

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.05.019

唐雪, 尚辉, 刘广明, 等. 复合改良剂对盐碱土改良及植物生长的影响. 土壤, 2021, 53(5): 1033–1039.

## 复合改良剂对盐碱土改良及植物生长的影响<sup>①</sup>

唐雪<sup>1,2</sup>, 尚辉<sup>3</sup>, 刘广明<sup>1\*</sup>, 姚宇阆<sup>4\*</sup>, 张凤华<sup>5</sup>, 杨劲松<sup>1</sup>, 周龙祥<sup>3</sup>, 储睿<sup>3</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 江苏省沿海开发(东台)有限公司, 江苏东台 224237; 4 江苏沿海开发集团有限公司, 南京 210019; 5 石河子大学农学院, 新疆石河子 832003)

**摘要:** 为探寻更加高效的复合型改良剂, 以为盐碱地改良与合理利用提供参考, 通过田间试验, 探讨了脱硫石膏、黄腐酸钾和稻壳 3 种物料不同配比施用对盐碱土理化性质及植物生长的影响, 筛选最佳复合物料添加比例。结果表明: 与对照组相比, 不同物料配比处理下 0~20 和 20~40 cm 土壤 pH 均有显著降低, 分别降低了 3.1%~9.0% 和 4.1%~8.5%; 0~20 cm 土层的土壤盐分含量也显著降低, 土壤中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 含量分别降低了 6.1%~39.4%、18.0%~34.1% 和 2.7%~33.6%, 其中稻壳、黄腐酸钾和脱硫石膏配比为 5-1.2-9 t/hm<sup>2</sup> 和 15-0.4-9 t/hm<sup>2</sup> 时对 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 降低效果最为明显; 不同物料配比复合改良剂均能提高土壤有机质、碱解氮、有效磷含量与景天植株生物量, 与对照组相比, 有机质增加了 3.0%~45.8%、碱解氮增加了 16.1%~111.8%、有效磷增加了 59.5%~154.8%、景天生物量增加了 7.1%~47.6%。效应综合评价的主成分分析结果表明, 稻壳、黄腐酸钾和脱硫石膏配比为 5-1.2-9 t/hm<sup>2</sup> 是滨海盐碱土最适宜的生物化学复合改良剂组分。

**关键词:** 盐碱土; 土壤改良; 土壤理化性质; 复合改良剂

**中图分类号:** S156.4 **文献标志码:** A

### Effects of Combined Amendment on Improvement of Salinized Soil and Plant Growth

TANG Xue<sup>1,2</sup>, SHANG Hui<sup>3</sup>, LIU Guangming<sup>1\*</sup>, YAO Yutian<sup>4\*</sup>, ZHANG Fenghua<sup>5</sup>, YANG Jingsong<sup>1</sup>, ZHOU Longxiang<sup>3</sup>, CHU Rui<sup>3</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Jiangsu Coast Development (Dongtai) Co., Ltd., Dongtai, Jiangsu 224237, China; 4 Jiangsu Coast Development Group Co., Ltd., Nanjing 210019, China; 5 College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** In order to find a more efficient compound amendment, this study analyzed soil physiochemical properties and plant growth indicators by a field experiment and investigated the effects of mixed amendments of desulfurized gypsum, potassium fulvate and rice husk. The results showed that compared to CK, soil pH in 0–20 cm and 20–40 cm were reduced significantly, by 3.4%–9.0% and 4.1%–8.5%. After applying composite modifier, soil salt contents decreased, and the concentrations of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup> were decreased by 6.1%–39.4%, 18.0%–34.1% and 2.7%–33.6%, respectively. Among them, when the ratio of rice husk, potassium fulvic acid and desulfurized gypsum was 5 : 1.2 : 9 t/hm<sup>2</sup> and 15 : 0.4 : 9 t/hm<sup>2</sup>, the reduction effects of HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> and Na<sup>+</sup> were most obvious. Compared with CK, the contents of soil organic matter, available nitrogen, available phosphorus and the yield of plant were increased by 3.0%–45.8%, 16.1%–111.8%, 59.5%–154.8% and 7.1%–47.6%, respectively. Principal component analysis of evaluation on comprehensive effect proved that the optimal ratio of rice husk, potassium fulvic acid and desulfurized gypsum is 5 : 1.2 : 9 t/hm<sup>2</sup> for biochemical compound modifiers on coastal saline-alkali soil.

**Key words:** Coastal saline soil; Soil improvement; Soil physical and chemical properties; Compound amendment

我国滨海盐碱土面积约为  $1.06 \times 10^6$  hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>, 是我国重要的后备土地资源。滨海盐碱土地处海陆之交, 具有土壤含盐量高、结构性差、土壤肥力低、生态环境恶劣的特点, 严重制约我国滨海地区农林业发展<sup>[2-3]</sup>。

①基金项目: 国家自然科学基金委员会-山东联合基金重点项目(U1806215), 新疆生产建设兵团科技攻关项目(2019AB038)和江苏省重点研发计划项目(BE2018759)资助。

\* 通讯作者(gmliu@issas.ac.cn; yaoyt@126.com)

作者简介: 唐雪(1995—), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事盐碱土壤资源生态高效利用方面的研究。E-mail:tangxue@issas.ac.cn

近年来,城市化进程加快、用地规模扩大,导致耕地面积不断减少、污染加剧、环境破坏,使得我国人口、粮食与耕地之间的矛盾日趋尖锐。因此,东部沿海地区的盐碱化土壤治理和利用是缓解人地矛盾的关键,如何改善土壤结构、降低土壤盐分、防控土壤盐碱危害、提高土壤环境质量是目前需要迫切解决的关键科学问题。

盐碱土壤资源的改良是“改性”扩量的重要手段,土壤水盐状态的调节、土壤保肥能力的提升、作物生长的促进、作物高产的实现是保证盐碱地生产力可持续发展的基础。已有研究表明,化学改良可以通过离子取代、络合和螯合作用,改善土壤理化性质,增加阳离子交换量,缓解盐胁迫对作物生长的抑制作用。其中,脱硫石膏、黄腐酸钾、稻壳作为 3 种常用的改良剂,能够提高盐分淋洗效率<sup>[4-6]</sup>,调节土壤 pH<sup>[7-8]</sup>,增加土壤孔隙度<sup>[9]</sup>。已有研究证明,脱硫石膏是改良盐碱土壤的最有效措施之一,且有害重金属含量低,对农田不会造成有害影响<sup>[10]</sup>。脱硫石膏作为一种钙质改良剂,通过其所含的  $\text{Ca}^{2+}$  置换土壤胶体中的  $\text{Na}^+$ ,促进盐分淋洗,降低土壤交换性钠百分率(ESP)和钠离子吸附比(SAR),起到改善盐碱土的作用<sup>[11-12]</sup>。黄腐酸钾作为腐殖酸肥料的一种,可溶性较强,可以改善土壤理化性质,增加土壤团聚体含量,改善土壤结构,此外还可以提高作物产量和抗逆性,因此广泛用于土壤改良中<sup>[13]</sup>。王相平等<sup>[14]</sup>研究发现,施用黄腐酸后,土壤盐分含量降低,有机质含量升高,土壤酶活性参数提高,土壤性质得到改善,棉花产量也得到提高。张济世等<sup>[15]</sup>研究发现,施用腐殖酸后,土壤 pH 降低了 0.1 个单位,土壤结构得到改善,促进盐分淋洗。稻壳质地疏松、透气性好,能增强土壤的保水能力,并且稻壳含有丰富的碳源,施入土壤中可以增加土壤养分含量,促进植物对速效营养元素的有效吸收,减少肥料施用量,实现农业废弃资源的回收利用,可从源头上减少农业生产造成的面源污染<sup>[16-17]</sup>。高中超等<sup>[9]</sup>研究发现,稻壳深施可降低苏打盐碱土的容重,提高土壤孔隙度,苜蓿产量提高 25.4% 以上。徐素峰<sup>[18]</sup>研究发现,盐碱土覆盖稻壳后,表层土壤 pH 降低 0.12 个单位,电导率降低 22%,苹果产量、品质均得到提升。王潇等<sup>[19]</sup>在苏北滨海盐碱土上掺入一定量的稻壳炭,发现土壤的含盐量与容重降低,有机质含量提高,有效磷、水溶性氮等养分增加,植物成活率提高。上述研究已经表明,脱硫石膏、稻壳和黄腐酸钾对盐碱土改良具有提升效应,但盐碱土往往是多种障碍协同出现,比如孔隙结构差,含盐量高及土壤养分贫瘠

等<sup>[1,6]</sup>。已有研究表明,脱硫石膏单一施用时易渗漏,利用率低,而黄腐酸钾可以增大脱硫石膏的溶解度,使离子代换更加彻底,并且与两者单一施用相比,脱硫石膏与腐殖酸混合施用时,盐碱土的代换性钠和钠离子吸附比均显著降低,石膏利用率提高<sup>[7,20-21]</sup>。

鉴于以往研究主要集中在单一改良剂对盐碱土的改良,而对多元化、复合型改良剂的改良效果研究较少,本研究拟通过探讨脱硫石膏、黄腐酸钾和稻壳三种物料不同配比施用对滨海盐碱土理化性质及景天生长的影响,筛选最适宜的复合型改良剂,为滨海盐碱土的可持续开发利用提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于江苏省启东市盐生植物园境内(121°25'40"~121°54'30"E,31°41'06"~32°16'19"N),属于亚热带季风性湿润气候,年均气温 15 °C,年均降雨量 1 155 mm。试验地距海岸线直线距离 2.1 km,地下水水位高,矿化度高,土壤为典型滨海盐渍土,盐渍化程度较高,土壤结构较差,极易板结,土壤养分含量低,肥力差。0~20 cm 土层土壤全盐含量 5.6 g/kg,容重 1.47 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量 3.28 g/kg,碱解氮含量 18.5 mg/kg,有效磷含量 20.3 mg/kg,速效钾含量 74 mg/kg,土壤质地为粉砂性土。

### 1.2 试验设计与田间管理

本试验采用脱硫石膏(G)、黄腐酸钾(H)和稻壳(R)3 种物料。脱硫石膏由上海宏畅新型建材有限公司提供;黄腐酸钾由河南银海化工有限公司提供,黄腐酸含量 55%;稻壳为当地生产的水稻壳。基于正交试验设计,按照三因素、三水平选择 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)正交表,共设 10 个处理,具体试验设计如表 1 所示。

表 1 试验处理及配方(t/hm<sup>2</sup>)  
Table 1 Experimental treatment and formula

处理	用量		
	稻壳	黄腐酸钾	脱硫石膏
CK	0	0	0
R <sub>1</sub> H <sub>1</sub> G <sub>1</sub>	5	0.4	3
R <sub>1</sub> H <sub>2</sub> G <sub>2</sub>	5	0.8	6
R <sub>1</sub> H <sub>3</sub> G <sub>3</sub>	5	1.2	9
R <sub>2</sub> H <sub>1</sub> G <sub>2</sub>	10	0.4	6
R <sub>2</sub> H <sub>2</sub> G <sub>3</sub>	10	0.8	9
R <sub>2</sub> H <sub>3</sub> G <sub>1</sub>	10	1.2	3
R <sub>3</sub> H <sub>1</sub> G <sub>3</sub>	15	0.4	9
R <sub>3</sub> H <sub>2</sub> G <sub>1</sub>	15	0.8	3
R <sub>3</sub> H <sub>3</sub> G <sub>2</sub>	15	1.2	6

试验开始前，将改良剂撒至土壤表面，随后翻耕平整土地，翻耕后改良剂与 0~20 cm 土层的土壤混合均匀。每个处理 3 次重复，随机区组排列，每个小区面积 4 m×2.5 m=10 m<sup>2</sup>。2019 年 3 月，田间种植一年生景天，生育期内氮肥、磷肥作基肥施入，磷酸氢二铵用量 150 kg/hm<sup>2</sup>，尿素用量 450 kg/hm<sup>2</sup>，其他管理措施与当地的常规管理模式相同。

### 1.3 样品采集与测定

试验开始前采集 0~20 cm 土层土壤测定基本理化性质；试验结束后(2019 年 10 月)采集 0~20 cm 以及 20~40 cm 土层土壤样品，每个小区取 3 个点并混匀，晾晒风干后带回实验室处理，测定土壤理化性质指标。植株收获时，采集小区内所有的植株，晒干并于 70℃ 下烘干至恒重，测定干物质量，记为生物量。

土壤电导率与 pH 测定采用 1:5 土水质量比电导法和电极法；土壤离子组成测定：HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 采用双指示剂中和滴定法，Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 采用 EDTA 络合滴定法，Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 采用火焰光度法，Cl<sup>-</sup> 采用硝酸盐滴定法，SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 采用 EDTA 间接络合滴定法；有机质测定采用重铬酸钾容量法，碱解氮测定采用碱解扩散法，有效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法。

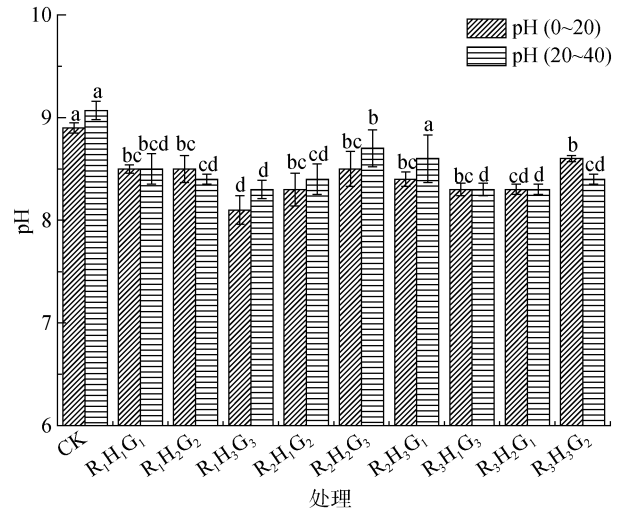
### 1.4 数据处理及分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行处理，采用 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行分析，不同处理间的差异显著性水平运用邓肯(Duncan)法进行多重比较。采用 Origin 2016 软件进行作图。对本试验中获得的土壤理化性质和景天生长发育的各项指标进行主成分分析，得出主成分因子得分作为改良剂效果优劣的判别指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合改良剂对土壤 pH 及电导率的影响

由图 1 可以看出，在添加复合改良剂后，0~20 cm 和 20~40 cm 土层的 pH 均有不同程度的降低(P<0.05)。在 0~20 cm 土层，R<sub>1</sub>H<sub>3</sub>G<sub>3</sub> 处理下土壤 pH 降幅最大，与对照组(CK)相比，降低了 9.0%，R<sub>3</sub>H<sub>2</sub>G<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>H<sub>1</sub>G<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>H<sub>1</sub>G<sub>3</sub> 处理次之，均降低了 6.7%；在 20~40 cm 土层，添加复合改良剂后，土壤 pH 降低了 4.1%~8.5%，其中 R<sub>3</sub>H<sub>1</sub>G<sub>3</sub>、R<sub>1</sub>H<sub>3</sub>G<sub>3</sub>，降低了 9.0%，其次是 R<sub>1</sub>H<sub>3</sub>G<sub>3</sub> 和 R<sub>3</sub>H<sub>2</sub>G<sub>1</sub> 处理，分别降低了 8.2% 和 0.79%。综合考虑 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 pH 的变化，R<sub>1</sub>H<sub>3</sub>G<sub>3</sub>、R<sub>3</sub>H<sub>1</sub>G<sub>3</sub>、R<sub>3</sub>H<sub>2</sub>G<sub>1</sub> 三个处理降低 pH 的作用效果最为显著。



(图中小写字母不同表示处理间差异达 P<0.05 显著性水平，下同)

图 1 不同物料配比复合改良剂处理下土壤 pH 的变化  
Fig. 1 Changes of soil pH under composite modifiers with different mixing ratios

图 2 显示了不同处理下土壤全盐量的变化。由图 2 可以看出，在 0~20 cm 土层，与 CK 相比，添加改良剂后土壤全盐量均显著降低(P<0.05)，其中 R<sub>1</sub>H<sub>3</sub>G<sub>3</sub> 与 R<sub>3</sub>H<sub>1</sub>G<sub>3</sub> 处理土壤盐分最低，分别降低了 33.8%和 30.5%；在 20~40 cm 土层，除 R<sub>2</sub>H<sub>1</sub>G<sub>2</sub> 处理下土壤盐分含量与 CK 无显著性差异外，其余处理下土壤盐分均有不同程度的降低，R<sub>1</sub>H<sub>3</sub>G<sub>3</sub> 降低幅度最大，降低了 39.1%。

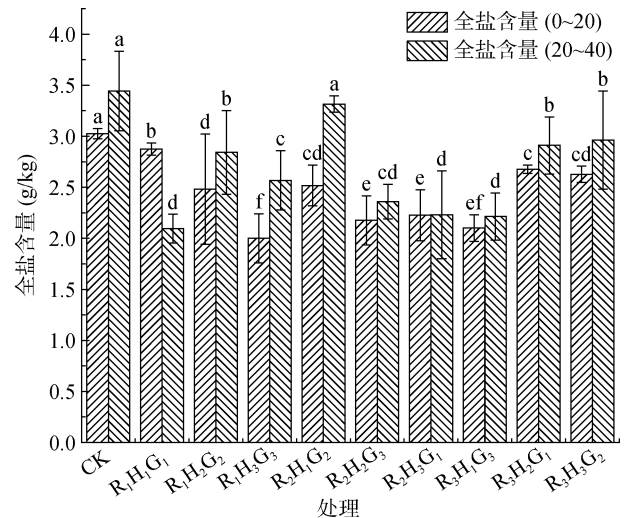


图 2 不同物料配比复合改良剂处理下土壤全盐含量的变化  
Fig. 2 Changes of soil salt contents under composite modifiers with different mixing ratios

### 2.2 复合改良剂对土壤离子组成影响

不同处理下土壤离子组成及差异分析如表 2 所示。由表 2 可知，添加复合改良剂后，R<sub>3</sub>H<sub>1</sub>G<sub>3</sub> 处理

土壤  $\text{HCO}_3^-$  含量最少, 与 CK 相比降低了 39.4%, 其次是  $\text{R}_1\text{H}_2\text{G}_2$ 、 $\text{R}_2\text{H}_1\text{G}_2$  和  $\text{R}_3\text{H}_2\text{G}_1$  处理, 与 CK 相比分别降低了 27.2%、27.2% 以及 30.3%; 添加改良剂后,

土壤中  $\text{Cl}^-$  含量显著降低, 与 CK 相比, 降低了 18.0%~34.1%, 其中  $\text{R}_1\text{H}_1\text{G}_1$ 、 $\text{R}_2\text{H}_1\text{G}_2$  和  $\text{R}_2\text{H}_2\text{G}_3$  处理降幅最高, 降低了 34.1%、32.7% 和 30.4%。

表 2 不同物料配比复合改良剂处理下土壤离子组成及差异(cmol/kg)  
Table 2 Soil ion compositions and differences under composite modifiers with different mixing ratios

处理	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	$\text{SO}_4^{2-}$
CK	0.33 ± 0.01 a	2.17 ± 0.15 a	0.40 ± 0.03 f	0.34 ± 0.01 b	0.07 ± 0.01 e	2.26 ± 0.04 a	1.10 ± 0.03 d
$\text{R}_1\text{H}_1\text{G}_1$	0.30 ± 0.01 ab	1.43 ± 0.03 e	0.86 ± 0.01 e	0.27 ± 0.01 d	0.10 ± 0.01 de	2.08 ± 0.15 b	1.49 ± 0.03 c
$\text{R}_1\text{H}_2\text{G}_2$	0.24 ± 0.03 cd	1.66 ± 0.02 c	1.08 ± 0.04 cd	0.28 ± 0.02 d	0.13 ± 0.01 cd	1.70 ± 0.05 c	1.85 ± 0.07 a
$\text{R}_1\text{H}_3\text{G}_3$	0.28 ± 0.02 bc	1.58 ± 0.03 cd	1.23 ± 0.15 ab	0.21 ± 0.02 e	0.09 ± 0.01 e	1.64 ± 0.05 c	2.01 ± 0.20 a
$\text{R}_2\text{H}_1\text{G}_2$	0.24 ± 0.02 cd	1.46 ± 0.07 de	1.06 ± 0.02 d	0.17 ± 0.01 f	0.16 ± 0.01 c	1.51 ± 0.02 d	1.49 ± 0.06 c
$\text{R}_2\text{H}_2\text{G}_3$	0.30 ± 0.03 ab	1.51 ± 0.08 de	1.31 ± 0.08 a	0.23 ± 0.01 e	0.24 ± 0.06 a	1.61 ± 0.05 cd	1.64 ± 0.03 bc
$\text{R}_2\text{H}_3\text{G}_1$	0.31 ± 0.01 ab	1.58 ± 0.05 cd	1.21 ± 0.09 abc	0.34 ± 0.02 b	0.14 ± 0.01 c	1.50 ± 0.01 d	1.21 ± 0.02 d
$\text{R}_3\text{H}_1\text{G}_3$	0.20 ± 0.03 d	1.55 ± 0.01 cd	1.17 ± 0.06 bcd	0.35 ± 0.01 ab	0.19 ± 0.01 b	1.60 ± 0.11 cd	1.88 ± 0.07 a
$\text{R}_3\text{H}_2\text{G}_1$	0.23 ± 0.01 cd	1.56 ± 0.03 cd	1.11 ± 0.06 bcd	0.37 ± 0.01 a	0.09 ± 0.01 e	2.20 ± 0.02 a	1.97 ± 0.08 a
$\text{R}_3\text{H}_3\text{G}_2$	0.27 ± 0.01 bc	1.78 ± 0.03 b	1.06 ± 0.04 d	0.30 ± 0.02 c	0.11 ± 0.01 de	1.59 ± 0.05 cd	1.68 ± 0.16 b

注: 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ); 下同。

添加改良剂后, 土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  含量随脱硫石膏用量的增加而增加, 增加了 0.46~0.91 cmol/kg。其中,  $\text{R}_2\text{H}_2\text{G}_3$  处理土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  含量最高, 为 1.31 cmol/kg, 较 CK 增加了 0.91 cmol/kg。CK 处理土壤  $\text{Mg}^{2+}$  含量为 0.34 cmol/kg,  $\text{R}_3\text{H}_2\text{G}_1$  和  $\text{R}_3\text{H}_1\text{G}_3$  处理土壤  $\text{Mg}^{2+}$  含量呈现增加趋势, 而其余处理土壤  $\text{Mg}^{2+}$  含量呈现下降趋势。土壤中  $\text{K}^+$  含量随黄腐酸钾用量增加而增加, 增加了 0.02~0.17 cmol/kg; 添加复合改良剂后, 土壤中  $\text{Na}^+$  含量降低, 降低了 2.7%~33.6 cmol/kg, 除  $\text{R}_3\text{H}_2\text{G}_1$  处理  $\text{Na}^+$  含量与 CK 无显著性差异外, 其他处理土壤  $\text{Na}^+$  含量均显著降低, 其中  $\text{R}_2\text{H}_3\text{G}_1$  和  $\text{R}_2\text{H}_1\text{G}_2$  处理土壤  $\text{Na}^+$  含量最低, 与 CK 相比, 分别降低了 33.6%和 33.2%; 脱硫石膏中含有大量  $\text{SO}_4^{2-}$ , 在施加改良剂后, 土壤中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量增加, 增加了 10.0%~83.0%,  $\text{R}_1\text{H}_2\text{G}_2$ 、 $\text{R}_1\text{H}_3\text{G}_3$ 、 $\text{R}_3\text{H}_1\text{G}_3$  和  $\text{R}_3\text{H}_2\text{G}_1$

处理土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  含量较高。

### 2.3 复合改良剂对土壤养分含量的影响

土壤有机质反映了土壤养分含量情况, 而滨海盐碱土养分贫瘠, 有机质含量低, 因此改良后有机质含量高低是反映改良效果的重要因素。由表 3 可以看出, 施用复合改良剂后, 土壤有机质含量增加了 3.0%~45.8%, 其中  $\text{R}_2\text{H}_3\text{G}_1$  处理土壤有机质含量增幅最高, 较 CK 增加了 45.8%, 其次是  $\text{R}_3\text{H}_2\text{G}_1$  处理和  $\text{R}_3\text{H}_3\text{G}_2$  处理, 分别增加了 41.6%和 38.4%。除  $\text{R}_2\text{H}_2\text{G}_3$  处理下碱解氮含量与 CK 无显著性差异外( $P < 0.05$ ), 其余处理土壤碱解氮含量均显著高于 CK,  $\text{R}_1\text{H}_2\text{G}_2$  处理土壤碱解氮含量最高, 与 CK 相比, 增加了 111.8%, 其次为  $\text{R}_3\text{H}_2\text{G}_1$ 、 $\text{R}_3\text{H}_1\text{G}_3$  和  $\text{R}_1\text{H}_3\text{G}_3$  处理, 分别增加了 107.6%、100.0%和 98.3%。从表 3 可以看出, 复合改良剂可以增加土壤有效磷含

表 3 不同物料配比复合改良剂处理下土壤养分的含量变化  
Table 3 Changes of soil nutrient contents under composite modifiers with different mixing ratios

处理	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)
CK	3.80 ± 0.24 c	27.53 ± 3.59 c	12.41 ± 1.17 c
$\text{R}_1\text{H}_1\text{G}_1$	3.95 ± 0.24 bc	41.07 ± 2.46 b	19.79 ± 3.3 b
$\text{R}_1\text{H}_2\text{G}_2$	4.6 ± 0.05 abc	58.33 ± 4.66 a	22.98 ± 3.51 ab
$\text{R}_1\text{H}_3\text{G}_3$	5.13 ± 0.17 ab	54.60 ± 4.26 a	31.51 ± 3.8 a
$\text{R}_2\text{H}_1\text{G}_2$	4.78 ± 0.34 abc	38.5 ± 2.1 b	28.49 ± 3.48 ab
$\text{R}_2\text{H}_2\text{G}_3$	3.92 ± 0.12 bc	31.97 ± 2.83 c	25.98 ± 2.51 ab
$\text{R}_2\text{H}_3\text{G}_1$	5.54 ± 0.09 a	52.97 ± 3.52 a	23.45 ± 4.62 ab
$\text{R}_3\text{H}_1\text{G}_3$	4.72 ± 0.2 abc	55.07 ± 2.91 a	29.34 ± 4.64 ab
$\text{R}_3\text{H}_2\text{G}_1$	5.38 ± 0.2 a	57.17 ± 2.91 a	31.61 ± 3.57 a
$\text{R}_3\text{H}_3\text{G}_2$	5.26 ± 0.12 a	39.2 ± 2.52 b	29.38 ± 3.88 ab

量, 但不同处理之间无显著性差异, 与 CK 相比, 施加复合改良剂后, 土壤有效磷增加了 59.5% ~ 154.8%。说明高剂量的稻壳和黄腐酸钾施加到土壤后, 能够增加土壤有机质、碱解氮和有效磷含量。

## 2.4 复合改良剂对景天生长影响

表 4 反映了复合改良剂对景天株高的影响。由表 4 可以看出, 添加复合改良剂后, 不同处理景天株高与 CK 均有显著性差异( $P < 0.05$ ), 表明添加复合改良剂后, 景天生长环境得到改善, 促进了景天生长, 其中  $R_1H_2G_2$ 、 $R_1H_2G_2$  处理及  $R_3H_3G_2$  处理景天株高增加量较大, 与对照组相比, 植物株高分别增加了 31.5%、32.9% 及 35.3%。施加复合改良剂后, 各处理景天生物量都有不同程度增加, 其中  $R_3H_1G_3$  处理和  $R_3H_2G_1$  处理生物量较大, 分别增加了 46.9% 和 47.6%, 其次是  $R_1H_2G_2$  处理, 增幅达 38.6%。

## 2.5 复合改良剂综合效应评价

如表 5、表 6 所示, 根据效应综合评价的主成分分析得出主成分因子载荷和主成分因子得分及综合

得分。根据特征值大于 1 的原则选则, 选取前两个主成分 F1、F2; 由主成分因子综合得分可以看出,  $R_1H_3G_3$  处理下综合得分最高, 说明该处理的综合改良效果最优。

表 4 不同物料配比复合改良剂处理下景天株高及产量变化

Table 4 Plant heights and biomass under composite modifiers with different mixing ratios

处理	株高(cm)	生物量(kg/hm <sup>2</sup> )
CK	55.03 ± 1.67 d	584 ± 4 d
$R_1H_1G_1$	59.87 ± 0.42 c	626 ± 4 cd
$R_1H_2G_2$	72.37 ± 0.90 a	810 ± 4 a
$R_1H_3G_3$	73.13 ± 2.10 a	685 ± 3 bc
$R_2H_1G_2$	66.03 ± 1.36 b	732 ± 6 b
$R_2H_2G_3$	60.93 ± 0.83 c	677 ± 4 bc
$R_2H_3G_1$	64.30 ± 1.11 b	609 ± 8 d
$R_3H_1G_3$	66.00 ± 1.71 b	858 ± 8 a
$R_3H_2G_1$	60.33 ± 1.04 c	862 ± 4 a
$R_3H_3G_2$	74.47 ± 0.50 a	747 ± 3 b

表 5 主成分因子载荷矩阵

Table 5 Factor loading matrix of principal components

主成分	pH		土壤全盐		有机质	碱解氮	有效磷	株高	生物量
	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm					
F1	0.878	0.879	0.728	0.417	0.774	0.841	0.832	0.633	0.597
F2	0.207	-0.197	0.426	0.769	-0.23	-0.127	0.215	-0.298	-0.57

表 6 主成分因子综合得分

Table 6 Scores of principal component factors and comprehensive score

处理	F1	F2	综合得分
CK	-5.26	-0.5	-3.03
$R_1H_1G_1$	-1.56	1.12	-0.7
$R_1H_2G_2$	0.75	-1.26	0.23
$R_1H_3G_3$	2.38	0.56	1.42
$R_2H_1G_2$	-0.11	-0.9	-0.2
$R_2H_2G_3$	-1.16	1.63	-0.4
$R_2H_3G_1$	1.34	1.59	0.99
$R_3H_1G_3$	1.94	0.21	1.12
$R_3H_2G_1$	1.4	-1.19	0.6
$R_3H_3G_2$	0.28	-1.25	-0.03

## 3 讨论

### 3.1 复合改良剂对土壤理化性质的影响

黄腐酸钾属于腐殖酸的一种, 含有羟基、酚羟基等活性官能基团, 具有弱酸性, 对 pH 的调节具有一定作用; 脱硫石膏有很好的排盐效果, 可以降低土壤

pH; 稻壳施入土壤中后, 由于其质地疏松, 增加土壤孔隙度, 降低土壤容重, 使土壤物理结构得到改善, 盐分淋溶效果加强<sup>[7]</sup>, pH 得到改善。廖栩等<sup>[5]</sup>和岳股萍等<sup>[20]</sup>通过土柱模拟试验均发现施用脱硫石膏后, 土壤 pH 降低; 顾鑫等<sup>[21]</sup>、王相平等<sup>[14]</sup>和朱家辉<sup>[22]</sup>研究发现, 施用腐殖酸后, 降低土壤 pH, 作物生长得到改善; 王秋菊等<sup>[23]</sup>研究发现, 施用稻壳后, 土壤通气、透水性得到改善, 土壤 pH 降低。本试验中, 施加复合改良剂后, 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层土壤 pH 均有不同程度的降低, 这与前人研究结果一致, 说明脱硫石膏、黄腐酸钾、稻壳对土壤 pH 的改善具有一定效果, 而在本研究中,  $R_1H_3G_3$ 、 $R_3H_1G_3$ 、 $R_3H_2G_1$  和  $R_3H_3G_2$  处理 0 ~ 40 cm 土层中土壤 pH 低于其他处理, 产生这种现象的原因, 可能是因为一方面黄腐酸钾可以促进石膏的溶解, 加大对土壤胶体上  $Na^+$  的置换<sup>[8-9]</sup>, 另一方面黄腐酸钾本身含有羧基等官能团, 能够进行酸碱中和反应; 此外, 稻壳通透性好, 有利于土壤形成稳定大空隙, 利于排盐和降低土壤 pH。可见, 在调节土壤 pH 上, 三者共同作用降低了土壤

pH<sup>[23]</sup>。

在本研究中,添加复合改良剂后,0~20 cm 土层各处理土壤盐分含量均呈下降趋势,并且当稻壳为中低量时,随石膏和黄腐酸钾量增加而降低。并且通过分析土壤离子组成可以看出,这 3 种改良剂混合施用后, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup> 含量均较 CK 降低,本试验中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量随稻壳、脱硫石膏施用量的增加而降低; Cl<sup>-</sup> 含量随稻壳的施用量增加而降低,随黄腐酸钾和脱硫石膏施用量增加先增加后降低; Na<sup>+</sup> 含量随黄腐酸钾及脱硫石膏施用量的增加而降低。这是因为黄腐酸钾施入土壤后能够产生一系列酸性物质,进行酸碱中和反应,使土壤碱性降低,脱硫石膏施入土壤后释放 Ca<sup>2+</sup> 与土壤中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 反应,生成沉淀,土壤中碱性离子降低<sup>[12]</sup>。因此,稻壳、腐殖酸和脱硫石膏三者施入土壤后,一方面促进土壤胶体上 Na<sup>+</sup> 的置换,使钠质土转变为钙质土,另一方面它们可以改善土壤团粒结构,增加土壤团聚体的稳定性,孔隙结构得到改善<sup>[24]</sup>,加速 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 的向下排出,从而降低表层土壤中这两种离子的含量<sup>[15]</sup>。虽然加入改良剂后,土壤中 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 K<sup>+</sup> 含量增加,但它们对植物的毒害作用低于 Cl<sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup>,并且土壤中可溶性 Ca<sup>2+</sup> 增加,Na<sup>+</sup> 含量降低,土壤絮凝性和稳定性增强,土壤碱化度降低,维持了土壤结构稳定性和水力传导性能<sup>[6,15-16]</sup>。

黄腐酸属于腐殖酸的一种,作为一种缓释氮肥,除为植物提供营养外,还能同稻壳一起增加土壤有机质含量,增加土壤大团聚体含量,改善土壤肥力水平<sup>[18,23]</sup>。徐国凤和同延安<sup>[25]</sup>研究显示,盐渍土中使用腐殖酸作为改良剂,表层土壤氮磷等养分含量显著增加。岳小红<sup>[26]</sup>研究发现,施加腐殖酸可以增加不同程度盐渍土中有机碳含量和微生物碳含量,促进土壤呼吸作用,微生物活性增加。在本试验中,与前人研究结果一致,添加含黄腐酸钾及稻壳的复合改良剂后,土壤有机质含量随黄腐酸钾及稻壳的用量增加,在低量及中量黄腐酸钾时,碱解氮与有效磷含量随施用量的增加而增加,中高量时无显著差异。

### 3.2 复合改良剂对景天生长的影响

已有研究表明,Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 作为盐胁迫的两大离子,影响植物细胞的渗透性及植物体内的离子平衡,使植物水分吸收受到抑制,植物生物量降低<sup>[27]</sup>。腐殖酸和脱硫石膏可以缓解盐胁迫对植物的毒害作用,使 Na<sup>+</sup> 与植物细胞壁细胞膜的结合率降低,改善植物细胞质膜的功能,增加植物耐盐性,提高植物产量<sup>[21,28-29]</sup>。在本试验中,添加复合改良剂后,

土壤理化性质改变,景天株高及生物量增加,Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 含量低的处理景天株高及生物量高,说明改良剂降低盐分效果越好,景天生物量提高越多。

## 4 结论

复合改良剂的添加均能够降低土壤 pH,综合考虑 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 pH 的变化情况, R<sub>1</sub>H<sub>3</sub>G<sub>3</sub>、R<sub>3</sub>H<sub>1</sub>G<sub>3</sub> 和 R<sub>3</sub>H<sub>2</sub>G<sub>1</sub> 处理降低 pH 的效果较优。复合改良剂处理下土壤全盐量下降,并且土壤全盐量随脱硫石膏用量增加而增加;土壤中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup> 含量降低,其中 R<sub>3</sub>H<sub>1</sub>G<sub>3</sub> 处理对 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、Na<sup>+</sup> 消减作用最为明显。复合改良剂提高了土壤有机质、碱解氮及有效磷含量,促进了景天生长,提高了景天生物量。通过主成分分析及综合评价,本研究中稻壳、黄腐酸钾和脱硫石膏配比为 5-1.2-9 t/hm<sup>2</sup> 时对滨海盐渍土改良效果最为显著。

## 参考文献:

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [2] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [3] 贺坤, 李小平, 徐晨, 等. 烟气脱硫石膏对滨海盐渍土的改良效果[J]. 环境科学研究, 2018, 31(3): 547-554.
- [4] 李金彪, 刘广明, 陈金林, 等. 不同物料掺拌对滨海重度盐渍土的改良效果研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1481-1485.
- [5] 廖翔, 杨帆, 王志春, 等. 腐解秸秆和脱硫石膏添加对苏打盐渍土淋洗脱盐效率的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(1): 74-82.
- [6] Zhao Y G, Li Y, Wang S J, et al. Combined application of a straw layer and flue gas desulphurization gypsum to reduce soil salinity and alkalinity[J]. Pedosphere, 2020, 30(2): 226-235.
- [7] 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.
- [8] 刘莉萍. 不同盐碱土改良剂对江苏大丰滨海盐碱地改良效应[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [9] 高中超, 中本和夫, 王秋菊, 等. 稻壳深施对碱土物理性质和苜蓿产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 990-995.
- [10] Chen Q, Wang S J, Li Y, et al. Influence of flue gas desulfurization gypsum amendments on heavy metal distribution in reclaimed sodic soils[J]. Environmental Engineering Science, 2015, 32(6): 470-478.
- [11] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Extensive reclamation of saline-sodic soils with flue gas desulfurization gypsum on the Songnen Plain, Northeast China[J]. Geoderma, 2018, 321: 52-60.
- [12] Li X P, Mao Y M, Liu X C. Flue gas desulfurization gypsum application for enhancing the desalination of reclaimed tidal lands[J]. Ecological Engineering, 2015, 82: 566-570.

- [13] 罗艳君. 灌溉施肥频率和黄腐酸钾配施对矮化苹果园土壤溶液和产量、品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [14] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 改良剂施用对干旱盐碱区棉花生长及土壤性质的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 757-762.
- [15] 张济世, 于波涛, 张金凤, 等. 不同改良剂对滨海盐渍土土壤理化性质和小麦生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 704-711.
- [16] 刘志伟, 朱孟涛, 郭文杰, 等. 秸秆直接还田与炭化还田下土壤有机碳稳定性和温室气体排放潜力的对比研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1371-1378.
- [17] 周阳雪. 秸秆及其生物炭对农田土壤系统碳氮循环的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [18] 徐素峰. 覆盖和穴施有机物对盐碱地苹果生长结果及土壤盐分的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [19] 王潇, 胡海波, 施海新. 稻壳炭改良盐渍土性状研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 193-197.
- [20] 岳殷萍, 李虹谕, 张伟华. 脱硫石膏与腐殖酸改良盐碱土的效果研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2016(14): 85-87,89.
- [21] 顾鑫, 任翠梅, 杨丽, 等. 天然煤炭腐植酸对盐碱土改良效果的研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(9): 57-61.
- [22] 朱家辉. 滨海盐碱地控释掺混肥配施调理剂对玉米—小麦生长及土壤养分的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [23] 王秋菊, 刘峰, 常本超, 等. 稻壳深施改良苏打碱土理化性质长期效应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 147-152.
- [24] 王相平, 杨劲松, 张胜江, 等. 石膏和腐植酸配施对干旱盐碱区土壤改良及棉花生长的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 327-332.
- [25] 徐国凤, 同延安. 不同改良措施对卤阳湖盐碱地土壤性质及玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 232-237.
- [26] 岳小红. 外源有机碳对盐渍化土壤性质及小麦生长的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [27] 刘广明, 李金彪, 王秀萍, 等. 外源水杨酸对黑麦草幼苗盐胁迫的缓解效应研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 995-1002.
- [28] Cimrin K M, Türkmen Ö, Turan M, et al. Phosphorus and humic acid application alleviate salinity stress of pepper seedling[J]. African Journal of Biotechnology, 2010, 9(36): 5845-5851.
- [29] Rengel Z. The role of calcium in salt toxicity[J]. Plant, Cell and Environment, 1992, 15(6): 625-632.