



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

三种材料复合施用对盐碱土壤改良效果的研究

金梦野, 李小华, 黄占斌, 杨永安

引用本文:

金梦野, 李小华, 黄占斌, 等. 三种材料复合施用对盐碱土壤改良效果的研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 719–726.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0447>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同原料生物炭理化性质的对比分析

孙涛, 朱新萍, 李典鹏, 顾祝禹, 张佳喜, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 543–549 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0158>

三种纳米材料对水稻幼苗生长及根际土壤肥力的影响

尹勇, 刘灵

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 736–743 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0259>

改性蒙脱石修复镉污染对水稻根际土壤酶活性的影响

陈泽雄, 朱凰榕, 周志军, 赵秋香

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 528–533 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0269>

秸秆和植被覆盖对江苏滨海盐土土壤盐分变化的影响

崔士友, 张蛟

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 509–516 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0112>

模拟淋溶条件下沼液对菜田土壤磷素淋洗及其形态的影响

王敏锋, 陈硕, 朱睿, 刘石磊, 陈清, 李吉进, 许俊香

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 368–375 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0289>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

金梦野, 李小华, 黄占斌, 等. 三种材料复合施用对盐碱土壤改良效果的研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 719–726.

JIN Meng-ye, LI Xiao-hua, HUANG Zhan-bin, et al. Improvement of saline-alkali soil by compound application of three environmental materials[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 719–726.



开放科学 OSID

三种材料复合施用对盐碱土壤改良效果的研究

金梦野¹, 李小华², 黄占斌^{1*}, 杨永安³

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 河北华勘地质勘查有限公司, 河北 廊坊 065201; 3. 天津市玉米良种场, 天津 301507)

摘要:为研发对盐碱土壤脱盐和对土壤结构具有同步改良效应的复合改良材料,选取脱硫石膏(A)、改性腐植酸(B)和高分子材料(C),通过室内土柱模拟方法,采用正交试验设计,探究三种材料对盐碱土壤盐分淋洗和结构改良同步增效的最优组合,分析不同材料对盐碱土壤的改良机理。结果表明:三种材料复合施用对盐碱土壤盐分淋洗和结构改良有明显效果,对盐碱土壤改良效果最优的组合为A₃B₁C₃(脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料的添加量分别为60、2、0.1 g·kg⁻¹),与对照(CK)相比,其淋溶液积减少了14.22%,土壤钠吸附比(SAR)降低了30.43%,土壤团聚体含量增加24.45个百分点。研究表明,三种材料复合施用能够在改良盐碱土壤化学性质的同时改良盐碱土壤结构。

关键词:盐碱土壤;pH;钠吸附比(SAR);水溶性盐含量;复合材料

中图分类号:S156.2

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)05-0719-08

doi: 10.13254/j.jare.2019.0447

Improvement of saline-alkali soil by compound application of three environmental materials

JIN Meng-ye¹, LI Xiao-hua², HUANG Zhan-bin^{1*}, YANG Yong-an³

(1. College of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Hebei Huakan Geological Exploration Co., Ltd., Langfang 065201, China; 3. The Corn Variety Farm of Tianjin, Tianjin 301507, China)

Abstract: The aim of the present study was to develop composite materials with a simultaneous effect of desalination and improvement of the soil structure of saline-alkali soil using a soil column simulation test. To this end, the optimal combination of desulfurized gypsum (A), modified humic acid (B), and polymer material (C) was explored using an orthogonal experimental design. The improvement mechanism of different materials on saline-alkali soil was analyzed. The results showed that the three composite materials had significant effects on the desalination and structural improvement of the saline-alkali soil. The optimal combination was A₃B₁C₃, and the amounts of A, B, and C were 60, 2 and 0.1 g·kg⁻¹, respectively. Compared with the control, the volume of the leaching solution was reduced by 14.22% and the ratio of soil sodium adsorption was reduced by 30.43%. Moreover, the content of soil aggregates increased by 24.45 percent point. In conclusion, the application of the three composite materials could improve the chemical properties and structure of the saline-alkali soil.

Keywords: saline-alkali soil; pH; sodium adsorption ratio(SAR); water soluble salt content; composite materials

土壤盐碱化是指盐分在土壤表层积累,达到了某一阈值造成植物无法正常生长的现象^[1],随着经济和城市化的快速发展,农林用地面积不断减少,改良和

利用盐碱化土壤已经成为全球性问题^[2-3]。据统计,我国盐碱化土壤总面积达990万hm²,约占全国土壤面积的1/10,盐碱土壤面积大、分布广、环境承载力较

收稿日期:2019-09-07 录用日期:2019-11-08

作者简介:金梦野(1995—),女,黑龙江绥化人,硕士研究生,从事土壤盐碱化改良研究。E-mail:jimmengye951015@163.com

*通信作者:黄占斌 E-mail:Zbhuang2003@163.com

基金项目:国家自然科学基金(41571303);天津市宁河区盐碱地土壤化学改良技术方法应用研究(HK2019-B2)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41571303); Applied Research on Soil Chemical Improvement Technologies and Methods of Saline-alkali Soil in Ninghe District of Tianjin City(HK2019-B2)

差,既是我国经济社会生态可持续发展的主要影响因素,也是重要的后备土地资源^[4]。

目前,盐碱地的主要改良措施有物理措施^[5]、化学措施^[6]、生物措施^[7]、水利工程措施^[8]。其中化学改良技术得到一定研究示范,确定改良剂的最佳用量是化学改良措施应用的技术核心^[9],一般采用加入含钙物质来置换土壤胶体表面吸附的钠,也可采用加酸或酸性物质的方法进行盐碱化土壤改良^[10]。赵文婧^[11]在盐碱土壤改良的研究中主要重视土壤的洗盐过程,忽略了对土壤结构的改良,在地下水位升高情况下会导致土壤发生二次盐碱化,严重影响盐碱土壤改良的效果。

近年来,脱硫石膏、腐植酸和高分子材料在盐碱土壤改良的实际应用中颇受重视,脱硫石膏的主要成分是硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),能够降低盐碱土壤的钠盐含量,达到改良盐碱土壤的目的^[12-13]。腐植酸能够促进土壤团聚体的形成^[14],同时促进脱硫石膏在土壤中的溶解,使土壤中的离子代换作用更彻底^[15]。改性腐植酸是将腐植酸与氨水按一定比例均匀混合, NH_4^+ 与腐植酸分子上的羧基作用,同时又会与邻位二酚基作用,使改性腐植酸具有更高的活性^[16]。高分子材料分子可与土壤中的物质产生水解、降解、亲和、吸附、交联等一系列反应,增加土壤中的大团聚体结构^[17]。此外,高分子材料可以保持土壤结构,减少土壤结构中的水分蒸发,提高土壤的保水能力^[18],使作物增产。目前,三种材料在盐碱土壤改良研究中分别取得一定的效果^[19-21],但关于三种材料复合对盐碱土壤的改良效果研究较少。本文基于三种材料的协同与功能互补作用,采用正交试验设计,探索三种材料对盐碱土壤改良的优化组合,以期为滨海盐碱土壤改良的应用研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤:天津玉米良种场农田表层土壤(0~20 cm),pH为8.09,其水溶性 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 含量为88、656、55 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。碱化度为18.04,钠吸附比(SAR)为2.1,水溶性盐含量为3.2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于中等盐碱化土壤,自然风干后,过5 mm筛,备用。

供试材料:脱硫石膏由河北建投任丘热电有限公司提供,其 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 含量 $\geq 90\%$,pH为6.69,电导率为43.6 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;改性腐植酸由山西丰联农业有限公司提供,腐植酸含量 $> 50\%$,pH为8.5,电导率为109.4

$\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;高分子材料,线性阴离子型聚丙烯酰胺,60~80目白色颗粒的水溶性材料,由北京金元易生态环境产业股份有限公司提供。

试验用水:去离子水,pH为6.65,电导率为0.612 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

1.2 试验装置

试验采用土柱淋溶装置,主体由有机玻璃滤片和玻璃土柱架构成(图1)。土柱的最上层和最下层各放置一个带有小孔的玻璃滤板,在底层玻璃滤板上放置两层200目的纱布,以防止漏土。

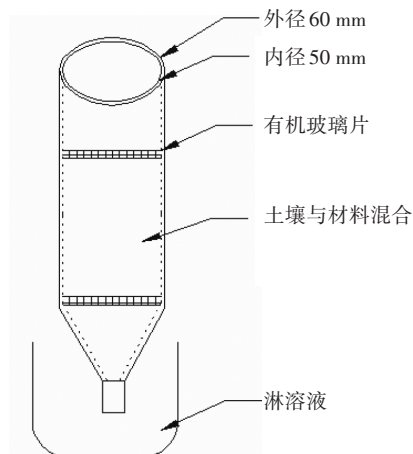


图1 土柱淋溶模拟试验装置

Figure 1 The equipment of soil column leaching experiment

1.3 试验设计

试验采用正交设计,试验点均衡分布,具有较强的代表性。本试验通过三因素三水平正交试验,采用土柱淋溶模拟方法,确定材料对盐碱化土壤改良的最佳组合。试验三因素为脱硫石膏(A)、改性腐植酸(B)和高分子材料(C),在课题组以往研究^[22]基础上,确定A用量的三个水平为每千克干土中添加20、40、60 g,B用量的三个水平为每千克干土中添加2、6、10 g,C的三个用量水平为每千克干土中添加0.025、0.050、0.100 g。以未添加任何材料的处理作为对照(CK),共10个处理(表1、表2),每个处理3个重复。

根据处理将复合材料与自然风干后过5 mm筛的土壤混合均匀后置于土柱内,在土柱的上层覆盖少量石英砂(约4 g,0.5 cm厚),保证淋溶时土壤的稳定性。调节水分至田间持水量的60%,将土柱在室温下放置1 d使土壤与复合材料充分反应。首次淋溶向土柱内加入200 mL去离子水,反应3 h后,收集土柱内的24 h淋溶液。首次淋溶后,将土柱放置在室温下自

表1 三种材料的添加量(g·kg⁻¹ 土)
Table 1 The quantity of the three materials(g·kg⁻¹ soil)

编号 No.	脱硫石膏 Desulfurization gypsum(A)	改性腐植酸 Modified humic acid(B)	高分子材料 Polymer material (C)
1	20	2	0.025
2	40	6	0.050
3	60	10	0.100

表2 各处理材料用量组合
Table 2 The material amount of each treatment

处理 Treatments	脱硫石膏 Desulfurization gypsum(A)	改性腐植酸 Modified humic acid(B)	高分子材料 Polymer material (C)
CK	0	0	0
T1	A ₁	B ₁	C ₁
T2	A ₁	B ₂	C ₂
T3	A ₁	B ₃	C ₃
T4	A ₂	B ₁	C ₂
T5	A ₂	B ₂	C ₃
T6	A ₂	B ₃	C ₁
T7	A ₃	B ₁	C ₃
T8	A ₃	B ₂	C ₂
T9	A ₃	B ₃	C ₁

然蒸发,土壤含水率降至约60%(采用称质量法计算)时进行二次淋溶,淋溶过程与首次相同。

1.4 测定指标与方法

淋溶液指标:淋溶液体积采用量筒直接测定;pH采用玻璃电极法测定(LY/T 1239—1999)。

土壤指标:淋溶后将土壤从淋溶液中取出自然风干后,Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺含量采用ICP-MS(NexION 300D,美国PerkinElmer公司)测定;采集土柱内中部10~15

cm淋溶后土壤样品自然风干后进行土壤水稳定性团聚体分析(TTF-100土壤团聚体分析仪,北京同德创业科技有限公司);土壤水溶性盐含量采用烘干法测定。

钠吸附比(SAR)是衡量土壤碱化度的重要指标,计算公式:

$$SAR = C_{Na^+} / \sqrt{(C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}) / 2}$$

式中:C_{Na⁺}为土壤中可交换态钠离子的浓度;C_{Ca²⁺}为土壤中可交换态钙离子的浓度;C_{Mg²⁺}为土壤中可交换态镁离子的浓度。

1.5 数据处理

试验结果采用Origin 2018进行绘图,采用SPSS 9.0软件进行数据统计与分析。

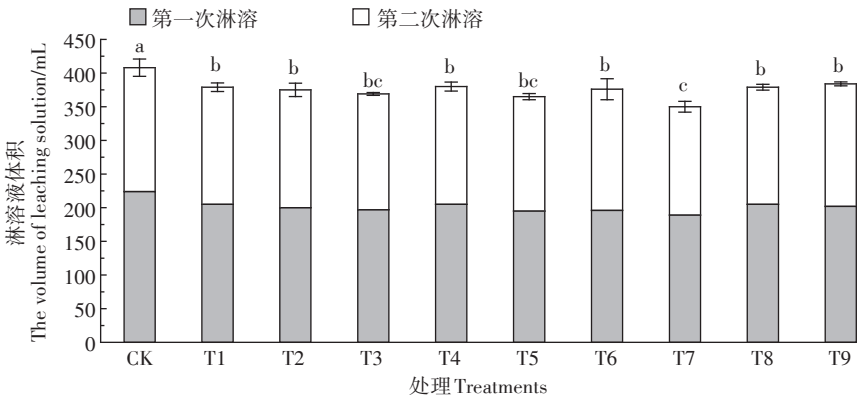
2 结果与分析

2.1 不同材料组合对土壤水分保持的影响

淋溶液体积能够代表土壤保水性能的优良,盐碱土壤对水分的保持能力较差,造成土壤发生板结现象。图2显示了施加不同复合材料组合后淋溶液体积的变化情况,在两次淋溶过程中,添加不同复合材料处理后两次淋溶液总体积与对照(CK)相比均呈下降趋势,在第一次淋溶过程中,T1~T9的淋溶液体积较CK降低了8.48%~15.63%;第二次淋溶过程中,与CK相比,添加不同材料组合后的淋溶液体积降幅为1.09%~12.50%。此外,淋溶液体积的下降与高分子材料的添加量呈正相关。结果表明,三种材料的不同添加组合均能够提高盐碱土壤的水分保持性能。

2.2 不同材料组合对土壤水稳定性团聚体含量的影响

团聚体是土壤的重要组成部分,稳定的团聚体是



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 below

图2 不同材料组合对淋溶液体积的影响

Figure 2 The effect of different material combinations on the volume of leaching solution

土壤调节水、肥、气、热,对抗环境剧烈变化的重要条件^[23],盐碱土壤中大于0.25 mm的团聚体结构较少,导致盐碱土壤中的微生物活性和酶活性较差。复合材料对淋溶后盐碱土壤水稳定性团聚体含量的影响见图3。与CK相比,添加复合材料组合淋溶后(T1~T9),盐碱土壤中团聚体含量增至27.32%~53.83%,其中T3土壤团聚体含量增幅最大($P<0.05$)。表明三种材料的添加能够促进淋溶后盐碱土壤大团聚体的形成。

2.3 不同材料组合对淋溶后盐碱土壤pH的影响

pH是盐碱土壤的重要化学指标,其变化会影响土壤中养分含量及酶的活性。图4显示了在盐碱土壤中添加不同材料组合对淋溶后盐碱土壤pH的影响。与CK相比,添加复合材料组合使淋溶后盐碱土壤的pH值下降0.01~0.66个单位,其中T1对盐碱土壤pH值降低的效果最显著($P<0.05$)。

2.4 不同材料组合对土壤水溶性盐含量的影响

盐碱土壤中盐分含量较高,导致土壤中渗透压不平衡,造成植物生理干旱。添加复合材料淋溶后,各处理盐碱土壤中的水溶性盐含量变化见图5。与CK

相比,各处理的土壤水溶性盐含量显著增加了0.02~0.04个百分点,且淋溶后盐碱土壤中水溶性盐含量随脱硫石膏用量增加呈增加趋势。

2.5 不同材料组合对土壤钠吸附比(SAR)的影响

土壤盐碱化即土壤胶体吸附钠离子的过程,也是阳离子在土壤液相和固相间相互交换的过程。盐碱土壤SAR值在添加不同材料组合淋溶后的变化趋势如图6所示,与CK相比,T1~T9盐碱土壤SAR值均呈下降趋势并达到了显著水平($P<0.05$),分别降低了39.13%、47.83%、30.43%、34.78%、26.09%、17.39%、30.43%、60.78%、43.48%,表明三种材料的复合施用能够降低盐碱土壤的SAR值,其中T8对降低土壤SAR值的效果最优。

3 讨论

土壤持水能力受土壤颗粒组成及孔隙度的影响^[24],对添加不同材料淋溶后的淋溶液体体积进行正交分析(表3)。三种材料对盐碱土壤淋溶液体极差影响表现为 $R_c>R_b>R_a$,且脱硫石膏与改性腐植酸对水分

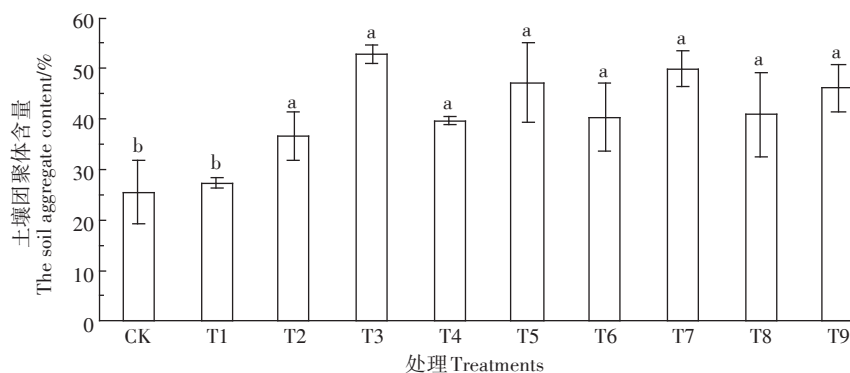


图3 不同材料组合对土壤水稳定性团聚体含量的影响

Figure 3 The effect of different material combinations on the content of soil water-stable aggregates

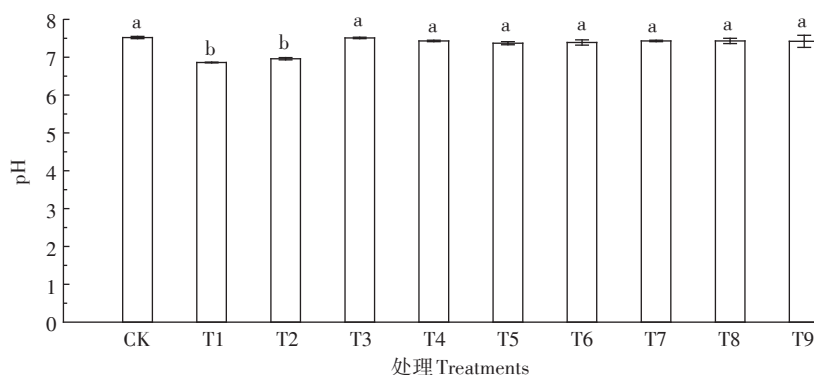


图4 不同材料组合对淋溶后盐碱土壤pH值的影响

Figure 4 The effect of different material combinations on pH value of leached saline-alkali soil

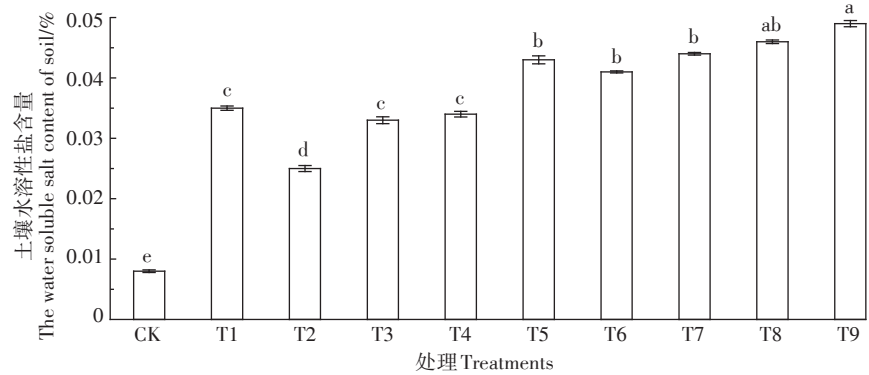


图5 不同材料组合对盐碱土壤水溶性盐含量的影响

Figure 5 The effect of different material combinations on water soluble salt content in saline-alkali soils

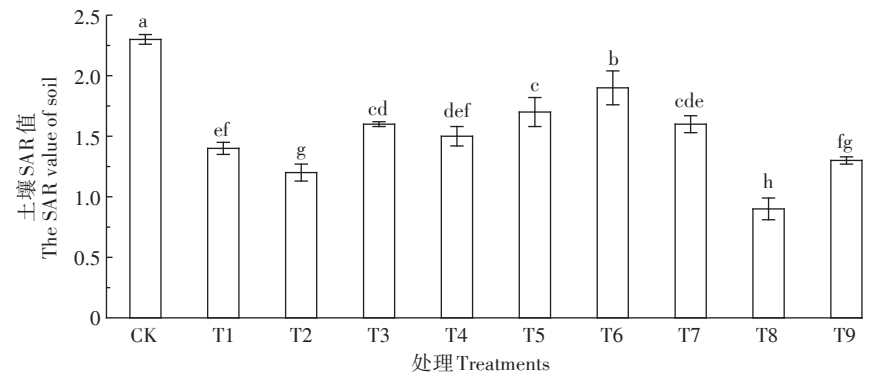


图6 不同材料组合对盐碱土壤SAR值的影响

Figure 6 The effect of different material combinations on SAR values of saline-alkali soils

保持的效果相近,但高分子材料的保水效果远高于其他两种材料,这与李磐等^[25]、武继承等^[26]的研究结果一致。这可能是由于高分子材料结构中含有的酰基能够形成氢键,高分子材料与水分子可在氢键作用下形成高分子网束^[27],网束内外渗透压不同,水分子流入网内,从而减少水分的流失和蒸发^[28]。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其稳定性对评价土壤质量具有重要意义^[29]。研究表明,腐植酸能够降低土壤水溶性盐含量,增加土壤中团聚体结构^[30];高分子材料能够促进土壤团聚体的形成,提高土壤吸水 and 保水性能^[31],这与本研究结果一致,由表3可知,各材料组合处理土壤团聚体含量较未施加材料处理均呈增加趋势,但因材料用量的不同,处理间差异显著。三种材料对盐碱土壤团聚体含量增加影响的大小顺序为高分子材料>改性腐植酸>脱硫石膏,造成这一现象的原因是高分子材料是阴离子线性结构分子,能够与土壤中的许多物质发生水解、降解、亲和、吸附等一些列化学反应,使之凝聚成为团粒结

表3 盐碱土壤物理性质正交分析

Table 3 The orthogonal analysis of physical properties of saline-alkali soils

项目 Items	淋溶液体积 The leaching volume			土壤团聚体含量 The content of soil aggregate		
	A	B	C	A	B	C
K ₁	1 126	1 406	1 436	117	117	114
K ₂	1 121	1 118	1 134	127	125	117
K ₃	1 115	1 129	1 083	137	139	150
k ₁	375.33	468.67	478.67	39.00	39.00	38.00
k ₂	373.67	372.67	378.00	42.33	41.67	39.00
k ₃	371.67	376.33	361.00	45.67	46.33	50.00
极差 R	3.60	96.00	117.67	6.67	7.33	12.00
主次顺序		C>A>B			C>B>A	
优水平	A ₃	B ₂	C ₃	A ₃	B ₃	C ₃
优组合		A ₃ B ₂ C ₃			A ₃ B ₃ C ₃	

构^[32],改良盐碱土壤。另外,改性腐植酸是一种胶体,能够与土壤中的微团聚体发生絮凝作用,促进土壤中团粒结构的形成^[33]。

盐碱土壤的改良通常是采用脱硫石膏等含 Ca^{2+} 物质置换土壤表面的 Na^+ , 生成 Na_2SO_4 和 CaCO_3 降低盐碱土壤含盐量、SAR 值、pH 值, 但若土壤中 pH 值较高, CaCO_3 会将土壤中的营养元素固定, 造成植物的营养缺失。已有研究表明, 施入改良剂能够降低盐碱土壤 pH 值^[34]。三种材料组合脱硫石膏对土壤 pH 值、水溶性盐含量、SAR 值表现出良好的改良效果(表 4), 这可能是由于脱硫石膏的主要成分是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ^[35], CaSO_4 能够与盐碱土壤中的 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 等碱性物质发生反应, 降低土壤的 pH 值^[36], 这与贺坤等^[37]的研究结果一致。土壤 SAR 值与土壤中 Na^+ 浓度成正比, 与 Ca^{2+} 浓度成反比, 添加脱硫石膏能够增加土壤中的 Ca^{2+} 浓度, 同时能通过置换反应降低盐碱土壤中 Na^+ 含量^[38], 因此, 脱硫石膏能够显著降低土壤 SAR 值。研究表明, 添加脱硫石膏后可降低盐碱土壤中溶解性盐含量^[39], 这与本试验结果相反。但对比土壤中盐离子含量比例可知, 加入三种材料淋溶后的盐碱土壤中, 钙盐含量增加而钠盐含量减少, 再次论证脱硫石膏中的 Ca^{2+} 能够与 Na^+ 发生置换反应^[40], 因此, 盐碱土壤中的盐分类型发生了改变^[41], 且添加三种复合材料后土壤的含盐量均降到 0.05% 以下, 对植物生长发育产生的不利影响较小。

由表 3 可知, 三种材料对土壤水分保持效果最好的最优组合为 $\text{A}_3\text{B}_2\text{C}_3$, 对促进土壤团聚体形成效果最好的最优组合为 $\text{A}_3\text{B}_3\text{C}_3$; 由表 4 可知, 对土壤 pH 降低效果最好的最优组合为 $\text{A}_1\text{B}_1\text{C}_1$, 对土壤水溶性盐降低效果最好的最优组合为 $\text{A}_1\text{B}_1\text{C}_2$, 对土壤 SAR 值降低效

果最好的最优组合为 $\text{A}_3\text{B}_2\text{C}_2$ 。因此, 因素 A 是土壤 pH 值和土壤 SAR 值的主要影响因素, 综合分析选择 A_3 为最优水平。因素 B 是土壤水溶性盐和土壤团聚体结构的主要影响因素, 综合分析选 B_1 为最优水平。因素 C 是土壤水分保持和土壤团聚体结构的主要影响因素, 综合分析选 C_3 为最优水平。

4 结论

(1) 通过土柱淋溶模拟试验证明, 三种材料复合施用能够显著降低盐碱土壤 pH、 Na^+ 含量及土壤 SAR 值, 同时能够增强土壤的水分保持效果, 促进土壤团聚体的形成。综合分析各项指标, $\text{A}_3\text{B}_1\text{C}_3$ (脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料的添加量分别为 60、2、0.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 是降低土壤盐分和改良土壤结构的最优组合。

(2) 三种材料复合施用既能够改善盐碱土壤的化学性质, 同时也能够改良土壤结构, 防止土壤二次污染, 保证了盐碱土壤改良的效果。

参考文献:

- [1] 魏博娴. 中国盐碱土的分布与成因分析[J]. 水土保持应用技术, 2012(6): 27-28.
WEI Bo-xian. Distribution and genesis of saline-alkali soils in China [J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2012(6): 27-28.
- [2] Ding J, Yu D. Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan-Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments[J]. *Geoderma*, 2014, 235/236(4): 316-322.
- [3] Sun H, Lu H, Chu L, et al. Biochar applied with appropriate rates can reduce N leaching, keep N retention and not increase NH_3 volatilization in a coastal saline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 575: 820-825.
- [4] 朱建峰, 崔振荣, 吴春红, 等. 我国盐碱地绿化研究进展与展望[J]. 世界林业研究, 2018, 31(4): 70-75.
ZHU Jian-feng, CUI Zhen-rong, WU Chun-hong, et al. Research advances and prospect of saline and alkali land greening in China[J]. *World Forestry Research*, 2018, 31(4): 70-75.
- [5] Luo S, Wang S, Tian L, et al. Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils[J]. *Geoderma*, 2018, 329: 108-117.
- [6] 高婧, 杨劲松, 姚荣江, 等. 不同改良剂对滨海重度盐渍土质量和肥料利用效率的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 524-529.
GAO Jing, YANG Jin-song, YAO Rong-jiang, et al. Effects of different soil amendments on properties and fertilizer utilization efficiency for coastal heavily-salinized soil[J]. *Soils*, 2019, 51(3): 524-529.
- [7] 杨华, 陈莎莎, 冯哲叶, 等. 土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2080-2085.
YANG Hua, CHEN Sha-sha, FENG Zhe-ye, et al. Combined effects of

表 4 盐碱土壤化学性质正交分析

Table 4 The orthogonal analysis of chemical properties of saline-alkali soils

项目 Items	土壤 pH 值 The pH value of soil			水溶性盐含量 Water soluble salt content			土壤 SAR 值 The SAR value of soil		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K_1	21.3	21.7	21.7	0.093	0.114	0.126	4.2	4.4	4.6
K_2	22.2	21.8	21.8	0.119	0.114	0.105	5.0	3.7	3.5
K_3	22.3	22.3	22.3	0.140	0.124	0.121	3.7	4.8	4.9
k_1	7.10	7.23	7.23	0.030	0.037	0.042	1.4	1.5	1.5
k_2	7.40	7.27	7.27	0.040	0.038	0.035	1.7	1.2	1.2
k_3	7.43	7.43	7.43	0.050	0.041	0.040	1.2	1.6	1.6
极差 R	0.33	0.20	0.20	0.020	0.004	0.007	0.5	0.4	0.4
主次顺序	A>B=C			A>C>B			A>B=C		
优水平	A_1	B_1	C_1	A_1	B_1	C_2	A_3	B_2	C_2
优组合	$\text{A}_1\text{B}_1\text{C}_1$			$\text{A}_1\text{B}_1\text{C}_2$			$\text{A}_3\text{B}_2\text{C}_2$		

- soil microbes and organic matter on aggregate formation in saline-alkali soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2080-2085.
- [8] 田冬, 桂丕, 李化山, 等. 不同改良措施对滨海重度盐碱地的改良效果分析[J]. 西南农业学报, 2018, 31(11): 2366-2372.
- TIAN Dong, GUI Pi, LI Hua-shan, et al. Effect of different measures on improvement of seashore saline alkali land[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Science*, 2018, 31(11): 2366-2372.
- [9] 李金彪, 陈金林, 刘广明, 等. 滨海盐碱地绿化理论技术研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 246-251.
- LI Jin-biao, CHEN Jin-lin, LIU Guang-ming, et al. Progress of greening theory and technology for coastal saline land[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(1): 246-251.
- [10] 边荣荣, 孙兆军, 李向辉, 等. 西北盐碱地改良利用技术研究现状及展望[J]. 宁夏工程技术, 2016, 15(4): 404-408.
- BIAN Rong-rong, SUN Zhao-jun, LI Xiang-hui, et al. Present situation and prospect of improvement and utilization of saline-alkali land in northwest[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2016, 15(4): 404-408.
- [11] 赵文婧. 环境材料在农业生产及其环境治理中的应用[J]. 农业与技术, 2017, 37(18): 13-83.
- ZHAO Wen-jing. Application of environmental materials in agricultural production and environmental governance[J]. *Agriculture and Technology*, 2017, 37(18): 13-83.
- [12] 沈婧丽, 王彬, 许兴. 脱硫石膏改良盐碱地研究进展[J]. 农业科学研究, 2016, 37(1): 65-69.
- SHEN Jing-li, WANG Bin, XU Xing. Review on research of using desulfurized gypsum to ameliorate saline-sodic soil[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 37(1): 65-69.
- [13] Desutter T M, Cihacek L J, Rahman S. Application of flue gas desulfurization gypsum (FGDG) and its impact on wheat (*Triticum aestivum* L.) yields, and grain and soil chemistry[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(1): 303.
- [14] 边思梦, 孙晓然, 尚宏周, 等. 腐植酸复合吸附新材料研究进展[J]. 腐植酸, 2018(4): 15-21.
- BIAN Si-meng, SUN Xiao-ran, SHANG Hong-zhou, et al. Research progress of the new composite adsorption materials based on humic acid[J]. *Humic Acid*, 2018(4): 15-21.
- [15] 侯林. 脱硫石膏与腐植酸改良盐碱土室内土柱研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- HOU Lin. Study on the soil column of modified saline-alkali soil with desulfurization gypsum and humic acid[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [16] 张德和, 陈步时, 李允阁, 等. 腐植酸的氨化机理的研究[J]. 化学学报, 1978(3): 171-182.
- ZHANG De-he, CHEN Bu-shi, LI Yun-ge, et al. A study of the mechanism of ammoniation of humic acid[J]. *Acta Chimica Sinica*, 1978(3): 171-182.
- [17] Lentz R D. Polyacrylamide and biopolymer effects on flocculation, aggregate stability, and water seepage in a silt loam[J]. *Geoderma*, 2015, 241/242: 289-294.
- [18] 陆绍娟, 王占礼. 土壤改良剂聚丙烯酰胺的研究进展[J]. 人民黄河, 2016, 38(7): 73-77.
- LU Shao-juan, WANG Zhan-li. Research progress of soil conditioner polyacrylamide[J]. *Yellow River*, 2016, 38(7): 73-77.
- [19] Nan J, Chen X, Wang X, et al. Effects of applying flue gas desulfurization gypsum and humic acid on soil physicochemical properties and rapeseed yield of a saline-sodic cropland in the eastern coastal area of China[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 16(1): 38-50.
- [20] 张开祥, 马宏秀, 孟春梅, 等. 施用保水材料对酸枣种子萌发及枣田土壤理化性质的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(1): 69-74.
- ZHANG Kai-xiang, MA Hong-xiu, MENG Chun-mei, et al. The effects of water retention materials on seed germination, soil physical and chemical properties of jujube field[J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2018, 36(1): 69-74.
- [21] 王明华, 李明, 高祺, 等. 改良剂对苏打盐碱土玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2966-2973.
- WANG Ming-hua, LI Ming, GAO Qi, et al. Effects of amendments on growth and physiological characteristics of maize seedlings on saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(11): 2966-2973.
- [22] 孙在金. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- SUN Zai-jin. Research on effects and the mechanism of desulfurization gypsum and humic acid on coastal saline-alkali soil improvement[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2013.
- [23] 徐爽. 化学物质对土壤团聚体稳定性及其它物理性状的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- XU Shuang. Effects of chemicals on soil aggregates stability and their other physical characters[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [24] 苏杨, 朱健, 王平, 等. 土壤持水能力研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(14): 140-145.
- SU Yang, ZHU Jian, WANG Ping, et al. Research progress on soil water holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(14): 140-145.
- [25] 李磐, 冯耀祖, 钟新才. 施用抗旱保水剂对棉花产量与水分利用效率的影响[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(6): 1125-1129.
- LI Pan, FENG Yao-zu, ZHONG Xin-cai. Effect of drought-resistant agents (DRA) and super absorbent polymers (SAP) on the yield and water use efficiency of cotton[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2011, 48(6): 1125-1129.
- [26] 武继承, 管秀娟, 杨永辉. 地面覆盖和保水剂对冬小麦生长和降水利用的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 86-92.
- WU Ji-cheng, GUAN Xiu-juan, YANG Yong-hui. Effect of ground cover and water-retaining agent on winter wheat growth and precipitation utilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 86-92.
- [27] 李佳佳, 李俊颖, 王定勇. PAM对沙质土壤持水性能影响的模拟研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 93-97.
- LI Jia-jia, LI Jun-ying, WANG Ding-yong. A simulation study of the

- effect of PAM on water holding capacity of sandy soils[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2010, 32(3):93-97.
- [28] 杨明金, 张勃, 王海军, 等. 聚丙烯酰胺和磷石膏对土壤导水性能的影响研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4):747-750.
YANG Ming-jin, ZHANG Bo, WANG Hai-jun, et al. The study on effects of PAM and PG on soil hydraulic conductivity[J]. *China Journal of Soil Science*, 2009, 40(4):747-750.
- [29] 王仁杰, 强久次仁, 薛彦飞, 等. 长期有机无机肥配施改变了壤土团聚体及其有机和无机碳分布[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23):4678-4689.
WANG Ren-jie, Qiang Jiu Ci-ren, XUE Yan-fei, et al. Effect of long-term organic-manure combined with chemical fertilizers on aggregate sizes distribution and its organic and inorganic carbon on a tier soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4678-4689.
- [30] 王倩姿, 王玉, 孙志梅, 等. 腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4):1227-1234.
WANG Qian-zi, WANG Yu, SUN Zhi-mei, et al. Amelioration effect of humic acid on saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1227-1234.
- [31] 谢国雄, 季淑枫, 孔樟良, 等. 改良剂对粉砂质涂地土壤水稳定性团聚体形成和养分供应能力的影响[J]. *农学学报*, 2015, 5(1):46-50.
XIE Guo-xiong, JI Shu-feng, KONG Zhang-liang, et al. Effects of amendments on formation of water-stable aggregates and supply capacity of nutrients in silty coastal soil[J]. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(1):46-50.
- [32] 王启龙. 施用聚丙烯酰胺(PAM)对盐碱土改良效果研究[J]. *农业科技与信息*, 2018(12):48-51.
WANG Qi-long. Study on the improvement effect of polyacrylamide (PAM) on saline alkali soil[J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2018(12):48-51.
- [33] 陈静, 黄占斌. 腐植酸在土壤修复中的作用[J]. *腐植酸*, 2014(4):30-34.
CHEN Jing, HUANG Zhan-bin. Effect of humic acid on soil restoration[J]. *Humic Acid*, 2014(4):30-34.
- [34] Luo J, Wang L, Li Q, et al. Improvement of hard saline-sodic soils using polymeric aluminum ferric sulfate (PAFS) [J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 149:12-20.
- [35] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. *Resources Conservation & Recycling*, 2017, 121:82-92.
- [36] Smaoui J M, Kriaa W, Maalej M, et al. Effect of the phosphogypsum amendment of saline and agricultural soils on growth, productivity and antioxidant enzyme activities of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. *Ecotoxicology*, 2017, 26(8):1089-1104.
- [37] 贺坤, 李小平, 章炫耀, 等. 烟气脱硫石膏对崇明滨海盐碱地理化性质及早稻生长的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(6):1381-1386.
HE Kun, LI Xiao-ping, ZHANG Xuan-yao, et al. Effect of flue gas desulfurization gypsum (FGD-gypsum) on physical and chemical properties of soil and growth of upland rice in Chongming coastal saline soils[J]. *Southwest China Journal of Agriculture Science*, 2016, 29(6):1381-1386.
- [38] Rasouli F, Pouya A K, Karimian N. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum[J]. *Geoderma*, 2013, 193:246-255.
- [39] 韩剑宏, 李艳伟, 张连科, 等. 生物炭和脱硫石膏对盐碱土壤基本理化性质及玉米生长的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9):5291-5297.
HAN Jian-hong, LI Yan-wei, ZHANG Lian-ke, et al. Effects of bio-char and FGD-gypsum application on soil basic physical and chemical properties and maize growth of saline soil[J]. *Chinese Journal of Enviromental Engineering*, 2017, 11(9):5291-5297.
- [40] 魏淑贞, 张伟华, 岳殷萍. 脱硫石膏对盐碱土改良效果研究[J]. *北方农业学报*, 2017, 45(2):58-62.
WEI Shu-zhen, ZHANG Wei-hua, YUE Yin-ping. Study on improve effect of desulfuration gypsum on saline-alkali soil[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2017, 45(2):58-62.
- [41] 孙在金, 黄占斌, 陆兆华. 不同环境材料对黄河三角洲滨海盐碱化土壤的改良效应[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4):186-190.
SUN Zai-jin, HUANG Zhan-bin, LU Zhao-hua. Improvement effects of different environmental materials on coastal saline-alkali soil in Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):186-190.