碱土改良中节水降盐的需求,为该地区盐碱土改良和节水高效农业发展提供了一条新的途径。但是试验结果也表明,黏质盐土的配施泥沙需要控制一定的配施泥沙量,才能在降盐的基础上,不会对土壤水肥保蓄能力产生明显的不良影响。

3.2 引黄泥沙是改良黏质盐土的适宜材料

盐碱土改良材料应具备4个条件:①在土壤中维持时间长;②使土壤质地明显改善;③能迅速降低土壤含盐量;④改良材料本身含盐量较少,pH值适宜^[28-29]。引黄泥沙源于土壤侵蚀,本身就是土壤,可从根本上、长期改变黏质盐土的质地,迅速改善土壤水盐运移状况,使盐分快速淋出土壤,降低土壤含盐量,还能有效避免其他改良剂对土壤、地下水的污染。黏质盐土配施泥沙后,可以明显降低表层土壤的含盐量,抑制土壤返盐,特别是在灌溉和降雨以后,增加表层土壤中盐分的淋洗效率,对于春季土壤控盐、降盐具有很好的作用。黄河三角洲各引黄灌区内亟需处理的大量引黄泥沙,为区域内盐渍土质地改良提供了绝佳的材料。在黄河三角洲地区,利用引黄泥沙改良黏质盐土,探索适合黄河三角洲区域水土资源与环境特点、高效低廉、环保实用的盐碱土改良方法,是一项意义重大但又极具挑战性的研究工作。

4 结论

(1)配施泥沙能有效改良黏质盐土对盐分的吸附性能,土壤盐分吸附量和土壤饱和含水量均随土壤配施泥沙量的增加呈线性递减,且均与配施泥沙量存在极显著负相关性。(2)土壤饱和导水率随土壤配施泥沙量的增加呈现指数递增,但是土壤淋洗脱盐效率并不随饱和导水率的升高而增加,反而在配施泥沙量为12.9 kg/m²至139.4 kg/m²内保持较高水平。(3)增加滨海盐土中砂粒含量,可以有效调控土壤中水分和盐分的吸附特性。配施泥沙后,在春季强蒸发条件下,可以显著降低0~20.0 cm、20.1~40.0 cm土层土壤盐分含量,对抑制表层土壤盐分积累的作用明显,但在改善土壤对盐分吸附能力的同时也降低了土壤蓄水能力,降低表层土壤含水量。(4)配施泥沙能有效抑制春季表层土壤返盐,降低耕层土壤含盐量,提高滨海盐土小麦产

量。

参考文献:

- [1] MAO W B, KANG S Z, WAN Y S, et al. Yellow river sediment as a soil amendment for amelioration of saline land in the Yellow River Delta [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(6): 1595-1602.
- [2] WANG Z R, ZHAO G X, GAO M X, et al. Spatial variability of soil salinity in coastal saline soil at different scales in the Yellow River Delta, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(2): 1-12.
- [3] 郟亚栋, 蒋腊梅, 吕光辉, 等. 温带荒漠植物叶片功能性状对土壤水盐的响应[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(11): 2000-2010.
- [4] 韩剑宏, 刘泽霞, 张连科, 等. 生物炭和环保酵素对盐碱化土壤特性的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(5): 1029-1036.
- [5] 王洁, 校亮, 毕冬雪, 等. 风化石改变黄河三角洲盐渍化土壤溶液组分的过程[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1367-1376.
- [6] 武兰芳, 柏林川, 欧阳竹, 等. 山东省环渤海平原区粮食产出潜力与技术途径分析[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(6): 682-689.
- [7] 王乃江, 高佩玲, 赵连东, 等. 咸淡水分配比例对盐碱土壤水分入渗特征与脱盐效果的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(6): 100-105.
- [8] 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.
- [9] WANG X P, YANG J S, LIU G M, et al. Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 149: 44-54.
- [10] GONG C, MA L, CHENG H, et al. Characterization of the particle size fraction associated heavy metals in tropical arable soils from Hainan Island [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139(4): 109-114.
- [11] RAM L C, MASTO R E. Fly ash for soil amelioration: A review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments (Review) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 128(128): 52-74.
- [12] CONDE S I, LOBO C M, BELTRÁN-HERNÁNDEZ I R. Remediation of saline soils by a two-step process: Washing and amendment with sludge [J]. *Geoderma*, 2015, 247: 140-150.
- [13] LAL R, SHUKLA M K. Principles of soil physics [M]. New York, Academic: Marcel Dekker, 2004: 12-256.
- [14] RODRÍGUEZ-LADO L, LADO M. Relation between soil forming factors and scaling properties of particle size distributions derived from multifractal analysis in topsoils from Galicia (NW Spain) [J]. *Geoderma*, 2017, 287: 147-156.
- [15] MAO W B, WAN Y S, SUN Y X, et al. Applying dredged sediment improves soil salinity environment and winter wheat production [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2018, 49(14): 1787-1794.
- [16] LAL R. World soils and global issues [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 97(1): 1-4.
- [17] AJMONE-MARSAN F, BIASIOLI M, KRALJ T, et al. Metals in particle-size fractions of the soils of five European cities [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(1): 73-81.
- [18] SUN K, RO KYOUNG S, GUO M X, et al. Sorption of bisphenol A, 17 α -ethinyl estradiol and phenanthrene by biochars obtained by thermal and hydrothermal methods [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(10): 5757-5763.
- [19] QIN S P, HU C S, HE X H, et al. Soil organic carbon, nutrients and relevant enzyme activities in particle-size fractions under conservation versus traditional agricultural management [J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 45(3): 152-159.
- [20] SHWETHA P, VARIJA K. Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils [J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4(4): 1142-1149.
- [21] 郑乾坤, 毛伟兵, 孙玉霞, 等. 颗粒组成变化对黏质盐土含盐量和小麦生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(11): 88-94.
- [22] 贾利梅, 毛伟兵, 孙玉霞, 等. 不同改良材料对黏质盐土物理性状和棉花产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(13): 81-87.
- [23] LALITA B, MANNA M C, BATRA L. Dehydrogenase activity and microbial biomass carbon in salt-affected soils of semiarid and arid regions [J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1997, 11(3): 295-303.
- [24] 杜金龙, 靳孟贵, 欧阳正平, 等. 焉耆盆地土壤盐剖面特征及其与土壤颗粒组成的关系 [J]. *地球科学*, 2008, 33(1): 131-136.
- [25] 夏江宝, 赵西梅, 赵自国, 等. 不同潜埋埋深下土壤水盐运移特征及其交互效应 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 93-100.
- [26] 田霄鸿, 南雄雄, 赵晓进, 等. 施用硫磺和 ALA 对碱性盐土上作物生长发育及土壤性质的影响 [J]. *生态环境*, 2008, 17(6): 2407-2412.
- [27] 于兵, 门明新, 刘霏珈, 等. 有机酸对重金属污染土壤的淋洗效果 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(13): 284-287.
- [28] YAZDANPANA N, MAHMOODABADI M. Reclamation of calcareous saline-sodic soil using different amendments: time changes of soluble cations in leachate [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6(7): 2519-2528.
- [29] MCNEILL J R, WINIWARTER V. Breaking the sod: Humankind, history, and soil (Review) [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1627-1629.

(责任编辑:张震林)