

三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究

金梦野, 黄娟, 侯嫔, 黄占斌

引用本文:

金梦野, 黄娟, 侯嫔, 等. 三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 118–124.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0880>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同土壤改良剂对盐碱土壤化学性质和有机碳库的影响

冀拯宇, 周吉祥, 张贺, 郭康莉, 刘晓, 姜慧敏, 杨俊诚, 李桂花, 张建峰

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1759–1767 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0426>

氢氧化镁铝改良滨海盐碱土机理与效果研究

田露, 赵林, 杨永奎, 乔治

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2220–2225 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1738>

土壤微生物与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响

杨华, 陈莎莎, 冯哲叶, 邓照亮, 李真, 王世梅

农业环境科学学报. 2017, 36(10): 2080–2085 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0379>

环丙沙星在盐碱土中吸附特性的研究

边炜涛, 马秀兰, 王富民, 张力媛, 任力洁, 王玉军, 高迪

农业环境科学学报. 2016, 35(10): 1953–1959 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0196>

Cd在吉林省3种典型土壤上的吸附及其影响因素研究

颜廷玉, 马秀兰, 顾芳宁, 张婧, 王玉军, 韩兴, 冯君

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 827–834 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0847>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

金梦野, 黄娟, 侯嫔, 等. 三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 118–124.

JIN Meng-ye, HUANG Juan, HOU Pin, et al. Improvement effect of three environmental materials and their composite application on saline-alkali soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(1): 118–124.

三种环境材料及其复合施用对盐碱化土壤的改良效果研究

金梦野¹, 黄娟², 侯嫔¹, 黄占斌^{1*}

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 广东 深圳 518040)

摘要:为了研发新型有机无机复合材料改良盐碱土壤, 采用土柱淋溶模拟实验方法, 研究了脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料及其复合材料对盐碱土壤理化性能的改良效果, 并探讨了相关材料对盐碱土壤的改良机制。结果表明:与不加任何材料的对照处理(CK)相比, 脱硫石膏的作用主要是降低盐碱土壤的pH值和土壤钠吸附比(SAR), 淋溶后盐碱土壤pH和SAR分别下降了7.46%和37.7%;改性腐植酸的作用是降低盐碱土壤中水溶性盐含量, 淋溶后水溶性盐含量较CK降低了64.61%;高分子材料主要作用是增强土壤的保水效果, 土壤淋溶液总体积较CK降低了33.1%;三种材料复合处理的淋溶盐碱土壤中大于0.25 mm的土壤团聚体含量增加了20.41%, pH、SAR分别降低0.81%、26.23%。综合评价认为, 三种材料复合处理能够在改善盐碱土壤理化性质的同时改良土壤结构, 具有较好的综合改良效果。

关键词:盐碱土壤; pH; 钠吸附比; 脱硫石膏; 环境材料

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2020)01-0118-07 doi:10.11654/jaes.2019-0880

Improvement effect of three environmental materials and their composite application on saline-alkali soil

JIN Meng-ye¹, HUANG Juan², HOU Pin¹, HUANG Zhan-bin^{1*}

(1. College of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Shenzhen Tiehan Ecological Environment Co. Ltd., Shenzhen 518040, China)

Abstract: In order to develop novel organic-inorganic composite materials to improve the capacity of saline-alkali soil, this study used a soil column leaching simulation method and analyzed the effects of desulfurization gypsum, modified humic acid, polymer materials, and composite materials on improving the physical and chemical properties of saline-alkali soil; the material improvement mechanism was also investigated. The results showed that compared with the control without any additional material, desulfurization gypsum significantly decreased the pH and sodium adsorption ratio (SAR) of saline-alkali soil by 7.46% and 37.7%, respectively. The modified humic acid decreased the water-soluble salt content of saline-alkali soil by 64.61% after leaching. The polymer material significantly enhanced the water-retaining effect of saline-soil, and the volume of saline-alkali leaching decreased by 33.1%. The amount of aggregates in leached saline-alkali soil treated with the three kinds of composite materials increased by 20.41%, while the pH and SAR decreased by 0.81% and 26.23%, respectively. The result show that the three materials can improve the physical and chemical properties of saline-alkali soil as well as the soil structure.

Keywords: saline-alkali soil; pH; sodium adsorption ratio; desulfurization gypsum; environmental materials

收稿日期: 2019-08-08 录用日期: 2019-10-10

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: jinmengye951015@163.com

*通信作者: 黄占斌 E-mail: Zbhuang2003@163.com

基金项目: 深圳市铁汉生态环境股份有限公司项目“矿区植被恢复多功能土壤调理剂研制与应用研究”(THRD017); 国家自然科学基金项目(41571303)

Project supported: Shenzhen Tiehan Ecological Environment Co. Ltd “Development and Application of Multifunctional Soil Conditioner for Vegetation Restoration in Mining Area”(THRD017); The National Natural Science Foundation of China(41571303)

盐碱土壤广泛分布在世界较干旱区域和沿海平原地区,是重要的后备耕地资源^[1]。据全国第二次土壤普查数据显示,我国盐碱土壤总面积约为991万 hm^2 ,占我国土壤总面积的10%,而我国人均耕地面积远低于世界水平^[2]。滨海盐碱地是我国盐碱地的主要类型之一,该地主要受海水的影响,季节返盐现象较高。盐碱地的土壤含盐量高则会导致土壤发生板结、孔隙度减小、通透性差、土壤养分与有机质含量低等问题^[3-4],造成农作物的品质和产量下降^[5],这已经成为阻碍农业经济发展的重要因素。

目前,国内外在盐碱地改良方面进行了大量研究,应用的改良技术主要有物理、化学、生物和水利工程等措施^[6-7]。化学措施在盐碱土壤改良的应用中较为广泛,研究表明,利用化学措施使用改良剂可以快速降低盐碱土壤的钠吸附比(SAR),增大土壤孔隙度,减少土壤中可溶性 Na^+ 含量,加快土壤中盐分的淋洗^[8]。但以往研究中只重视盐碱化土壤的“脱盐过程”^[9],在盐碱土壤结构改良、肥力提升及灌溉排水结合方面重视不足,导致在脱盐过程完成后地下水位升高时,盐分会再次返到土壤表层,造成土壤二次盐碱化,极大影响盐碱化土壤的改良效果。

采用不同功能的环境材料复合是目前盐碱土壤改良材料研发的重要方向,特别是将具有土壤脱盐功能和改善土壤理化性质功能的材料复合施用,同时达到盐分淋洗和改良土壤结构的目的。环境材料是具有最小环境负荷和最大使用功能的一类材料^[9],其三大特性是功能性、环保性和经济性^[10],这种理念的材料在盐碱土壤改良材料的选择中备受关注,其中腐植酸、脱硫石膏和高分子材料颇受重视。腐植酸(Humic Acid, HA)是广泛存在于自然界中的一类有机化合物,其含有的活性官能团具有离子交换和络合能力^[11],易于与盐碱土壤中的离子发生离子交换作用。另外,腐植酸分子结构中的基团还可与离子发生络合作用,促进土壤团聚体的形成^[12]。通过物理或化学方法改性后的腐植酸有更高的比表面积和活性,具有更强的吸附作用和螯合作用。脱硫石膏是燃煤电厂烟气脱硫产生的废弃物,主要成分是 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。大量试验研究^[13-14]证明,脱硫石膏能够降低盐碱土壤中的碱化度pH和含盐量。高分子材料是一种阴离子线型化合物在水中溶解形成的展开式链状结构,能够促进土壤团聚体结构的形成,增强土壤的吸水、保水性能并促进植物生长^[15-16]。张开祥等^[17]研究发现,施加腐植酸-聚丙烯酰胺复合材料能够改善土壤理化性

质,促进酸枣种子萌发。王明华等^[18]研究发现,石膏与聚丙烯酰胺材料按一定的比例复合后能够降低植物体内 Na^+ 含量,增强幼苗的酶活性。张伶俐等^[19]通过在山东地区土壤中施用脱硫石膏与腐植酸复合成的材料,降低了土壤的pH值且增加了玉米产量。目前,对盐碱土壤的改良方向主要集中在脱盐和增强土壤酶活性方面,而对土壤结构改良和化学性能改良等综合研究相对较少。本研究基于不同材料的功能互补和环境材料的特性,以天津滨海盐碱土为研究对象,采用土柱淋溶试验方法,将改性腐植酸、脱硫石膏和高分子材料及其复合材料对盐碱土壤改良的效果进行比较分析,为滨海盐碱土壤改良提供应用依据。

1 材料及方法

1.1 材料

供试土壤采自天津市宁河区玉米良种场农田0~20 cm表层土,其pH为8.10,水溶性 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量分别为660、90、60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, SAR为2.1,碱化度(ESP)为18.04,含盐量为0.32%,属于中等盐碱化土壤。土壤从田间取回,自然风干后过5 mm筛备用。

改性腐植酸由山西丰联农业有限公司提供,其总HA含量 $\geq 50\%$, pH为8.52, EC为109.45 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$;脱硫石膏由河北建投任丘热电有限公司提供, pH为6.70, EC为43.61 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,其主要成分 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的含量为91.32%;高分子材料由北京金元易生态环境产业股份有限公司提供,其为线性阴离子型聚丙烯酰胺,白色颗粒,60~80目的水溶性材料。

1.2 试验装置

试验淋溶装置由有机玻璃和玻璃土柱架构成(图1)。淋溶柱的最顶端和最底端各放置一块带有小孔的有机玻璃滤板,为防止漏土,滤板上放置两层200目的纱布。每个土柱内装入500 g风干土壤和环境材料的混合物,表面覆盖少量石英砂(约4 g, 0.5 cm厚),以保证淋洗土壤的稳定性,防止扰乱表层土层。

土壤水分淋溶前,加200 mL去离子水使土壤水分接近田间最大持水量,室温下放置1 d,使土壤与改良剂充分反应。首次淋溶前将淋溶柱底端用止水夹夹住,加入200 mL去离子水,反应3 h后,打开止水夹,收集24 h淋溶液。将淋溶柱放在室温条件下自然蒸发4 d后称质量,至土壤含水率降到60%左右进行第二次淋溶,淋溶过程与首次相同。试验用水为去离子水, pH为6.73, EC为0.61 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

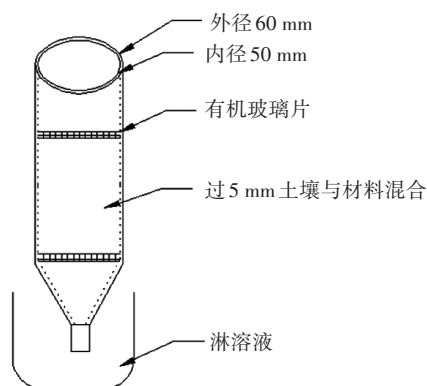


图1 土柱淋溶模拟试验装置

Figure 1 The equipment of soil column leaching experiment

1.3 试验设计

以课题组前期研究结果为基础^[20],采用单因素优选法,分析三种环境材料及其复合施用对盐碱土壤的改良机制。单施材料脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料的添加量分别为土壤干质量的15.00%、1.50%、0.03%;复合材料的添加比例为脱硫石膏:改性腐植酸:高分子材料=30:3:0.06,总添加量为土壤干质量的0.80%,其pH为7.40, Ca^{2+} 含量为23.00%;另设不添加任何材料的盐碱土壤作为对照(CK)。共5个处理,每个处理设3个重复。

1.4 测定指标与方法

淋溶液体积采用量筒法测定;pH采用玻璃电极法测定(LY/T 1239—1999); Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量采用ICP-MS(NexlON 300D,美国PerkinElmer公司)测定;土壤水溶性含盐量采用烘干法测定;土壤水稳定性团聚体采用团聚体分析仪测定(TTF-100,北京同德创业科技有限公司);SAR是衡量土壤碱化度的重要指标,计算公式为:

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

试验所获得的数据用Origin 2018进行绘图。所研究数据用SPSS 19.0软件进行方差分析。

2 结果与分析

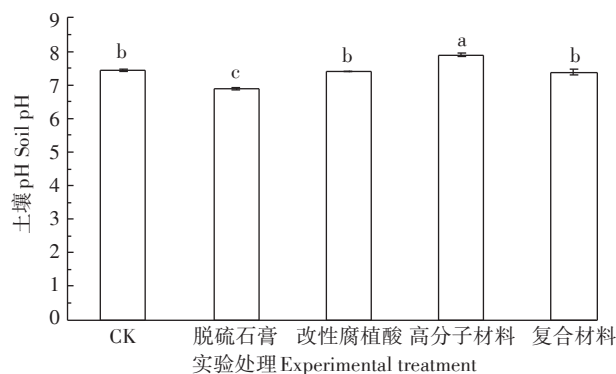
2.1 不同环境材料对土柱淋溶后盐碱土壤pH的影响

pH可反映盐碱化土壤酸碱程度,若盐碱化土壤的pH较高,则其含有的 CaCO_3 不能溶解,会与盐碱土壤中的P发生化学反应,将P固定,导致植物缺P。添加脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料及其复合材料淋溶后盐碱土壤pH的变化如图2所示。与CK相比,添加脱硫石膏、改性腐植酸及复合材料处理,淋溶后

的盐碱土壤pH降幅为0.67%~7.46%,其中添加脱硫石膏淋溶后土壤pH降至6.89,与CK达到显著差异($P<0.05$);添加高分子材料处理,淋溶后盐碱土壤pH较CK增加了6.12%。实验结果表明,单施脱硫石膏对降低淋溶后盐碱土壤的pH效果最显著,其次是复合材料处理组。

2.2 不同环境材料对土柱淋溶后盐碱土壤SAR的影响

盐碱土壤的形成是土壤胶体吸附 Na^+ 的过程,也是土壤固相和液相间阳离子相互交换的过程。由图3可知,与CK相比,添加脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料及复合材料淋溶后,盐碱土壤的SAR均有不同程度的下降,分别降低了37.70%、1.64%、7.10%、26.23%,脱硫石膏处理组对降低土壤SAR值达到了显著水平($P<0.05$),说明单施脱硫石膏对降低淋溶后盐碱土壤SAR效果最优,其次是复合材料处理组。



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 不同环境材料对淋溶后土壤pH的影响

Figure 2 The effects of different environmental materials on pH of leaching solution

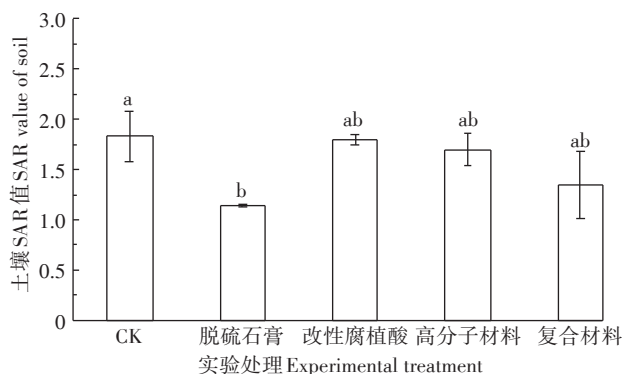


图3 不同环境材料对土壤SAR值的影响

Figure 3 The effects of different environmental materials on soil SAR values

2.3 不同环境材料对土柱淋溶后盐碱土壤水溶性盐总量的影响

含盐量是盐碱土壤的重要属性。盐碱土壤中的钠盐含量较高,使土壤与植物间的渗透压失衡,导致植物生理干旱而吸水困难,枯萎甚至死亡。添加环境材料对盐碱土壤中水溶性盐总量的影响如图4所示。在盐碱土壤中加入改性腐植酸、高分子材料淋溶后,盐碱土壤的含盐总量分别降低至0.42、1.17 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,脱硫石膏处理和复合材料处理的土壤含盐量分别增加至8.66、5.59 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明单施改性腐植酸和高分子材料可降低淋溶后盐碱土壤的水溶性,其中,与CK相比,改性腐植酸对土壤水溶性盐的降低达到了显著水平,脱硫石膏和复合材料处理组能够增加淋溶后盐碱土壤的水溶性盐含量。

2.4 不同环境材料对盐碱土壤水分保持的影响

淋溶液体体积即能表示土壤的保水能力,盐碱化土壤的保水能力较差,导致土壤发生板结现象,影响植

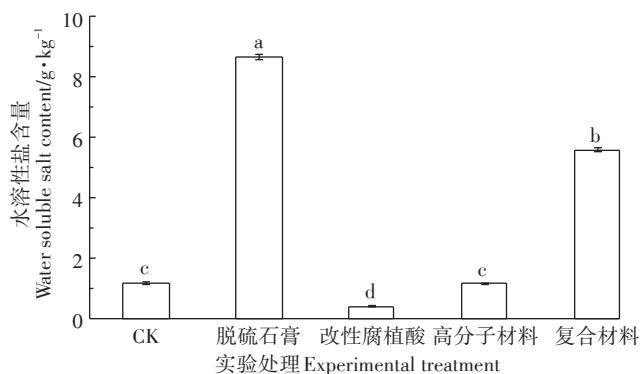


图4 不同环境材料对土壤含盐量的影响

Figure 4 The effects of different environmental materials on soil salt content

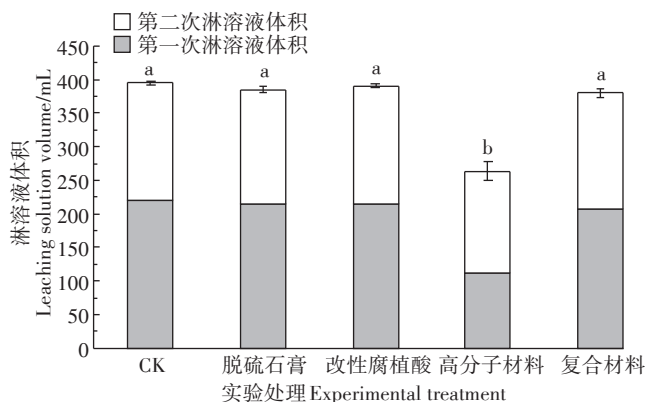


图5 环境材料对土壤水分保持的影响

Figure 5 The effects of environmental materials on soil water conservation

物的生长。不同环境材料对土壤水分保持的影响见图5。添加脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料、复合材料后,第一次收集的淋溶液体体积分别比CK减少了2.27%、2.73%、49.09%、6.36%。第二次淋溶过程中,添加脱硫石膏、改性腐植酸、复合材料的处理组淋溶液体体积与CK没有明显差异,但高分子材料处理组淋溶液体体积较CK减少了13.14%。说明单施高分子材料对盐碱土壤保持水分效果最好,其次是复合材料处理组。

2.5 不同环境材料对土柱淋溶后盐碱土壤水稳定性团聚体的影响

土壤团聚体是良好的土壤结构体,对调节土壤水、气、温起到重要作用,盐碱土壤中大于0.25 mm的土壤团聚体数量较少,导致土壤发生板结现象,影响植物对营养成分的吸收。不同环境材料对盐碱土壤各级土壤团聚体的影响见表1。施加环境材料后盐碱土壤中大于0.25 mm的团聚体含量呈增加趋势,说明添加环境材料能够促进盐碱土壤中团聚体结构的形成,且各处理中0.25~0.5 mm的土壤团聚体的比例显著增加。与CK相比,添加脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料及复合材料淋溶后盐碱土壤团聚体含量分别增加了0.83%、9.48%、15.70%、20.41%。

3 讨论

盐碱土壤中 Na^+ 含量较高,造成土壤黏重、透气透水性差等现象,一般通过增加土壤中的 Ca^{2+} 浓度,置换土壤表面交换位点上的 Na^+ ,加之淋洗作用使 Na^+ 排出^[21],且 Ca^{2+} 与盐碱土壤中的 HCO_3^- 反应可降低土壤的pH。本试验结果也表明(图2),添加含 Ca^{2+} 的脱硫石膏对降低土壤pH有显著效果,且在一定范围内土壤淋溶液pH的降低与脱硫石膏添加量呈正相关。这主要是因为脱硫石膏含有的 Ca^{2+} 能够将土壤胶体中的 Na^+ 置换出来, Na^+ 与水和 CO_2 反应生成 NaHCO_3 , CaSO_4 与 NaHCO_3 反应生成 Na_2SO_4 和 CaCO_3 ^[22],有利于土壤pH向中性转化,这与Smaoui-Jardak等^[23]的研究结果一致。本研究发现,添加脱硫石膏对降低土壤SAR值效果显著(图3),这是由于脱硫石膏中提供的 Ca^{2+} 在土壤溶液中能够与交换性 Na^+ 发生置换反应^[24],由SAR值定义式可知:SAR值与土壤中的 Ca^{2+} 含量成反比,与 Na^+ 含量成正比。由于土壤中 Na^+ 含量降低,且脱硫石膏水溶条件下 Ca^{2+} 含量增加,因此导致土壤SAR值降低;另外,改性腐植酸可改善土壤结构,增强土壤透水性能,有利于 Na^+ 溶出,降低土壤SAR值,这与秦萍等^[25]、

表1 不同环境材料处理对土壤团聚体含量影响(%)

Table 1 The effects of different environmental materials on soil aggregate content (%)

处理 Treatments	大于0.25 mm团聚体含量 The contents of aggregates greater than 0.25 mm			
	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	>2 mm
CK	18.90±0.01c	24.00±0.03a	8.00±0.02ab	2.00±0.01b
脱硫石膏	27.01±0.02b	19.00±0.01b	5.00±0.02b	1.95±0.01b
改性腐植酸	34.81±0.02a	12.00±0.01c	8.00±0.02ab	2.11±0.01b
高分子材料	29.14±0.04ab	13.00±0.01c	12.00±0.01a	6.64±0.02a
复合材料	32.14±0.01a	22.00±0.01ab	6.00±0.03b	3.12±0.01b

注:同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Values followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments at 0.05 level.

Nan等^[26]的研究结果一致。

盐碱土壤改良的目的之一是降低土壤含盐量,尤其是 Na^+ 含量。大量研究表明,施用脱硫石膏能够降低盐碱土壤的可溶性盐含量^[27-28],这与本试验的结果相反。这一方面可能是由于脱硫石膏导致土壤中盐离子含量升高,尽管能随淋溶流失,但土壤中尚存大量可交换态盐离子,遇水将很快随水排出土壤^[29];另一方面是,在添加脱硫石膏后土壤中发生置换作用,土壤中的 Na^+ 含量降低,因此,淋溶后的盐碱土壤中的盐类成分由对植物结构和组织有害的钠盐,转变成对植物细胞膜合成有利的钙盐^[30]。研究结果发现(图4),施用改性腐植酸和高分子材料能够降低淋溶后盐碱土壤的水溶性盐含量,改性腐植酸含有的活性官能团具有吸附、螯合作用,可通过促进土壤中团聚体的形成提高土壤的通透性,加快土壤中盐分的淋洗,降低土壤中水溶性盐总量^[31],这与王倩姿等^[32]的研究结果一致。高分子材料是阴离子线性材料,在土壤中遇水后分子链逐渐展开,将周围的土壤颗粒凝聚,形成土壤大团聚体,改善土壤结构,增大土壤孔隙度,降低土壤中含盐量,本研究结果与王春霞等^[33]的研究结果一致。

盐碱土壤中水分含量低、大于0.25 mm土壤团聚体含量少是影响植物生长的主要因素。本试验结果表明(图5、表1),高分子材料对土壤水分保持具有较好的效果,这主要是因为其含有的酰胺基容易与水分子在土壤胶体表面结合,促进高分子网束展开,结合网束内的亲水离子,造成渗透压的不平衡,水分子流入网内且自身运动受到压力限制,从而减少土壤水分流失,这在李佳佳等^[34]、刘洋等^[35]的研究中都有论证。与CK相比,复合材料对土壤中团聚体含量增加的效果最优,这主要是因为高分子材料呈链状结构,盐碱土壤中的盐离子能够使分子链发生卷曲,影响链端吸

附小于0.25 mm颗粒的能力^[36],而且高分子材料结构中含有酰胺基等基团,可通过形成氢键实现凝聚作用^[37]。高分子聚合物以吸附、缠绕、贯穿等方式捕捉分散土粒,从而使之凝聚成团粒,故能吸附粒径在0.25~0.5 mm的团聚体^[38]。此外,氨化腐植酸含有羟基、羧基等活性官能团,易于与土壤中的离子发生络合作用,促进土壤团聚体的形成^[39]。因此,将高分子材料与氨化腐植酸复合施用对土壤团聚体结构的形成有更好的效果。

4 结论

(1)土柱淋溶试验表明,脱硫石膏、改性腐植酸、高分子材料和复合材料对盐碱土壤改良均有一定效果,但对盐碱土壤的改良机制不同。脱硫石膏能够降低盐碱土壤pH和土壤SAR值;高分子材料能够增强盐碱土壤水分保持效果,促进土壤团聚体结构的形成;改性腐植酸主要作用是降低盐碱土壤中水溶性含盐量。

(2)三种环境材料的复合材料能够显著促进盐碱土壤中团聚体的形成,其协同作用能够改变盐碱土壤理化性质,特别是能够改良土壤结构,防止土壤二次返盐,提高盐碱土壤改良的效果。

参考文献:

- [1] Lin J, Yu D, Shi Y, et al. Salt-alkali tolerance during germination and establishment of *Leymus chinensis* in the Songnen Grassland of China [J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 763-769.
- [2] 王遵亲,等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 573.
WANG Zun-qin, et al. China saline soil[M]. Beijing: Science Press, 1993: 573.
- [3] 马桂秀, 林治安, 李志杰, 等. 有机物料与化肥配施改良盐碱耕地的效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 69-75.
MA Gui-xiu, LIN Zhi-an, LI Zhi-jie, et al. Effect of combination of or-

- ganic material and chemical fertilizer on the improvement of saline soil [J]. *Soil and Fertilizer Science in China*, 2019(3):69-75.
- [4] 赖羽寒. 施用PAM对天津滨海吹填土改良效果的研究[D]. 重庆:西南大学, 2014.
- LAI Yu-han. Effects of PAM applied to dredger fill in Tianjin coastal region[D]. Chongqing:Southwest University, 2014.
- [5] Wang J, Yao L, Li B, et al. Comparative proteomic analysis of cultured suspension cells of the halophyte *Halogeton glomeratus* by iTRAQ provides insights into response mechanisms to salt stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7(30):110.
- [6] 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.
- [7] Luo S, Wang S, Lei T, et al. Aggregate-related changes in soil microbial communities under different ameliorant applications in saline-sodic soils[J]. *Geoderma*, 2018, 329:108-117.
- [8] 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. Effect of biochar and FGD-gypsum application on soil basic physical and chemical properties and maize growth of saline soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(9):5291-5297.
- [9] 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.
- [10] 黄占斌, 孙在金. 环境材料在农业生产及其环境治理中的应用[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1):88-95.
- HUANG Zhan-bin, SUN Zai-jin. Application of environmental materials in agricultural production and environmental treatment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1):88-95.
- [11] 李仲谨, 李铭杰, 王海峰, 等. 腐植酸类物质应用研究进展[J]. *化学研究*, 2009, 20(4):103-107.
- LI Zhong-jin, LI Ming-jie, WANG Hai-feng, et al. Progress in applied research of humic acids substance[J]. *Chemical Research*, 2009, 20(4):103-107.
- [12] 穆金丽, 谭 钧, 刘国顺, 等. 腐植酸和氮肥用量及其互作对植烟土壤质量的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(1):27-32.
- MU Jin-li, TAN Jun, LIU Guo-shun, et al. Effects of humic acid and nitrogen levels and their interaction on tobacco planting soil quality [J]. *Soils*, 2017, 49(1):27-32.
- [13] 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 Agricultural Sciences*, 2016, 29(6):1381-1386.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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 soda saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(11):2966-2973.
- [19] 张铃波, 陈广锋, 田晓红, 等. 盐碱土石膏与有机物料组合对作物产量与籽粒养分含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(12):12-17.
- ZHANG Ling-bo, CHEN Guang-feng, TIAN Xiao-hong, et al. Effects of combined application of gypsum and organic materials on crop yield and grain nutrient content in saline-alkali soil[J]. *China Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(12):12-17.
- [20] 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.
- [21] Yazdanpanah 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.
- [22] 毛玉梅, 李小平. 烟气脱硫石膏对滨海滩涂盐碱地的改良效果研究[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1):225-231.
- MAO Yu-mei, LI Xiao-ping. Amelioration of flue gas desulfurization

- gypsum on saline-sodic soil of tidal flats and its effects on plant growth[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(1):225-231.
- [23] Smaoui-jardak 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.
- [24] 王丹, 黄超, 李小东, 等. 脱硫石膏配施不同量有机物料对盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(1):34-40.
- WANG Dan, HUANG Chao, LI Xiao-dong, et al. Effects of different amount of organic materials combined with desulfurized gypsum on soil improvement and crop yield in saline-sodic soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1):34-40.
- [25] 秦萍, 张俊华, 孙兆军, 等. 土壤结构改良剂对重度碱化盐土的改良效果[J]. 土壤通报, 2019, 50(2):414-421.
- QIN Ping, ZHANG Jun-hua, SUN Zhao-jun, et al. Effects of soil structural amendments on the improvement of highly alkalize solonchaks[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(2):414-421.
- [26] 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.
- [27] 刘娟, 张风华, 李小东, 等. 滴灌条件下脱硫石膏对盐碱土改良效果及安全性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11):87-93.
- LIU Juan, ZHANG Feng-hua, LI Xiao-dong, et al. Effects of gas desulfurization gypsum on the saline soil improvement and security under drip irrigation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(11):87-93.
- [28] 石婧, 黄超, 刘娟, 等. 脱硫石膏不同施用量对新疆盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(6):1800-1807.
- SHI Jing, HUANG Chao, LIU Juan, et al. Effects of different application amount of flue gas desulfurization gypsum on amelioration of saline-alkali soil and crop yield in Xinjiang, China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(6):1800-1807.
- [29] 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 the Yellow River Delta[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):186-190.
- [30] 李凤霞, 杨涓, 许兴, 等. 烟气脱硫废弃物在盐碱地土壤改良中的应用研究进展[J]. 土壤, 2010, 42(3):352-357.
- LI Feng-xia, YANG Juan, XU Xing, et al. Research advances on alkaline soil improvement by flue gas desulfurization byproducts[J]. *Soils*, 2010, 42(3):352-357.
- [31] Calvo P, Nelson L, Kloepper J W. Agricultural uses of plant biostimulants[J]. *Plant & Soil*, 2014, 383(1/2):3-41.
- [32] 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.
- [33] 王春霞, 王全九, 吕廷波, 等. 添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):31-35.
- WANG Chun-xia, WANG Quan-jiu, LÜ Ting-bo, et al. The studies of infiltration characteristics on sandy saline alkali soil by chemical amelioration[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):31-35.
- [34] 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 soil[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2010, 32(3):93-97.
- [35] 刘洋, 龙凤, 李绍才, 等. 保水剂和PAM对人工土壤颗粒水分蒸发的影响[J]. 中国水土保持, 2015(2):44-47.
- LIU Yang, LONG feng, LI Shao-cai, et al. Effects of water retaining agents and PAM on evaporation of particulate water in artificial soils[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(2):44-47.
- [36] 马鑫. 聚丙烯酰胺对盐渍化土壤物理和水力特性的影响及机理研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2014.
- MA Xin. The study on effect and mechanism of polyacrylamide on physical and hydraulic characteristic of saline soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [37] 员学锋, 汪有科, 吴普特, 等. PAM对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2):37-40.
- YUAN Xue-feng, WANG You-ke, WU Pu-te, et al. Effects and mechanism of PAM on soil physical characteristics[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2):37-40.
- [38] 龙明杰, 张宏伟, 陈志泉, 等. 高聚物对土壤结构改良的研究Ⅲ. 聚丙烯酰胺对赤红壤的改良研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(1):9-13.
- LONG Ming-jie, ZHANG Hong-wei, CHEN Zhi-quan, et al. Studies on polymeric soil structure amendments Ⅲ. Amelioration to lateritic red soil by polyacrylamide[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1):9-13.
- [39] Zhong X, Li J, Li X, et al. Physical protection by soil aggregates stabilizes soil organic carbon under simulated N deposition in a subtropical forest of China[J]. *Geoderma*, 2017, 285:323-332.