



**水基废弃钻井泥浆对粗质地土壤物理性质和甜菜生长的影响**

王茜, 朱志梅, 樊继铭, 张鹏, 付威, 翟文晰, 郝明德, 樊军

引用本文:

王茜, 朱志梅, 樊继铭, 等. 水基废弃钻井泥浆对粗质地土壤物理性质和甜菜生长的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(3): 422–430.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0261>

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

**3种改良剂对滨海盐碱地土壤理化性状及玉米生长的影响**

王德领, 诸葛玉平, 杨全刚, 娄燕宏, 张行, 王会, 潘红

*农业资源与环境学报*. 2021, 38(1): 20–27 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0143>

**两种生物炭对污染土壤铜有效性的影响**

王晓琦, 唐琦, 黄一帆, 林丽娜, 邹洪涛, 宋正国

*农业资源与环境学报*. 2016, 33(4): 361–368 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0123>

**生物炭不同施加方式对水稻生长及产量的影响**

王悦满, 高倩, 薛利红, 杨林章, 李辉信, 冯彦房

*农业资源与环境学报*. 2018, 35(1): 58–65 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0162>

**接种AM真菌对不同盐度土壤中向日葵生长的影响**

周昕南, 杨亮, 许静, 王亚男, 杨久扬, 郝利君, 刁风伟, 郭伟

*农业资源与环境学报*. 2020, 37(5): 744–752 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0184>

**除草剂残留下生物炭对甜菜生长的影响**

李玉梅, 宋柏权, 刘峥宇, 王根林, 魏丹, 金梁, 张磊

*农业资源与环境学报*. 2015(3): 269–274 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0366>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王茜, 朱志梅, 樊继铭, 等. 水基废弃钻井泥浆对粗质地土壤物理性质和甜菜生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 422-430.

WANG Xi, ZHU Zhi-mei, FAN Ji-ming, et al. Effects of water-based waste drilling mud on soil physical properties and sugar beet growth [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 422-430.



开放科学 OSID

# 水基废弃钻井泥浆对粗质地土壤物理性质和甜菜生长的影响

王茜<sup>2</sup>, 朱志梅<sup>2</sup>, 樊继铭<sup>3</sup>, 张鹏<sup>3</sup>, 付威<sup>1</sup>, 翟文晰<sup>1</sup>, 郝明德<sup>1</sup>, 樊军<sup>1\*</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 3. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第六采气厂, 陕西 延安 727300)

**摘要:**为探讨水基废弃钻井泥浆作为粗质地土壤改良剂的可能性,研究施加不同量水基废弃钻井泥浆对土壤基本物理性质和作物生长的影响,利用室内甜菜盆栽试验,分别在沙黄土和黄绵土中添加2%、4%、8%、12%(干基)含量的水基废弃钻井泥浆,为缓解添加水基废弃钻井泥浆可能引发的土壤pH值过高问题,补充添加石膏处理,试验分为对照组、泥浆组和泥浆+石膏组。结果表明,不添加石膏情况下,两种土壤施加不同含量的废弃泥浆均没有导致土壤盐碱化,且黏粒相对含量增加,蒸散量减少。添加石膏后pH降低,盐分含量显著升高,阻碍了作物生长。从作物生长来看,两种土壤施加8%含量废弃泥浆对甜菜生长促进效果最佳,种植40 d后,沙黄土甜菜株高比对应的对照处理增加了41.59%,叶面积增加了2.43倍,生物量增加了3.54倍,叶片SPAD值增加了58.18%;黄绵土甜菜株高比对应的对照处理增加了1.75%,叶面积增加了32.03%,生物量增加了14.59%,叶片SPAD值增加了27.65%。研究表明,一定含量的废弃泥浆对于粗质地土壤改良和作物生长有促进作用,研究结果对油气田水基钻井废弃物就地利用和开采区粗质地土壤改良具有一定的借鉴意义。

**关键词:**钻井泥浆;黏粒;石膏;土壤;甜菜生物量

中图分类号:S152;S566.3 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)03-0422-09 doi: 10.13254/j.jare.2020.0261

## Effects of water-based waste drilling mud on soil physical properties and sugar beet growth

WANG Xi<sup>2</sup>, ZHU Zhi-mei<sup>2</sup>, FAN Ji-ming<sup>3</sup>, ZHANG Peng<sup>3</sup>, FU Wei<sup>1</sup>, ZHAI Wen-xi<sup>1</sup>, HAO Ming-de<sup>1</sup>, FAN Jun<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. School of City and Environment, Northwestern University, Xi'an 710127, China; 3. No.6 Gas Production Plant of Changqing Oilfield Branch of PetroChina Co., Ltd., Yan'an 727300, China)

**Abstract:** The effects of water-based waste drilling mud on soil physical properties and crop growth were studied. An indoor pot experiment was used to add 2%, 4%, 8%, and 12% (dry matter basis) water-based waste drilling mud into both sandy and loam loess. To alleviate the increase in soil pH caused by the addition of water-based drilling waste mud, the pot experiments were supplemented with a gypsum treatment. The experiment was divided into a control group, the mud group, and the mud+gypsum group. A crop of sugar beet was planted. Results showed that the application of different amounts of waste mud to the two types of soil did not lead to salinization in the absence of gypsum, and that the clay content increased while plant evapotranspiration decreased. Adding gypsum decreased soil pH but increased soil salt content significantly and prevented crop growth. In terms of the latter, pots containing soil with the 8% waste mud content saw the best sugar beet growth in both types of soils. After 40 days, the height of the sugar beet plants increased by 41.59%, their

收稿日期:2020-05-17 录用日期:2020-07-07

作者简介:王茜(1995—),女,山西运城人,硕士研究生,主要从事土壤修复研究。E-mail:ccwang0505@163.com

\*通信作者:樊军 E-mail:fanjun@ms.iswc.ac.cn

基金项目:陕西省重点研发项目(2020NY158);中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第六采气厂委托项目(2019CQ6F122)

Project supported: The Key Research and Development Projects of Shaanxi Province(2020NY158); Program from PCOC(2019CQ6F122)

leaf area increased 2.43 times, their biomass increased 3.54 times, and their leaf SPAD value increased by 58.18% in sandy loess. In loam loess, the plant height, leaf area, biomass, and SPAD of the leaves increased by 1.75%, 32.03%, 14.59%, and 27.65% respectively. A certain amount of waste mud has a positive effect on the soil physical properties, and thus the growth of crops. The results indicate that water-based drilling waste from the oil and gas industry could be used on-site to improve coarse soils and decrease the cost of waste drilling mud.

**Keywords:** drilling mud; clay; gypsum; soil; beet biomass

钻井泥浆是石油、天然气开采过程中的主要废弃物之一,类似于胶体状态,含有大量聚丙烯酰胺和膨润土、腐植酸钾等物质<sup>[1]</sup>,具有悬浮钻渣、防止塌孔、平衡地层压力、冷却和润滑钻头钻柱、清洗井底、传递动力等作用<sup>[2]</sup>。长庆油田开采区主要位于陕甘宁盆地,地表土壤黏粒含量少、结构性差,土壤有机质含量少、肥力低<sup>[3]</sup>;该区域为干旱与半旱区,年降水量少且季节性分布不均,水土流失严重、生态环境脆弱,不利于作物生长和植被恢复,是典型的农牧交错带和生态脆弱区。长庆油田作为我国第一大油气田,每年产生约600万m<sup>3</sup>水基废弃钻井泥浆,主要采用固化泥浆池和集中不落地处理法,一定程度降低了环境污染风险。但是国内外对泥浆池法长期处理效益及影响研究较少,而集中不落地处理增加了运输中的污染和费用。因此,需要探寻更环保、经济的处理方式。

寻找水基废弃钻井泥浆的绿色、经济处理方式,并结合区域的水文地质特征,实现水基废弃钻井泥浆无害化、资源化利用,可以促进井场及周边生态环境的恢复。国内外有关学者针对废弃泥浆处理方式进行了大量研究,其处理方式主要包括物理处理、化学处理、生物修复和抛洒到土壤就地利用,以及多种处理方式的联合使用<sup>[4]</sup>。其中,生物修复和土地抛洒的复合使用,具有安全高效、绿色经济的特点<sup>[5]</sup>。前人研究结果表明,废弃钻井泥浆含有大量有机物质和养分元素,具备改善土壤理化性质的潜力<sup>[6-8]</sup>。泥浆中的有机物一定程度被截留在土壤表面<sup>[9]</sup>,另外,植物根系分泌物和土壤微生物能够分解泥浆中的有机污染物<sup>[10]</sup>,降低重金属离子危害,且较低含量的有机物可以促进作物幼苗生长<sup>[11]</sup>。

本研究将水基废弃钻井泥浆作为土壤添加剂,研究添加不同比例泥浆对沙黄土和黄绵土pH值、盐分、颗粒组成、植物生长状况等的影响,研判水基废弃钻井泥浆作为粗质地土壤改良剂使用的可能性,为实现废弃物资源化利用、降低泥浆处理成本、改善开采区土壤物理性质、促进当地植被恢复提供理论基础与技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验所用水基废弃钻井泥浆来源于陕甘宁盆地,油井属于长庆油田,选用无害化处理后未进行固化的固液相混合泥浆。表1、表2为供试土壤和泥浆基本性质,泥浆中的重金属含量符合《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)(pH>7.5)基本要求。

供试土壤选用陕西省靖边县井场附近区域的粗质地沙黄土和取自陕西省神木市的黄绵土,土壤黏粒含量分别为9.09%、13.02%。土壤风干后过2 mm筛供试验使用。试验所用石膏来自山西省曲沃县山河石膏粉厂。选择直径为16 cm、高15.5 cm的圆柱形漏底PVC材质盆栽容器。基肥中N含量2.12 g·kg<sup>-1</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量1.03 g·kg<sup>-1</sup>、K<sub>2</sub>O含量1.78 g·kg<sup>-1</sup>。供试作物

表1 试验土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the testing soil

指标 Index	沙黄土 Sandy loess	黄绵土 Loam loess	指标 Index	沙黄土 Sandy loess	黄绵土 Loam loess
砂粒/%	81.25	70.26	含盐量/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.17	1.06
粉粒/%	9.66	16.72	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	6.68	9.13
黏粒/%	9.09	13.02	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	83.50	180.03
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.61	1.48	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	15.40	50.23
pH	8.04	8.13	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	22.96	19.40

表2 试验水基废弃钻井泥浆基本性质

Table 2 Basic properties of water-based waste drilling mud

指标 Index	含量 Content	指标 Index	含量 Content
砂粒/%	10.26	汞/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.03
粉粒/%	36.61	砷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	2.91
黏粒/%	53.13	铅/(mg·kg <sup>-1</sup> )	19.90
pH	8.37	铬/(mg·kg <sup>-1</sup> )	88.10
含盐量/(g·kg <sup>-1</sup> )	6.01	镉/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.27
阳离子交换量/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	27.90	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.90
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	117.20	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.10

为耐盐碱、耐干旱的藜科作物——甜菜,品种为欧洲Beetroot红甜菜。

### 1.2 试验方法

未经固化处理的水基废弃钻井泥浆 pH=8.31, 固化后 pH=10.10, 为防止泥浆施入土壤后 pH 升高影响作物生长, 添加石膏进行调节。鉴于水基废弃钻井泥浆的复杂性和多变性, 采用试验法确定石膏添加量, 添加含量(石膏与泥浆固相百分比)见表3, 将自然风干固化后的泥浆破碎, 过 2 mm 筛。采用 5:1 水土比, 制备土壤浸出液, 用电极法测定 pH 值。石膏最适合、经济的添加量为 3%, pH 值较稳定, 适合作物生长。

试验于 2019 年 9—11 月在陕西省杨凌示范区的西北农林科技大学水土保持研究所试验场(34°28' N, 108°07' E)进行。试验前用 105 °C 烘干法测定供试土壤和泥浆含水率, 分别为沙黄土 1%、黄绵土 1%、泥浆 224%。设计 2%、4%、8%、12% 四个泥浆含量, 依据含水率换算成湿基泥浆含量。每种土壤 9 个处理, 每个处理重复四次, 分为对照组、泥浆组和泥浆+石膏

组, 共计 72 个土柱(表 4)。

选择均匀饱满的甜菜种子, 在水中浸泡 12 h 后播种, 每盆 10 粒。播种 10 d 后, 间苗, 每盆留长势均匀甜菜 5 株, 并开始进行水分控制, 用称质量法将含水率控制在 10%~13%, 试验做遮雨处理。间苗后第 20 d(DAY20)和第 40 d(DAY40)分别选择长势均匀的甜菜, 每盆收获两株, 测定甜菜生物指标, 观测动态生长变化。

### 1.3 测定指标

用 5:1 水土比制备土壤浸出液, pH 值采用电极法(酸度计为雷磁 PHSJ-4F)测定, 电导率(EC)用电导率仪(雷磁 DDB-303A)测定, 测定对象为泥浆、土壤材料以及所有处理土样。颗粒组成用激光粒度仪(马尔文 MS2000 型)测定: 取待测土样 5 g, 加入蒸馏水和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 去除有机质, 再加入盐酸去除 CaCO<sub>3</sub>, 至没有气泡, 加入分散剂, 测定。蒸散量为第 1 d 上午 7:00 测定的质量减去第 2 d 上午 7:00 测定的质量, 即 24 h 蒸散量, 质量测定用精度为 1 g 的台秤(梅特勒托利多,

表 3 石膏含量对 pH 值的影响  
Table 3 Effects of gypsum content on pH value

石膏含量 Gypsum content	0	1%	2%	3%	4%	5%	10%	20%	30%
pH	10.11	9.50	9.03	8.50	8.70	8.51	8.70	8.62	8.80

表 4 试验处理  
Table 4 Experimental treatments

土壤类型 Soil type	分组 Group	处理 Treatment	说明 Detail		
沙黄土	对照组 1	CK1	沙黄土 2.50 kg		
		泥浆组 1(SM)	SM2	沙黄土 2.50 kg+泥浆 0.05 kg	
			SM4	沙黄土 2.50 kg+泥浆 0.10 kg	
			SM8	沙黄土 2.50 kg+泥浆 0.20 kg	
			SM12	沙黄土 2.50 kg+泥浆 0.30 kg	
			泥浆+石膏组 1(SM+)	SM2+	沙黄土 2.50 kg+泥浆 0.05 kg+石膏 1.50 g
	SM4+	沙黄土 2.50 kg+泥浆 0.10 kg+石膏 3.00 g			
	SM8+	沙黄土 2.50 kg+泥浆 0.20 kg+石膏 6.00 g			
	SM12+	沙黄土 2.50 kg+泥浆 0.30 kg+石膏 9.00 g			
	黄绵土	对照组 2		CK2	黄绵土 2.50 kg
				泥浆组 2(LM)	LM2
			LM4		黄绵土 2.50 kg+泥浆 0.10 kg
LM8			黄绵土 2.50 kg+泥浆 0.20 kg		
LM12			黄绵土 2.50 kg+泥浆 0.30 kg		
泥浆+石膏组 2(LM+)			LM2+		黄绵土 2.50 kg+泥浆 0.05 kg+石膏 1.50 g
	LM4+	黄绵土 2.50 kg+泥浆 0.10 kg+石膏 3.00 g			
	LM8+	黄绵土 2.50 kg+泥浆 0.20 kg+石膏 6.00 g			
	LM12+	黄绵土 2.50 kg+泥浆 0.30 kg+石膏 9.00 g			

注:表中泥浆为干基泥浆含量。

Note: The mud content in the table is calculated based on dry matter basis.

ICS241), 试验随机选择测量了8次日均蒸散量。

株高于收获后测定,为子叶柄基部至整个植株的最高处。叶面积于收获后测定,用叶片扫描仪(美国LI-COR LI-3000A)扫描甜菜所有叶片。叶绿素于收获前用叶绿素仪(Konic Minolta SPAD502)测定,每盆选取两株长势均匀的甜菜,每株选择两片均匀叶片。生物量于收获后测定,先称植株鲜质量,烘箱中105℃杀青30 min,再75℃烘干至恒质量后称量。

#### 1.4 数据分析

采用Excel 2019进行数据整理和计算,采用Excel 2019和Origin 9.0作图,使用SPSS 25.0对各项指标进行单因素方差分析,并用邓肯检验进行多重比较,显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 添加泥浆对土壤性质的影响

#### 2.1.1 pH值与EC值

pH值、EC值可以表示土壤盐碱化程度,施入泥浆后两种土壤pH值、EC值有相同变化趋势(表5)。随着泥浆含量增加,泥浆组(SM2、SM4、SM8、SM12和LM2、LM4、LM8、LM12)的pH值均呈现缓慢增长趋势,与对照差异均达到显著水平( $P<0.05$ )。相对应的泥浆+石膏组的pH值有所下降,泥浆+石膏组1中各处理(SM2+、SM4+、SM8+、SM12+,下同)与CK1相比,pH值分别降低了0.17、0.19、0.17、0.27个单位,其中SM4+、SM12+与CK1差异达到显著水平( $P<0.05$ );泥浆+石膏组2中各处理(LM2+、LM4+、LM8+、LM12+,下同)与CK2相比,pH值分别降低了0.06、0.13、0.11、0.16个单位,其中LM12+与CK2差异达到显著水平( $P<0.05$ )。

随着加入泥浆量增加,泥浆组的EC值呈增加趋势,除SM2处理外,其余处理与对照差异均达到显著水平( $P<0.05$ )。加入石膏使得EC值显著升高,泥浆+石膏组1各处理比CK1分别增加了82.35%、1.94倍、4.82倍、7.35倍,泥浆+石膏组2比CK2增加了77.27%、1.68倍、3.86倍、5.55倍。添加石膏使土壤pH值降低,使EC值显著上升,但没有改变土壤盐碱化程度。

#### 2.1.2 土壤颗粒组成

泥浆含量影响土壤中黏粒、砂粒的相对含量,随着泥浆含量增加,土壤中黏粒相对含量增加,砂粒相对含量减少(图1)。泥浆组1和泥浆+石膏组1中,黏粒、砂粒相对含量与CK1差异均达到显著水平( $P<0.05$ ),其中SM12变化最为显著,与CK1相比黏粒、粉粒相对含量分别增加了5.73、2.57个百分点,砂粒相对减少了8.30个百分点。泥浆组2和泥浆+石膏组2中,LM12+变化最显著,与CK2相比,黏粒、粉粒相对含量分别增加了4.01、3.18个百分点,砂粒相对减少了7.19个百分点。

#### 2.1.3 蒸散量

日均蒸散量随着泥浆含量增加,呈现降低趋势(图2)。相同量泥浆条件下,泥浆组和对应的泥浆+石膏组之间蒸散量差异不显著。测量日期中,10月1日(13~22℃,小雨)蒸散量与对照组差异最大,沙黄土中,所有处理与CK1差异均达到显著水平,SM12+处理蒸散量最低,比CK1降低了43.34%;黄绵土中,除LM2、LM2+外,其余处理与CK2差异均显著,LM12最低,比CK2降低了62.50%。10月10日(12~20℃,小雨)各处理蒸散量差异最小,沙黄土中,SM12+处理蒸散量最低,比CK1降低了40.83%,达到显著水平;黄绵土中,最低值出现在LM12+处理,比CK2降低了

表5 不同含量泥浆对土壤pH值和EC值的影响

Table 5 Effects of mud on soil pH and EC

处理 Treatment	pH	EC/(dS·m <sup>-1</sup> )	处理 Treatment	pH	EC/(dS·m <sup>-1</sup> )
CK1	8.03±0.07d	0.17±0.02f	CK2	8.13±0.09c	0.22±0.03e
SM2	8.30±0.07c	0.22±0.01f	LM2	8.35±0.07b	0.34±0.02d
SM4	8.31±0.08c	0.30±0.01e	LM4	8.40±0.08b	0.36±0.03d
SM8	8.54±0.10b	0.44±0.05d	LM8	8.43±0.03ab	0.58±0.04c
SM12	8.68±0.07a	0.54±0.04c	LM12	8.54±0.06a	0.64±0.08c
SM2+	7.86±0.08de	0.31±0.03e	LM2+	8.07±0.07cd	0.39±0.08d
SM4+	7.84±0.07e	0.50±0.03cd	LM4+	8.00±0.11cd	0.59±0.03c
SM8+	7.86±0.07de	0.99±0.05b	LM8+	8.02±0.10cd	1.07±0.08b
SM12+	7.76±0.06e	1.42±0.07a	LM12+	7.97±0.08d	1.44±0.05a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同。

Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same as below.

37.44%,达到显著水平。

## 2.2 添加泥浆对甜菜生长的影响

### 2.2.1 甜菜株高

施入泥浆对甜菜株高具有显著影响(图3),两种土壤甜菜株高增长速度为:泥浆组>泥浆+石膏组>对照组。DAY40与DAY20相比,泥浆组1生长效果最好,且泥浆组株高均高于对应的泥浆+石膏组。

沙黄土DAY20时,随着泥浆含量增加,泥浆组1株高呈现增长趋势,除SM2外,与CK1差异均达到显著水平,最大值出现在SM12处理,其株高比CK1增加了25.26%。对应的泥浆+石膏组1株高先增加后趋于稳定,与对照差异均不显著。DAY40时,泥浆组1和对应的泥浆+石膏组1均呈现缓慢增加趋势,泥浆组1均高于CK1并达到显著水平,泥浆+石膏组1除SM2外,与CK1差异均没有达到显著水平。

黄绵土DAY20时,泥浆组2先增加后趋于稳定,泥浆+石膏组2呈现降低趋势,两组处理均显著低于

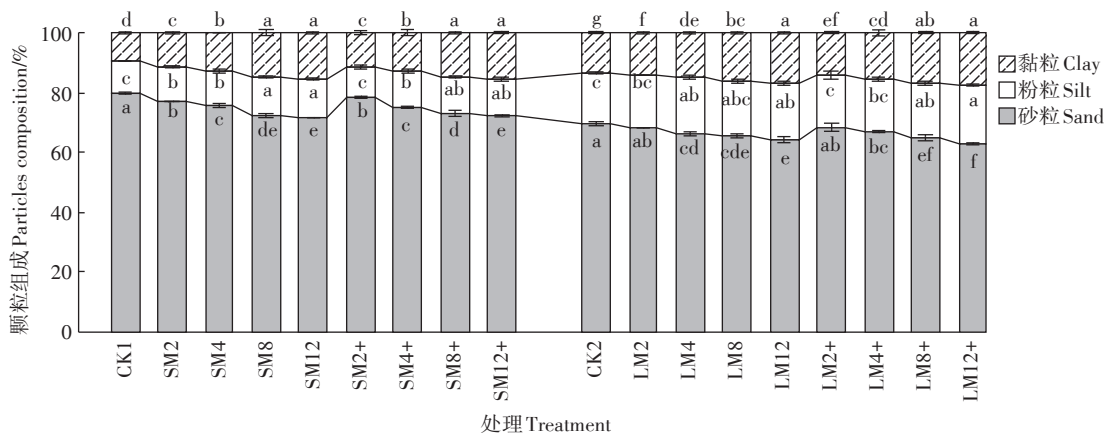
CK2。DAY40时,泥浆组2株高先增加后降低,最大值出现在LM8处理,与CK2相比增加了1.75%,但差异不显著,对应的泥浆+石膏组2总体趋于稳定,但是均显著低于对照。

### 2.2.2 甜菜总叶面积

泥浆组所有处理叶面积总和均高于相对应的泥浆+石膏组(图4)。沙黄土甜菜DAY20和DAY40取样结果显示,泥浆组1均高于CK1且达到显著水平,SM8处理叶面积最大,与CK1相比分别增加了46.64%、2.43倍。对应的泥浆+石膏组1中SM12+处理叶面积最大,比CK1分别增加了3.86%( $P>0.05$ )、1.15倍( $P<0.05$ )。泥浆组2各处理在DAY20时均低于CK2,并达到显著水平;DAY40时LM8处理叶面积最大,比CK2增加了32.03%,达到显著水平。相应的泥浆+石膏组2两次收获总叶面积均显著低于CK2。

### 2.2.3 叶绿素相对含量(SPAD值)

施入泥浆对甜菜叶片SPAD值具有明显影响(图



不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ),下同  
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same as below

图1 不同含量泥浆对土壤颗粒组成的影响

Figure 1 Effect of mud with different content on soil particle composition

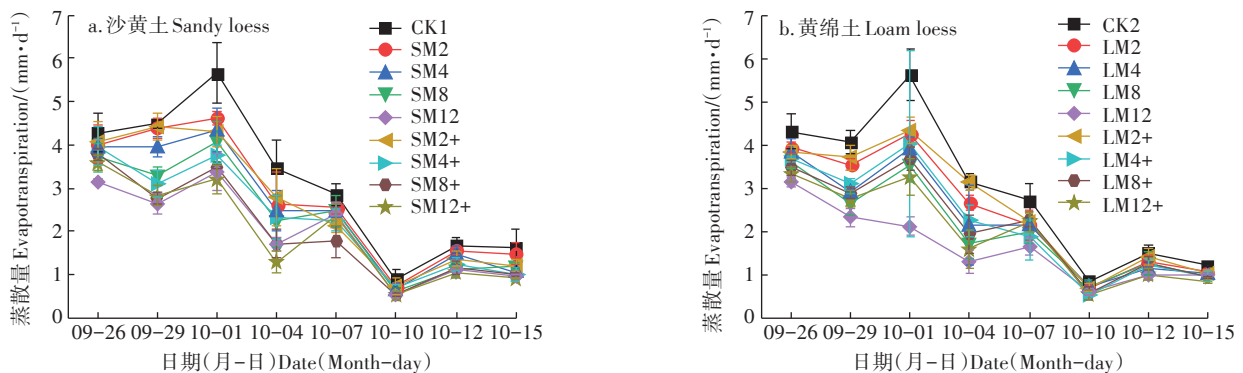


图2 不同含量泥浆对蒸散量的影响

Figure 2 Effects of different mud contents on evapotranspiration

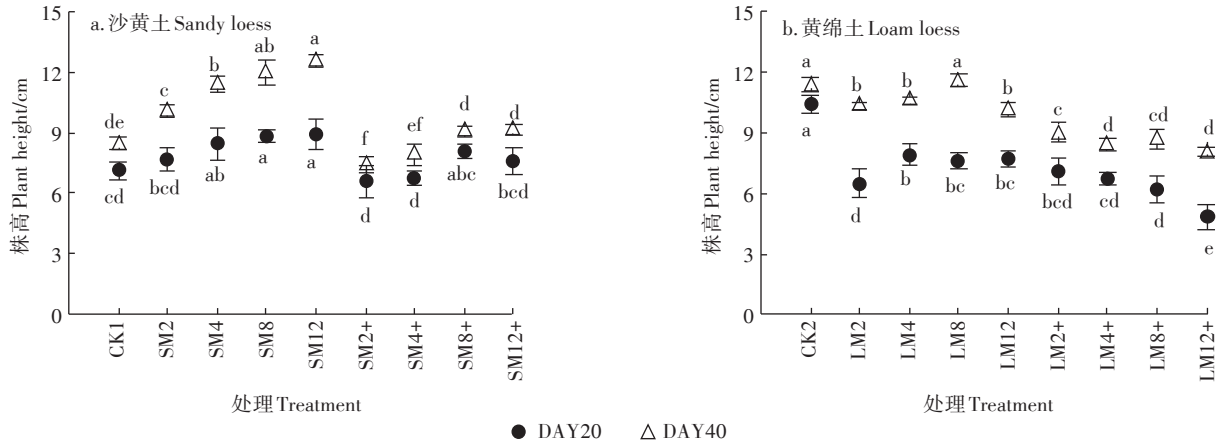


图3 不同含量泥浆对甜菜株高的影响

Figure 3 Effects of different mud contents on plant height of sugar beet

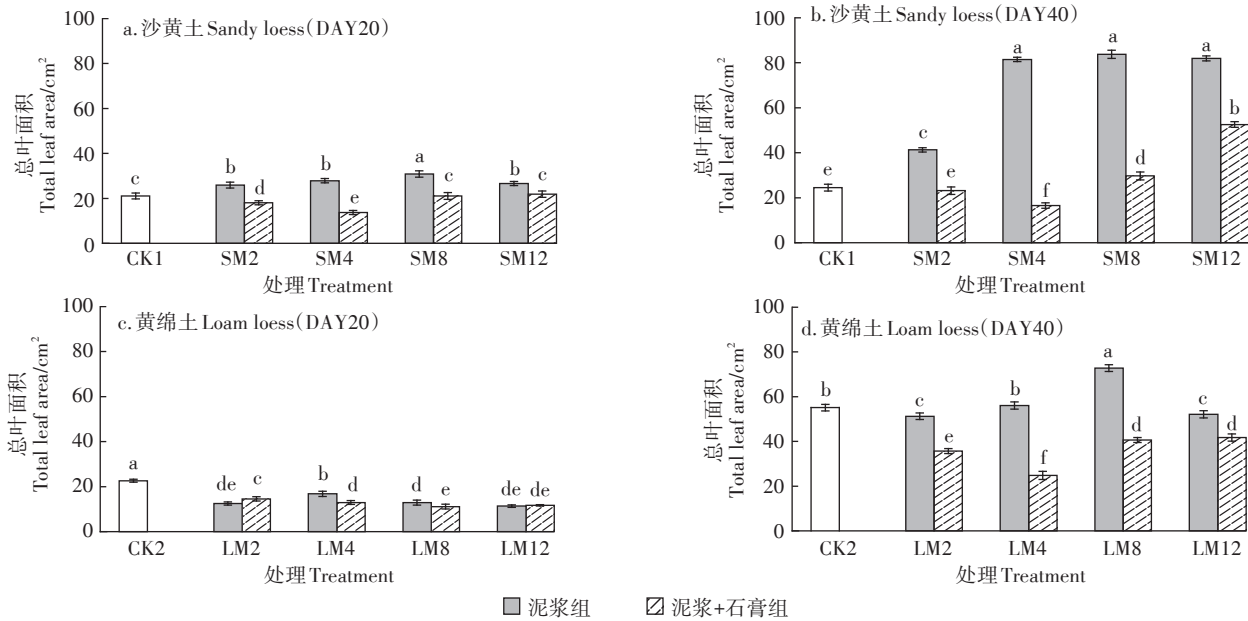


图4 不同含量泥浆对甜菜总叶面积的影响

Figure 4 Effects of mud content on total leaf area of sugar beet

5)。DAY20和DAY40两个收获期,泥浆组1的SPAD值均高于CK1,并达到显著水平( $P<0.05$ ),SM8处理SPAD值最大,与CK1相比分别增加了15.85%、58.18%。相对应的泥浆+石膏组1中SM12+处理SPAD值最大,比CK1分别增加了8.76%、34.34%,达到显著水平( $P<0.05$ )。泥浆组2中LM8处理SPAD值最大,比CK2分别增加了5.69%、27.65%,达到显著水平( $P<0.05$ )。对应的泥浆+石膏组2最大值出现在LM12+处理,与CK2相比分别增加了-3.01%、22.54%。

#### 2.2.4 地上部分生物量

两个收获期,随着泥浆添加量的增加,泥浆组1、

2生物量均呈现先增加后缓慢降低趋势,对应的泥浆+石膏组1、2均呈现先降低后增加趋势(表6)。DAY20时,泥浆组1生物量均高于CK1,SM8处理生物量最大,与CK1相比增加了65.73%,达到显著水平( $P<0.05$ );对应的泥浆+石膏组1与CK1差异均不显著( $P>0.05$ )。泥浆组2和对应的泥浆+石膏组2均低于CK2,并达到显著水平( $P<0.05$ )。DAY40时,泥浆组1生物量与CK1差异均达到显著水平,且组内差异显著,最大值出现在SM8处理,与CK1相比增加了3.54倍。泥浆+石膏组1中SM12+处理生物量最大,与CK1相比增加了1.81倍,达到显著水平。泥浆组2中LM8处理生物量最大,但与CK2相比差异不显著。

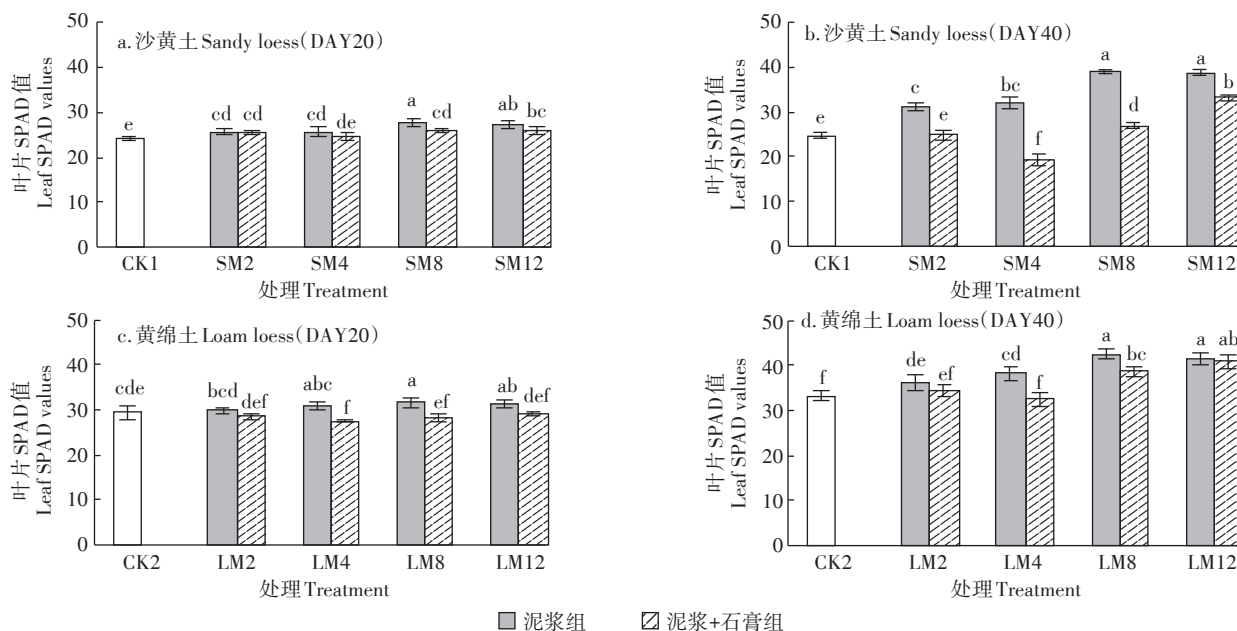


图5 不同含量泥浆对甜菜叶片SPAD值的影响

Figure 5 Effects of different mud contents on leaf SPAD values of sugar beet

表6 不同含量泥浆对甜菜生物量的影响(g)

Table 6 Effects of different mud contents on biomass of sugar beet(g)

处理 Treatment	DAY20	DAY40	处理 Treatment	DAY20	DAY40
CK1	0.80±0.07cd	0.99±0.16g	CK2	1.42±0.38a	2.81±0.16abc
SM2	1.08±0.18abc	2.85±0.18d	LM2	0.72±0.46bc	2.61±0.24bc
SM4	1.20±0.12ab	4.02±0.12c	LM4	0.92±0.08bc	2.33±0.34cd
SM8	1.33±0.14a	4.49±0.13a	LM8	0.98±0.17b	3.22±0.20a
SM12	1.18±0.13ab	4.24±0.05b	LM12	0.87±0.20bc	2.89±0.41ab
SM2+	1.05±0.21bc	1.24±0.12f	LM2+	0.70±0.12bc	1.82±0.28e
SM4+	0.63±0.15d	0.78±0.05g	LM4+	0.51±0.19c	1.17±0.08f
SM8+	0.91±0.13c	1.57±0.07e	LM8+	0.54±0.09c	2.02±0.38de
SM12+	1.02±0.11bc	2.78±0.11d	LM12+	0.61±0.06bc	2.09±0.22de

对应的泥浆+石膏组2生物量均低于对照,且达到显著水平( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

陕甘宁交界地带土壤黏粒含量少、保肥性差,不能为作物生长提供良好的水肥环境,加上开采区气候恶劣,生态脆弱,只有提高土壤持水保肥性能,才能持久有效改良土壤<sup>[12]</sup>。本研究中,两组泥浆组pH值、EC值均有所上升,但是没有显著加重土壤盐碱化。泥浆+石膏组土壤pH值降低,但盐分含量增加,这是因为石膏置换出土壤胶体上的钠离子,并中和碱性离子,降低碱性盐<sup>[13]</sup>,溶解过程中释放 $SO_4^{2-}$ 和钠盐,另外试验过程中进行水分控制,盐分没有及时得到淋洗<sup>[14]</sup>,累积在土壤表层。但本试验结果显示,添加石

膏对土壤颗粒组成和蒸散量无显著影响。

本研究中施入水基废弃钻井泥浆使得土壤中黏粒相对增加,蒸散量减少,从而促进了团聚体含量增加<sup>[15]</sup>,有效提升土壤持水性能。另外,泥浆中含有的聚丙烯酰胺、膨润土等物质,能够起到黏结土壤颗粒的作用<sup>[16]</sup>,减少土壤大孔隙<sup>[17]</sup>,利于有机质的留存,可以作为干旱半干旱地区的土壤改良剂<sup>[18]</sup>。水基废弃钻井泥浆的有机质含量为 $117.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,增加了土壤有机质含量,提升土壤肥力。施入水基废弃钻井泥浆,不仅增加了土壤养分含量,而且改善了土壤持水保肥性能。但是过量添加泥浆会导致土壤表面板结,甚至使得土壤颜色变黑<sup>[19]</sup>,对土壤微环境产生影响,威胁作物正常生长<sup>[20]</sup>。因此要根据不同土壤质地,结合作物生长状况,研究最佳添加量<sup>[21]</sup>。



水基废弃钻井泥浆可促进土壤中的营养元素被作物吸收利用<sup>[22]</sup>,且泥浆中低浓度的有机物可以促进作物幼苗生长,这与Kisic等<sup>[23]</sup>研究结果一致。甜菜叶片肥厚粗大,影响着块根产量和糖分,施入钻井泥浆后,泥浆中的养分被作物吸收,并作用于叶面,促进叶片光合作用的进行,使得作物生长迅速。本研究显示,施入一定量水基废弃钻井泥浆,对沙黄土中作物促生效果更好。两种土壤产生差异主要是因为沙黄土中黏粒和养分含量更低<sup>[24-25]</sup>,较低浓度的泥浆能够起到显著改良作用。泥浆+石膏组中,甜菜各项生长指标均低于相对应的泥浆组,主要是因为添加石膏后土壤盐分含量显著上升,另外试验期间蒸散量较大,土壤表面出现返盐现象,盐分累积在土壤表层,作物受到一定的盐分胁迫<sup>[26]</sup>。因此,应当依据所用泥浆自身特性,综合考虑土壤pH值增加和盐碱化问题,选择腐植酸、脱硫石膏、硫磺等其他添加剂进行调节。

将油气田开采产生的废弃水基泥浆作为土壤改良剂,施入粗质地土壤,可有效改良土壤结构,提升地力,对改善陕甘宁交界地带的贫瘠土壤具有重要作用。水基废弃钻井泥浆相较于油基泥浆污染风险小,更易于资源化利用<sup>[27]</sup>,且不会产生重金属危害。本试验所用的水基废弃钻井泥浆中的镉和铬含量相对较高,分别达到0.27、88.10 mg·kg<sup>-1</sup>,均稍高于供试土壤样品来源地和陕西省土壤背景值<sup>[28-29]</sup>,但没有超过《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中土壤污染风险筛选值(0.6 mg·kg<sup>-1</sup>和250 mg·kg<sup>-1</sup>)。按照最大施用量12%计算,试验土壤中重金属镉和铬的增幅分别为0.03 mg·kg<sup>-1</sup>和10.57 mg·kg<sup>-1</sup>,不会造成土壤污染,但是废弃泥浆大量使用可能造成一定的环境风险,特别是在陕北部分土壤镉含量偏高的矿区<sup>[29]</sup>。因此,应该按照不同的土壤质地和重金属本底值严格控制施用量,并依据作物、土壤等实际情况进行处理<sup>[30]</sup>。废弃水基泥浆一般采用一次性处置,不存在重复施用问题,而且土壤-植物系统对泥浆中有机物的分解与吸收利用,可以实现废弃泥浆变废为宝,从而促进油气田开采与环境保护协同发展。本研究试验期短,缺乏施加泥浆对土壤和作物的长期影响以及泥浆中养分在土壤中的转化方面的研究,今后需进一步探讨。

## 4 结论

(1)添加水基废弃钻井泥浆能够改善粗质地土壤基本物理性质。施入泥浆后,沙黄土和黄绵土中黏粒

相对含量增加,提升了土壤持水保肥能力,且重金属含量在安全范围内。

(2)水基废弃钻井泥浆提供了有机质等养分,促进了作物生长。依据作物生长情况,沙黄土和黄绵土中添加8%(干基)泥浆量,对土壤改良和作物促生效果最佳。

## 参考文献:

- [1] 赵吉平,任中启,刘爱军,等.废弃钻井物的二次利用和无害化处理[J].石油钻探技术,2003,31(1):37-39. ZHAO Ji-ping, REN Zhong-qi, LIU Ai-jun, et al. Reuse and harmless process of discarded drilling materials[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2003, 31(1): 37-39.
- [2] 董娅玮.废弃钻井泥浆固化处理技术研究[D].西安:长安大学,2009:13-14. DONG Ya-wei. Study on solidification treatment technology of waste drilling mud[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009: 13-14.
- [3] 王志,彭茹燕,王蕾,等.毛乌素沙地南缘改良与利用风沙土性质研究[J].水土保持学报,2006,20(2):14-17. WANG Zhi, PENG Ru-yan, WANG Lei, et al. Studies on soil properties of aeolian sandy sand improvement and utilization in south edge of Musu Desert[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 14-17.
- [4] Ball A S, Stewart R J, Schliephake K. A review of the current options for the treatment and safe disposal of drill cuttings[J]. *Waste Management & Research*, 2012, 30(5):457-473.
- [5] 周龙涛,王群立,贾悦,等.石油污染土壤微生物联合修复技术研究进展[J].油气田环境保护,2019,29(6):5-10. ZHOU Long-tao, WANG Qun-li, JIA Yue, et al. Progress in research on microbial combined remediation of oil-contaminated soil[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2019, 29(6): 5-10.
- [6] 杜国勇.钻井废弃泥浆土壤化实验研究[J].天然气工业,2010,30(8):95-97. DU Guo-yong. An experimental study of the deserted drilling mud transformed into soil resources[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(8):95-97.
- [7] 冀忠伦.废弃钻井液作为沙漠改良剂的应用研究[J].环境工程,2010,28(6):21-23. JI Zhong-lun. Study on using waste drilling fluid as improver of desert soil[J]. *Environmental Engineering*, 2010, 28(6): 21-23.
- [8] 籍国东,隋欣,孙铁珩,等.封闭式芦苇湿地处理钻井泥浆的可行性研究[J].环境科学学报,2001,21(4):426-430. JI Guo-dong, SUI Xin, SUN Tie-heng, et al. Feasibility study on drilling mud treatment with the confining reed wet-land system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2001, 21(4): 426-430.
- [9] 潘峰,陈丽华,付素静,等.石油类污染物在陇东黄土塬区土壤中迁移的模拟试验研究[J].环境科学学报,2012,32(2):410-418. PAN Feng, CHEN Li-hua, FU Su-jing, et al. A study on the transport performance of the petroleum contaminants in soil of the Longdong loess plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 410-418.
- [10] 焦海华,张淑珍,景旭东,等.油田区多环芳烃污染盐碱土壤活性

- 微生物群落结构解析[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6994-7005.
- JIAO Hai-hua, ZHANG Shu-zhen, JING Xu-dong, et al. Analysis of the structure and distribution characteristics of the microbial community in saline-alkali soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(21): 6994-7005.
- [11] 伍丹丹, 杨旭, 李颖, 等. 土地处理法处理钻探泥浆的土壤特性研究[J]. 污染防治技术, 2006, 19(3): 3-5. WU Dan-dan, YANG Xu, LI Ying, et al. Study on soil properties after drilling mud disposal by land treatment[J]. *Pollution Control Technology*, 2006, 19(3): 3-5.
- [12] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 44-48. HUANG Chang-yong. *Soil science*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 44-48.
- [13] 程镜润, 陈小华, 刘振鸿, 等. 脱硫石膏改良滨海盐碱土的脱盐过程与效果实验研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(6): 1505-1513. CHENG Jing-run, CHEN Xiao-hua, LIU Zhen-hong, et al. The experimental study on the process and effect to the FGD-gypsum as an improvement in coastal saline-alkali soil[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(6): 1505-1513.
- [14] 王静, 许兴, 肖国举, 等. 脱硫石膏改良宁夏典型龟裂碱土效果及其安全性评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 141-147. WANG Jing, XU Xing, XIAO Guo-ju, et al. Effect of typical Takyr Solonchetsz reclamation with flue gas desulphurization gypsum and its security assessment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(2): 141-147.
- [15] 张继义, 赵哈林. 退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤-植被系统稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1395-1401. ZHANG Ji-yi, ZHAO Ha-lin. Changes in soil particles fraction and their effects on stability of soil-vegetation system in restoration processes of degraded sandy grassland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1395-1401.
- [16] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 I. 入渗[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 178-185. TANG Ze-jun, LEI Ting-wu, ZHANG Qing-wen, et al. Effects of polyacrylamide application on infiltration and soil erosion under simulated rainfalls I. Infiltration[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 178-185.
- [17] Zvomuya F, Larney F J, DeMaere P R, et al. Hydraulic properties of a sandy loam soil following spent drilling mud application on native prairie[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1108-1112.
- [18] 雷廷武, 唐泽军, 张晴雯, 等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 II. 侵蚀[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 401-406. LEI Ting-wu, TANG Ze-jun, ZHANG Qing-wen, et al. Effects of polyacrylamide application on infiltration and soil erosion under simulated rainfalls II. Erosion control[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 401-406.
- [19] 乔川, 欧阳峰, 刘了, 等. 钻井泥浆固化处置对土壤环境的影响[J]. 油气田环境保护, 2013, 23(5): 41-44. QIAO Chuan, OUYANG Feng, LIU Liao, et al. Impact of drilling mud solidification treatment on soil environment[J]. *Environmental Protection of Oil & Gas Fields*, 2013, 23(5): 41-44.
- [20] Zvomuya F, Larney F J, McGinn S M, et al. Surface albedo and soil heat flux changes following drilling mud application to a semiarid, mixed-grass prairie[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(5): 1217.
- [21] Whitaker A, Penn C, Warren J. Surface application of a saline-sodic oil & gas drilling waste to winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Geoderma*, 2016, 274: 97-103.
- [22] 翟文晰, 郝明德, 王哲, 等. 黄土区废弃钻井液对苜蓿产量和品质的影响[J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(4): 468-472. ZHAI Wen-xi, HAO Ming-de, WANG Zhe, et al. Influence of waste drilling fluids in loess area on yield and quality of alfalfa[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2019, 36(4): 468-472.
- [23] Kisić I, Mesić S, Basic F, et al. The effect of drilling fluids and crude oil on some chemical characteristics of soil and crops[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3/4): 209-216.
- [24] 张永双, 曲勇新. 陕北晋西砂黄土的胶结物与胶结作用研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(1): 18-28. ZHANG Yong-shuang, QU Yong-xin. Cements of sand loess and their cementation in north Shaanxi and west Shanxi[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(1): 18-28.
- [25] 曹丽花, 赵世伟, 梁向峰, 等. PAM对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 45-49. CAO Li-hua, ZHAO Shi-wei, LIANG Xiang-feng, et al. Improvement effects of PAM on soil water-stable aggregates and its mechanisms in different soils in the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(1): 45-49.
- [26] Kujawska J, Wasąg H, Gawryluk A. Assessment of drilling waste addition on the salinity of soil and growth of selected grass species[J]. *Journal of Ecological Engineering*, 2020, 21(1): 63-71.
- [27] 张克勤, 王欣, 王奎才, 等. 国内外钻井液标准化工作综述[J]. 石油钻探技术, 2001, 29(3): 4-8. ZHANG Ke-qin, WANG Xin, WANG Kui-cai, et al. Overview of drilling fluid standardization at home and abroad[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2001, 29(3): 4-8.
- [28] 王丽, 王力, 和文祥, 等. 神木煤矿区土壤重金属污染特征研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8): 1343-1347. WANG Li, WANG Li, HE Wen-xiang, et al. Contaminate characteristic of heavy metals in soils in Shenmu mining area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(8): 1343-1347.
- [29] 王莎, 马俊杰, 赵丹, 等. 陕北地区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(5): 44-47. WANG Sha, MA Jun-jie, ZHAO Dan, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of soil metals in the north area of Shaanxi Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(5): 44-47.
- [30] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 5(2): 261-272. CHEN Wei-ping, YANG Yang, XIE Tian, et al. Challenges and countermeasures for heavy metal pollution control in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 5(2): 261-272.