

火电厂烟气脱硫石膏对重度苏打盐化土饱和导水率的影响

梁 龙¹, 张 强^{2*}, 王 斌², 黄高鉴²

(1.山西大学生物工程学院, 山西 太原 030006; 2.山西省农业科学院农业环境与资源研究所, 山西 太原 030006)

摘 要:以大同盆地重度苏打盐化土为研究对象,采用土柱模拟的方法,研究火电厂烟气脱硫石膏3种用量(15、30、60 t·hm⁻²)下土壤饱和导水率的变化规律,分析了脱硫石膏不同施用量和土壤饱和导水率的关系,旨在为大同盆地苏打盐化土改良提供理论支持和借鉴。结果表明:脱硫石膏对3个土层的土壤的饱和导水率均有提高作用,其中表层土壤(0~10 cm)提高的幅度最大,其次是10~20 cm,20~40 cm 底层土壤提高幅度最小;脱硫石膏对表层(0~10 cm)土壤的饱和导水率提高速率以及效率最高,随着土层深度的增加,脱硫石膏对土壤饱和导水率的提高速率及效率逐渐降低;脱硫石膏的经济用量应为30 t·hm⁻²;重度苏打盐化土饱和导水率与脱硫石膏施用量无显著正相关关系($P>0.05$)。

关键词:脱硫石膏;饱和导水率;重度苏打盐化土

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)02-0169-06

doi: 10.13254/j.jare.2014.0307

Effect of Power Plant Flue Gas Desulfurization Gypsum on Saturated Hydraulic Conductivity of Heavy Soda-Saline Soil Using Lysimeter

LIANG Long¹, ZHANG Qiang^{2*}, WANG Bin², HUANG Gao-jian²

(1.School of Biological Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2.Institute of Agricultural Environment and Resources, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In this paper, we applied soil column simulation method to study the effect of power plant flue gas desulfurization gypsum on saturated hydraulic conductivity of heavy soda-saline soil in the Datong basin of Shanxi Province. The amount of desulfurization gypsum was 15, 30 t·hm⁻² and 60 t·hm⁻². The results showed that different amount of desulphurization gypsum all could significantly improve the saturated hydraulic conductivity of heavy soda-saline soil; especially, the increase of saturated hydraulic conductivity in different soil layers appeared in a descending order as 0~10 cm>10~20 cm>20~40 cm; further, with the depth of the soil layer the rate and efficiency of saturated hydraulic conductivity reduced gradually. There was no significant correlation between the saturated hydraulic conductivity and the application amount of desulphurization gypsum ($P>0.05$). Considering the economic perspective, the best application amount of desulphurization gypsum was 30 t·hm⁻².

Keywords: desulphurization gypsum; saturated hydraulic conductivity; heavy soda-saline soil

脱硫石膏又称烟气脱硫石膏、硫石膏或FGD石膏,是火电厂对含硫燃料(主要是煤)燃烧后产生的烟气进行脱硫净化处理而得到的工业副产石膏。它的主

要成分是二水硫酸钙,由烟气中的SO₂和CaCO₃或CaO发生反应而得到^[1]。利用脱硫石膏改良重度苏打盐化土是内陆盐碱地改良重要措施之一。其原理是利用脱硫石膏溶解后的钙离子代换土壤中的代换性钠离子,降低土壤的碱化度,改良土壤理化性质,达到改良的目的^[2-3]。

土壤饱和导水率是土壤重要的物理性质之一,主要受土壤容重、质地、组成、盐分含量以及水分特征的影响^[4-7]。对于苏打盐化土而言,饱和导水率低是影响其土壤结构和耕性的主要原因之一,提高饱和导水率

收稿日期:2014-11-03

基金项目:山西省构建新型农业社会化服务体系建设项目“饲用草料-畜牧养殖绿色循环经济创新示范园”;山西省农业综合开发项目“大同盆地盐碱地改良技术示范与推广”;山西省科技援疆项目“新疆盐碱土壤综合改良利用技术应用研究”(2014072003)

作者简介:梁 龙(1988—),男,山西太原人,硕士研究生,主要从事盐渍土改良研究。E-mail: 471084752@qq.com

*通信作者:张 强 E-mail: sxsnyts@163.com

是有效淋洗苏打盐化土盐分的基本前提^[8-11]。因此,研究脱硫石膏对盐渍土饱和导水率的影响对探索水盐运移规律,确定盐渍土改良方案具有重要的实际意义。

大同盆地是我国盐渍土集中分布区域之一,土体中富含 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 ,属于典型苏打型盐渍土^[12]。由于含有大量苏打,土壤的结构性很差,通透性很低^[13]。长期以来,我国科研工作者在该区进行了大量的利用脱硫石膏改良盐渍土的研究工作,积累了大量的数据资料。但这些研究多以土壤化学性质为主要研究对象,而对脱硫石膏对土壤饱和导水率特征的影响的相关研究相对较少。本研究选择重度苏打盐化土剖面进行原状土饱和导水率测定,探求脱硫石膏在不同的施用量下随着时间的推移对土壤饱和导水率的影响,以及脱硫石膏施用量与重度苏打盐化土饱和导水率的相关关系,旨在为大同盆地苏打盐化土改良提供理论支持和借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验装置

供试土样取自大同市天镇山西农科院环境与资源研究所盐碱地改良示范基地。采样点选在盐斑上(俗称光板地)。用内径为 25 cm,高为 50 cm 的 PVC

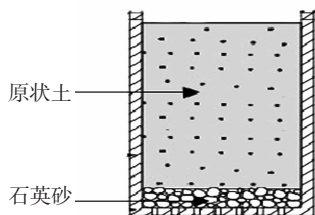


图 1 土柱示意图

Figure 1 Soil-column diagram

管取原状土,取样深度为 40 cm。如图 1 所示。

1.2 试验土壤及材料的理化性状

土壤的基本理化性状见表 1。

实验材料:脱硫石膏来源于大同二电厂,其主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,pH 值为 8.31,全钙占 30.74%,水分含量 4.7%,有机质 1.24%,全氮 0.04%,全磷 0.13%,全钾 0.05%。

1.3 试验方案

试验共设 4 个处理:(1)对照(不施脱硫石膏),(2)脱硫石膏 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, (3)脱硫石膏 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, (4)脱硫石膏 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,设 6 次重复。施用脱硫石膏时为了尽量不破坏原状土壤,使脱硫石膏仅与土柱内 0~5 cm 深的土壤充分混合。将施过脱硫石膏的土柱埋入土中,上方搭 1 个遮雨大棚。用蒸馏水浇灌,使土壤始终保持湿润状态。每隔 1 个月取 1 次土,用环刀分层取样,0~10、10~20、20~40 cm 共 3 层,每层取 3 次重复,共取 3 次土样。

土壤基本理化性质测定:土壤全氮、有机质、有效磷、速效钾和土壤水溶性盐分、阳离子交换量、交换性钠采用常规方法测定^[14];土壤容重采用环刀法;土壤 pH 值采用酸度计测定(土水比为 1:2.5),EC 采用电导仪测定(土水比为 1:5)。

1.4 饱和导水率测定方法

饱和导水率的测定:环刀法——在室外用环刀取原状土样,带回室内浸入水中 24 h。浸水时要保持水面与环刀上口平齐,勿使水淹到环刀上口的土面。在预定时间将环刀取出,除去盖子,在上面套 1 个空环刀,接口处先用胶布封好,再用熔蜡粘合,严防从接口处漏水。然后将接合的环刀放到漏斗上,漏斗下面用 100 mL 烧杯承接。向上面的空环刀中加水,水面比环

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil

指标 index	土层深度 Soil depth/cm			
	0~10	10~20	20~30	30~40
pH 值(1:2.5)	10.12	10.06	10.07	10.03
电导率 EC(1:5)/ $\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$	4.45	2.81	2.13	2.85
碱化度 ESP/%	51.8	48.2	48.0	44.6
阳离子交换量 CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	38.6	25.0	29.0	37.0
有机质 Organic matter content/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.90	3.21	3.29	3.11
全氮 Total N/%	0.019	0.018	0.025	0.026
有效磷 Olsen P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	16.7	15.1	16.8	16.2
速效钾 Available K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	95	92	81	127
容重 Soil bulk density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1.72	1.64	1.59	1.66
10 ℃饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity at 10 ℃/ $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	0.10	0.05	0.07	0.01

刀口低 1 mm,水层厚 5 cm。加水后,自漏斗下面滴下第一滴水时用秒表计时,每隔 10 min 或 20 min 更换漏斗下面的烧杯用 10 mL 量筒计量渗水量。每更换 1 次烧杯,要将上面环刀水面加至原来高度,并用温度计记录水温。直到单位时间内渗水量相等时为止。

饱和导水率:采用达西定律计算,即:

$$K_t = \frac{60 \times Q \times L}{t \times S \times (L + H)} \tag{1}$$

式中: K_t —饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); Q —渗透量(mL); S —渗透横截面积(cm^2); t —渗透时间(min); L —土层厚度(cm); H —水层厚度(cm)。为了消除温度的影响,将测定的饱和导水率换算成 10℃下的饱和导水率,具体换算方法采用哈赞公式进行:

$$K_{10} = \frac{K_t}{0.7 + 0.03T} \tag{2}$$

式中: K_t —某一水温下的饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); K_{10} —10℃时的饱和导水率($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); T —水的温度(℃)。

1.5 数据分析

实验所得数据采用 Excel 2007 进行统计分析。显著性检验、方差分析、回归分析采用 Minitab 16 进行。土壤理化性质参数指标进行相关性或回归分析时,均使用各参数指标的平均值。

2 结果与分析

2.1 土壤饱和和导水率

饱和导水率(本文研究结果的土壤饱和和导水率均是 10℃时的土壤饱和和导水率)随土壤剖面的变化曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,重度苏打盐化土饱和和导水率随土壤剖面深度增加呈“S”型曲线变化:表层土壤的饱和和导水率最高,随着剖面深度的增加,饱和和导水率先降低、再增加、然后再降低。

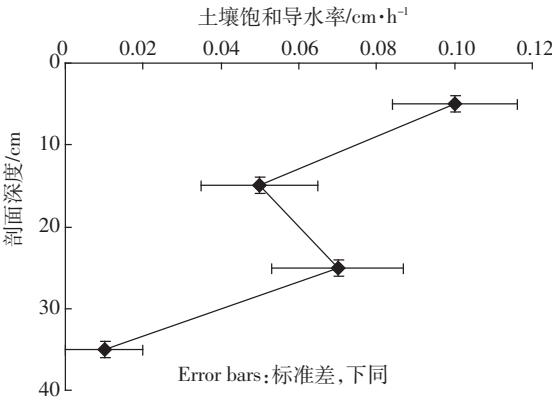


图 2 饱和和导水率随剖面变化

Figure 2 Saturated hydraulic conductivity distribution in profiles of saline-sodic soil

2.2 脱硫石膏对重度苏打盐化土饱和和导水率的影响

脱硫石膏不同的施用量随着时间的推移对重度苏打盐化土表层土 0~10 cm 饱和和导水率的影响如图 3 所示。

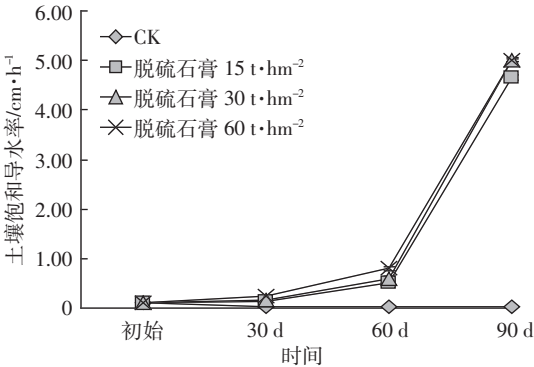


图 3 0~10 cm 饱和和导水率随时间变化

Figure 3 Saturated hydraulic conductivity changing with time in 0~10 cm soil

结果表明,在 0~10 cm 的表层中,施用脱硫石膏 15、30、60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的 3 个处理都大幅度提高了土壤的饱和和导水率,分别提高了 46.5、50.0 倍和 50.1 倍。这说明脱硫石膏对重度苏打盐化土的物理性质有明显的改善作用。施入脱硫石膏 30、60、90 d 后,土壤的饱和和导水率由高到低依次为 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ > 30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ > 15 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,不施脱硫石膏的处理(CK)饱和和导水率呈下降的趋势。这说明用蒸馏水浇灌会降低重度苏打盐化土饱和和导水率。由图 3 可以看出,除 CK 外,3 条折线的斜率在逐渐增大。这说明脱硫石膏对重度苏打盐化土饱和和导水率的提高幅度随时间的延长而增大。

脱硫石膏不同的施用量随着时间的推移对重度苏打盐化土 10~20 cm 土层饱和和导水率的影响如图 4 所示。

结果表明,在 10~20 cm 土层中,施用脱硫石膏的 3 个处理的饱和和导水率都呈现升高的趋势。脱硫石膏施用量由低到高饱和和导水率分别增加了 1.6、5.5 倍和 3.0 倍。施入脱硫石膏 30、60、90 d 后,土壤的饱和和导水率由高到低依次为 30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ > 60 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ > 15 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$,不施脱硫石膏的处理(CK)饱和和导水率仍然呈下降趋势。这说明脱硫石膏对 10~20 cm 土层的饱和和导水率也起到了提高的作用,但提高的幅度没有 0~10 cm 土层大。

脱硫石膏不同的施用量随着时间的推移对重度苏打盐化土 20~40 cm 土层饱和和导水率的影响如图 5 所示。

结果表明,在 20~40 cm 底层中,施用脱硫石膏的 3 个处理饱和和导水率表现为先升高后下降的趋势,并

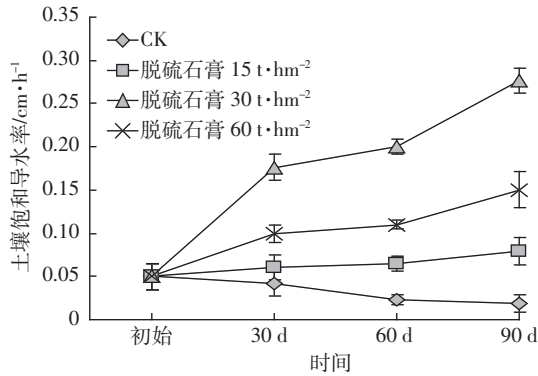


图 4 10~20 cm 饱和导水率随时间变化
Figure 4 Saturated hydraulic conductivity changing with time in 10~20 cm soil

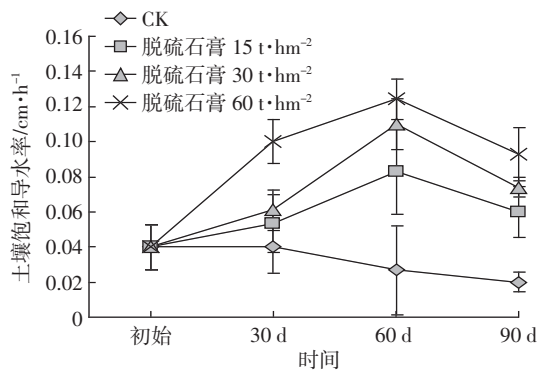


图 5 20~40 cm 饱和导水率随时间变化
Figure 5 Saturated hydraulic conductivity changing with time in 20~40 cm soil

在 90 d 的时候出现下降,但整体表现为上升趋势。施入脱硫石膏 30、60、90 d 后,土壤的饱和导水率由高到低依次为 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > 30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} > 15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,这说明脱硫石膏对 20~40 cm 的底层土壤的饱和导水率也有一

定的提高作用。不施脱硫石膏的处理(CK)饱和导水率仍然呈下降趋势。

脱硫石膏对重度苏打盐化土饱和导水率影响的统计分析结果见表 2。

从表 2 中可以看出,在 0~10 cm 土层中,在施入脱硫石膏 30 d 的时候,施用量为 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的饱和导水率差异不显著;在施入脱硫石膏 90 d 的时候,施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的饱和导水率差异不显著。在 10~20 cm 土层中,在施入脱硫石膏 30 d 的时候,施用量为 0(CK)和 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的饱和导水率差异不显著。在 20~40 cm 土层中,在施入脱硫石膏 30 d 的时候,施用量为 0(CK)、 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的饱和导水率差异不显著;在施入脱硫石膏 60 d 的时候,施用量为 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的饱和导水率差异不显著,施用量为 0(CK)和 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的饱和导水率差异不显著;在施入脱硫石膏 90 d 的时候,施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的饱和导水率差异不显著,施用量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的饱和导水率差异不显著。这说明脱硫石膏对表层土壤的饱和导水率提高速率以及效率最高,随着土层深度的增加速率以及幅度逐渐降低;当施用量超过 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,饱和导水率之间差异不显著,所以脱硫石膏的经济用量应当为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

重度苏打盐化土饱和导水率与脱硫石膏施用量之间的关系如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,重度苏打盐化土饱和导水率与脱硫石膏施用量只有在表层 0~10 cm 与底层 20~40 cm 土层中刚施入 30 d 时呈显著正相关关系 ($P <$

表 2 脱硫石膏对重度苏打盐化土饱和导水率的影响

Table 2 Effects of desulphurization gypsum on saturated hydraulic conductivity of heavy soda-saline soil

土层深度 /cm	脱硫石膏 / $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	饱和导水率 / $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$		
		30 d	60 d	90 d
0~10	0	$0.04 \pm 0.012 \text{ 3 c}$	$0.02 \pm 0.005 \text{ 8 d}$	$0.02 \pm 0.003 \text{ 3 c}$
	15	$0.14 \pm 0.012 \text{ 2 b}$	$0.52 \pm 0.036 \text{ 1 c}$	$4.60 \pm 0.050 \text{ 3 b}$
	30	$0.15 \pm 0.005 \text{ 8 b}$	$0.63 \pm 0.045 \text{ 1 b}$	$5.00 \pm 0.020 \text{ 0 a}$
	60	$0.24 \pm 0.015 \text{ 3 a}$	$0.82 \pm 0.037 \text{ 9 a}$	$5.05 \pm 0.040 \text{ 4 a}$
10~20	0	$0.04 \pm 0.015 \text{ 3 c}$	$0.02 \pm 0.005 \text{ 8 d}$	$0.02 \pm 0.010 \text{ 0 d}$
	15	$0.06 \pm 0.014 \text{ 6 c}$	$0.07 \pm 0.008 \text{ 8 c}$	$0.08 \pm 0.015 \text{ 2 c}$
	30	$0.18 \pm 0.015 \text{ 1 a}$	$0.21 \pm 0.008 \text{ 5 a}$	$0.28 \pm 0.014 \text{ 3 a}$
	60	$0.11 \pm 0.010 \text{ 0 b}$	$0.12 \pm 0.005 \text{ 1 b}$	$0.16 \pm 0.020 \text{ 8 b}$
20~40	0	$0.04 \pm 0.015 \text{ 2 b}$	$0.03 \pm 0.025 \text{ 2 b}$	$0.02 \pm 0.005 \text{ 8 c}$
	15	$0.05 \pm 0.016 \text{ 3 b}$	$0.08 \pm 0.024 \text{ 3 ab}$	$0.06 \pm 0.014 \text{ 6 b}$
	30	$0.06 \pm 0.011 \text{ 5 b}$	$0.11 \pm 0.014 \text{ 7 a}$	$0.07 \pm 0.005 \text{ 7 ab}$
	60	$0.10 \pm 0.012 \text{ 3 a}$	$0.12 \pm 0.011 \text{ 5 a}$	$0.09 \pm 0.015 \text{ 2 a}$

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 重度苏打盐化土饱和导水率与脱硫石膏施用量之间的关系
Table 3 The relationship between saturated hydraulic conductivity of heavy soda-saline soil and application amount of desulphurization gypsum

土层深度 / cm	30 d		60 d		90 d	
	相关系数	<i>P</i>	相关系数	<i>P</i>	相关系数	<i>P</i>
0~10	0.952	0.048	0.908	0.092	0.722	0.278
10~20	0.494	0.506	0.536	0.464	0.553	0.447
20~40	0.986	0.014	0.898	0.102	0.932	0.068

0.05)。回归分析表明,二者可进行一次函数关系拟合。0~10 cm 土层 30 d 土壤饱和导水率(y_1)与脱硫石膏施用量(x)的回归方程为:

$$y_1=0.000\ 046x+0.063\ 9\ (R^2=0.91,P<0.05)\ (3)$$

20~40 cm 土层 30 d 土壤饱和导水率(y_2)与脱硫石膏施用量(x)的回归方程为:

$$y_2=0.000\ 015x+0.037\ 6\ (R^2=0.97,P<0.05)\ (4)$$

3 讨论

脱硫石膏在施入 0~10 cm 表层土壤中,浇水后,脱硫石膏发生溶解,溶解在水中的 Ca^{2+} 与土体中的交换性钠发生代换作用,使交换性钠变为水溶性钠,并以 Na_2SO_4 的形式随水向下淋溶,最终排出土体,从而降低了土壤中 Na^{+} 的浓度,而过量 Na^{+} 的存在会引发粘粒高度分散^[15-17],从而堵塞土壤孔隙^[15],导致土壤导水性降低^[18-19]。另一方面,粘粒的凝絮作用与土壤溶液的电导率有关,具有较高电导率的土壤溶液能促进粘粒的凝絮作用,增强土壤团聚体的稳定性,从而提高土壤的饱和导水率^[20-21],而脱硫石膏溶解之后会提高土壤溶液的电导率。因此,脱硫石膏可以有效地提高苏打盐化土的饱和导水率,这与 Oster 等^[22]和 Armstrong 等^[23]的研究结果相一致。

由于供试土壤的饱和导水率本身就很低,在 $0.01\sim0.1\text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间,因此会影响脱硫石膏向下的淋溶。在 0~10 cm 的表层土壤中,脱硫石膏与土壤的接触时间越长,被交换到土壤溶液中的 Na^{+} 越充分,土壤胶体上可交换性钠越少。因此,重度苏打盐化土饱和导水率的提高幅度随脱硫石膏与土壤接触时间的延长而增大,这与王晓颖^[24]的研究结果相一致。对于 10~20 cm 的土层,由于没有与脱硫石膏接触,而是通过溶解在水中的未与表层土壤发生交换作用的脱硫石膏随水向下淋溶而获得 Ca^{2+} ,从而与土壤胶体表面的 Na^{+} 发生交换。因此,该土层的饱和导水率除了受到本身土壤胶体表面的 Na^{+} 数量的影响外,还受表层土壤胶体表面的 Na^{+} 数量和饱和导水率的影响。另

外,表层土壤中由于交换作用产生的大量水溶性 Na^{+} 也会随水一起向下淋溶,使 10~20 cm 土层土壤溶液中的 Na^{+} 浓度增加,从而减弱 Ca^{2+} 与土壤胶体表面 Na^{+} 的交换作用^[13]。所以,10~20 cm 土层土壤饱和导水率的变化是相对复杂的,不具有表层土壤饱和导水率的变化规律,并且其饱和导水率的提高速率以及效率低于表层(0~10 cm)土壤。对于 20~40 cm 土层土壤饱和导水率,要受到本身土壤、表层土壤以及 10~20 cm 土层土壤的影响,其饱和导水率的提高速率以及效率最低。这与赵锦慧^[25]的研究结果相一致。

土壤胶体表面 Na^{+} 的数量在一定体积的土体中是有限的,当脱硫石膏中的 Ca^{2+} 与土壤胶体表面 Na^{+} 的交换作用达到某一平衡之后,再增加脱硫石膏的用量,此平衡不会发生太大变化^[13]。因此,土壤饱和导水率不会随着脱硫石膏施用量的增加而无限增加,当增加到某一值时速率会变慢甚至不再增加,此时脱硫石膏的用量即为经济用量。所以土壤饱和导水率与脱硫石膏施用量无显著正相关关系。至于在 0~10 cm 和 20~40 cm 土层 30 d 时呈显著正相关关系,那是因为脱硫石膏与土壤胶体的交换作用要达到某一平衡需要一定的时间,在此时间会呈现出一次函数显著正相关关系。

对于不施脱硫石膏只用蒸馏水浇灌的处理(CK),土壤饱和导水率随时间的推移逐渐降低,这是由于用蒸馏水浇灌会降低土壤溶液浓度,而土壤饱和导水率随着土壤溶液浓度的降低而减小^[26]。对于在 20~40 cm 土层中土壤饱和导水率在第 90 d 时出现回落,是由于供试土壤在 40 cm 处有一层大约 2 cm 厚的粘化层,几乎不透水(饱和导水率 $<0.01\text{ cm}\cdot\text{h}^{-1}$),使土壤排水不畅,大量代换出的 Na^{+} 在底层不能够及时排出土体而越积越多,导致土壤饱和导水率降低^[15-19]。

本实验结论通过大棚土柱模拟实验得出的。在田间实际条件下脱硫石膏对重度苏打盐化土饱和导水率的影响需要长期观测与研究。

4 结论

在本实验条件下,脱硫石膏对重度苏打盐化土饱和导水率无论在 0~10 cm 的表层中还是在 10~20 cm 土层以及 20~40 cm 底层中都有显著的提高作用;表层土壤的饱和导水率提高幅度、速率以及效率最大,随着土层深度的增加饱和导水率提高的幅度、速率以及效率逐渐减小;土壤饱和导水率不会随脱硫石膏施用量的增加而一直增大,脱硫石膏的经济用量应当为 30

$t \cdot \text{hm}^{-2}$, 这对大同盆地重度苏打盐化土改良有重要意义。根据该地区盐碱土的实际情况, 通过施用脱硫石膏以及合理的栽培与耕作措施, 配合合理的灌溉, 可以有效地提高土壤的饱和导水率, 实现盐碱土改良目标。

参考文献:

- [1] 杜敏娟, 舒文勃, 杨娜娜, 等. 脱硫石膏改良土壤的研究进展[J]. 天津化工, 2011, 25(1): 7-9.
DU Min-juan, SHU Wen-bo, YANG Na-na, et al. The research progress of desulfurization gypsum soil improvement[J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2011, 25(1): 7-9. (in Chinese)
- [2] 王英, 段鹏选, 张晔. 烟气脱硫石膏的基本性能研究[J]. 中国水泥, 2009(1): 60-63.
WANG Ying, DUAN Peng-xuan, ZHANG Ye. The basic properties of the flue gas desulfurization gypsum[J]. *China Cement*, 2009(1): 60-63. (in Chinese)
- [3] 吴宏宇, 张宏武, 胡春元, 等. 河套灌区盐碱地综合治理[J]. 内蒙古林业调查设计, 2010, 33(1): 44-47.
WU Hong-yu, ZHANG Hong-wu, HU Chun-yuan, et al. Hetao irrigation area saline-alkali land comprehensive treatment[J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2010, 33(1): 44-47. (in Chinese)
- [4] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和水分运动参数的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 154-155.
LÜ Dian-qing, SHAO Ming-an, LIU Chun-ping. Effect of bulk density on soil saturated water movement parameters[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(3): 154-155. (in Chinese)
- [5] 周蓓蓓, 邵明安. 土石混合介质饱和导水率的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 62-66.
ZHOU Bei-bei, SHAO Ming-an. Study on saturated hydraulic conductivity of soil stone mixtures[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 62-66. (in Chinese)
- [6] 胡伟, 邵明安, 王全九, 等. 取样尺度对土壤饱和导水率测定结果的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(6): 1041-1044.
HU Wei, SHAO Ming-an, WNAG Quan-jiu, et al. Effects of sampling size on measurements of soil saturated hydraulic conductivity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 1041-1044. (in Chinese)
- [7] 迟春明, 王志春. 碱化盐土饱和导水率特征与影响因素研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 601-607.
CHI Chun-ming, WANG Zhi-chun. Saturated hydraulic conductivity and its influence factors of saline-alkali soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(3): 601-607. (in Chinese)
- [8] Fares A, Alva A K, Nkedi-Kizza P, et al. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and Guelph permeameter[J]. *Soil Science*, 2000, 165(10): 768-777.
- [9] Quirk J P, Schofield R K. The effect of electrolyte concentration on soil permeability[J]. *The Journal of Soil Science*, 1955, 6(2): 163-178.
- [10] McIntyre D S. Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1979, 17: 115-120.
- [11] Ilyas M, Qureshi R H, Qadir M A. Chemical changes in a saline-sodic soil after gypsum application and cropping[J]. *Soil Technology*, 1997, 10: 247-260.
- [12] 俞仁培, 陈德明. 我国盐渍土资源及其开发利用[J]. 土壤通报, 1999, 30(4): 158-159.
YU Ren-pei, CHEN De-ming. The saline soil resources and utilization in our country[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1999, 30(4): 158-159. (in Chinese)
- [13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010: 163-164, 177-178.
HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010: 163-164, 177-178. (in Chinese)
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 152-200.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 152-200. (in Chinese)
- [15] Frenkel H, Goertzen J O, Rhoades J D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42: 32-39.
- [16] Hardy N. The effect of water quality and storm sequence upon infiltration rate and crust formation[J]. *The Journal of Soil Science*, 1983, 34: 665-676.
- [17] Bauder J W, Brock T A. Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching[J]. *Arid land Research and Management*, 2001, 15: 101-113.
- [18] Levy G J, Rosenthal A, Tarchitzky J, et al. Soil hydraulic conductivity changes caused by irrigation with reclaimed waste water[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28: 1658-1664.
- [19] 李小刚, 曹靖, 李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(1): 64-72.
LI Xiao-gang, CAO Jing, LI Feng-min. Influence of salinity, sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(1): 64-72. (in Chinese)
- [20] Rengasamy P, Greene R S B, Ford G W, et al. Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1984, 22: 413-431.
- [21] Quirk J P. The significance of the threshold and turbidity concentrations in relation to sodicity and microstructure[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2001, 39(6): 1185-1217.
- [22] Oster J D. Gypsum usage in irrigated agriculture: a review[J]. *Fer Res*, 1982(3): 73-89.
- [23] Armstrong A S B, Tanton T W. Gypsum applications to aggregated saline-sodic clay topsoils[J]. *J Soil Sci*, 1992, 43: 249-260.
- [24] 王晓颖. 滨海吹填土作为绿化基质障碍特征及调控机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
WANG Xiao-ying. The research on handicap characteristics and regulation mechanism for dredger fill as the growing media[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [25] 赵锦慧. 对石膏改良碱化土壤过程中发生的化学过程和物理过程的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2001.
ZHAO Jin-hui. The study of the physical and chemical processes in improvement of alkaline soil with gypsum[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2001. (in Chinese)
- [26] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 224-225.
LI Fa-hu. Physical and chemistry of soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 224-225. (in Chinese)