

沈婧丽, 王 彬, 田小萍, 等. 不同改良模式对盐碱地土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 338-344.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.02.016

## 不同改良模式对盐碱地土壤理化性质及水稻产量的影响

沈婧丽, 王 彬, 田小萍, 许 兴

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:** 为了明确单一措施和集成模式对盐碱土的改良效果和对水稻生长的影响, 采用随机区组设计, 对施用脱硫石膏+改良剂、有机肥、灌水及种植水稻 4 个因素 9 种改良集成模式进行了盆栽试验。结果表明, 施用脱硫石膏+改良剂可增加土壤钙镁离子, 降低钾钠离子, 同时硫酸根离子增加, 氯离子、碳酸根离子、碳酸氢根离子减少, 土壤 pH 值、碱化度降低, 具有明显的土壤改良效果。灌水淋洗可降低土壤碱化度 51.16%, 降低全盐含量 4.74 g/kg。集成模式 T9 处理(施用脱硫石膏+改良剂、有机肥、灌水、种植水稻集成模式)水稻各生育期株高、SPAD 值、光合速率、脯氨酸含量、过氧化物酶、过氧化氢酶活性等指标显著优于空白对照; 集成模式 T9 处理水稻产量最高, 为每盆 38.66 g, 较 T7 处理(施用脱硫石膏+改良剂和种植水稻集成模式)增产每盆 0.67 g, 较 T4 处理(施用有机肥和种植水稻集成模式)增产每盆 10.27 g。表明 T9 处理对盐碱土的改良效果和水稻经济产量好于其他处理。

**关键词:** 脱硫石膏; 盐碱地; 改良剂; 水稻

**中图分类号:** S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)02-0338-07

## Effect of improvement modes on physico-chemical characteristics of saline-alkali soil and rice yield

SHEN Jing-li, WANG Bin, TIAN Xiao-ping, XU Xing

(College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Four soil improving modes were employed in a pot experiment by randomized complete block design to study their effects on soil and rice growth. Single improving modes were desulfurized gypsum+modifying agent, organic fertilizer, irrigation, and rice planting, solely. Integrated modes were combinations of above four measures. Gypsum+modifying agent increased the contents of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , and decreased the contents of  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , and  $\text{HCO}_3^-$ , leading to the improvement of soil salinity and alkalinity. The irrigation lowered the soil alkalinity by 51.16% and brought down the salinity by 4.74 g/kg. In treatment T9 which is a improving mode combining gypsum+modifying agent, organic fertilizer, irrigation and rice planting, rice achieved the highest yield, and the plant height, SPAD value, photosynthetic rate, proline content, POD and CAT activities per formed better than those in control. Treatment T9 is favorable for soil salinity and alkalinity improvement and rice growth.

**Key words:** desulfurized gypsum; saline-alkali soil; modifying agent; rice

收稿日期: 2016-01-28

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC02B04)。

作者简介: 沈婧丽(1990-), 女, 宁夏银川人, 硕士研究生, 研究方向为作物生理生态。(E-mail) lily\_s90@163.com

通讯作者: 许 兴, (E-mail) xuxingscience@126.com

土壤盐碱化和次生盐碱化分布广泛、危害严重, 特别是在干旱、半干旱地区。据统计, 世界范围内盐碱地面积约为  $9.54 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 其中中国约为  $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>, 主要分布在西北、华北、东北和滨海地

区,盐碱地改造治理及土地资源的开发利用,是区域经济可持续发展的首要任务<sup>[2]</sup>。近年来,利用火电厂燃煤烟气脱硫废弃物改良盐碱地已经成为一种新的研究趋势<sup>[3-8]</sup>。脱硫石膏改良盐碱地的研究多偏重于脱硫石膏的施用效果、施用量、施用时期及作物等单因子效应,而应用水利、农艺、化学、生物等多种技术的集成模式进行盐碱地改良的报道还很少。在施用脱硫石膏的基础上,多种技术集成模式中各单项技术的贡献率、交互效应及土壤改良的持续效果还有待进一步研究。本研究利用宁夏大学自主研发的新型改良剂,对脱硫石膏+改良剂、有机肥、灌水及种植水稻4个因素的9种改良模式进行了探讨,拟从土壤理化性质和水稻生长方面,综合评价不同改良模式对宁夏北部盐碱地的改良效果,为建立燃煤烟气脱硫废弃物改良盐碱地的综合技术体系提供依据。

1 材料与方法

1.1 基本情况

盆栽土壤取自于宁夏平罗县前进农场(宁夏大学西大滩盐碱地改良试验示范基地)0~20 cm的耕作层。该基地位于河套平原西南部,地势平缓低洼,以龟裂碱土为主(俗称白僵土)。试验区土壤本底值详见表2、表3。

1.2 试验材料

供试水稻品种为吉特605;脱硫石膏来自宁夏马莲台电厂,主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ;盐碱地改良剂为宁夏大学新技术中心自主研发的产品,主要成分为糠醛渣、醋糟等;有机肥采用宁夏丰源生物科技有限公司生产的复合有机肥(有机质 $\geq 45\%$ 、 $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O} \geq 5\%$ 、每1 g含有益活性菌 $\geq 2 \times 10^8$ 个)。

1.3 试验设计

试验设脱硫石膏+改良剂、有机肥、灌水、种植水稻4个因素,每因素2个水平,即1和0,施脱硫石膏( $2.25 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ )+改良剂( $1.5 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ )为1、不施为0,脱硫石膏、改良剂施用量参照参考文献[8];施有机肥( $3 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ )为1、不施为0,有机肥施用量参照当地生产施肥量;灌水( $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ )为1、不灌为0;种植水稻为1、不种水稻为0。共9个处理,详见表1,采用随机区组试验设计,重复5次,共45盆。

表1 试验因素编码表

Table 1 The designs for the experiment

处理	脱硫石膏+改良剂	有机肥	灌水	种植水稻
T1	0	0	0	0
(空白对照)				
T2	1	0	0	0
T3	1	0	1	0
T4	1	0	1	1
T5	0	1	0	0
T6	0	1	1	0
T7	0	1	1	1
T8	1	1	1	0
T9	1	1	1	1

试验在宁夏大学温室大棚内进行,试验盆栽规格为下径23 cm×上径30 cm×盆高25 cm。脱硫石膏、改良剂和有机肥均按每1  $\text{hm}^2$ 土质量为 $1.125 \times 10^6 \text{ kg}$ ,参照大田施用量折算后与土壤混匀装盆。试验水稻5月12日播种,10月17日收获。

1.4 测定指标与方法

土壤pH值采用数字酸度计测定,土水比为1:5(质量比);碱化度采用乙酸铵交换法测定;全盐采用电导率仪测定;

采用美国LI-COR公司生产的LI-6400XT光合仪测定叶片净光合速率、气孔导度、胞间 $\text{CO}_2$ 浓度、蒸腾速率。在温室环境中,光合测定仪的流速设定为 $500 \mu\text{mol/s}$ ,光量子能量密度(PFD)设定为 $1\,500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,测定期间温室温度为 $(33.5 \pm 2.5)^\circ\text{C}$ , $\text{CO}_2$ 浓度为 $(367 \pm 35) \mu\text{mol/mol}$ ,叶室相对湿度为 $33.0\% \pm 4.2\%$ 。

有机质、碱解氮、速效磷、速效钾、盐离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )等指标测定参照鲍士旦主编的《土壤农化分析》<sup>[9]</sup>进行;丙二醛、脯氨酸、可溶性糖、超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、四氮唑还原强度等指标测定参照邹琦主编的《植物生理学实验指导》<sup>[10]</sup>进行。

1.5 数据分析

数据分析采用SPSS 21.0统计软件。

各处理土壤理化性质测定值(Y),如土壤pH值、碱化度、全盐、速效钾、速效磷、碱解氮、有机质及离子浓度与参试4个因素,即脱硫石膏+改良剂( $X_1$ )、有机肥( $X_2$ )、灌水( $X_3$ )、种植水稻( $X_4$ )按照

$Y=B_0+B_1X_1+B_2X_2+B_3X_3+B_4X_4$ , 进行多元回归分析, 其回归系数及标准差详见表2、表3,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 取值为0和1。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同改良模式对盐碱地土壤的影响

对水稻种植前本底值和不同处理收获后土壤的pH值、碱化度、全盐、速效钾、速效磷、碱解氮、有机质及土壤离子进行了测定, 分析结果详见表2、表3。其中实测的土壤本底值与回归分析的 $B_0$ 较为接近, 说明回归分析的 $B_0$ 实际上就是土壤理论上的本底值, 回归系数 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$ 的大小与正负则为脱硫石膏+改良剂、有机肥、灌水、种植水稻4个因素对土壤理化指标的增减效应及贡献率。

2.1.1 土壤理化性质 从表2可得出: 土壤碱化度回归分析 $F$ 值达到了极显著水平, 全盐含量达到了显著水平, 从回归系数分析, T3即灌水处理对土壤碱化度和全盐含量影响较大, 可降低土壤碱化度

51.16%, 降低全盐含量4.74 g/kg, 进一步分析可得出: 由于灌水的淋洗作用, 土壤中速效钾的含量降低较为显著。脱硫石膏+改良剂(T1)可降低pH值、碱化度, 全盐含量略增。施有机肥处理(T2), 可提高土壤中速效钾、速效磷、碱解氮含量, 有机质含量略增。种稻处理(T4)对土壤中盐分及养分含量的影响较小。

2.1.2 土壤盐离子浓度 从表3分析得出: 脱硫石膏+改良剂(T1)对 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 的含量影响为正效应、对 $K^+$ 、 $Na^+$ 的含量影响为负效应, 可使 $SO_4^{2-}$ 增加、 $Cl^-$ 、 $CO_3^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ 减少, 主要是脱硫石膏中以硫酸钙为主, 因此 $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $Mg^{2+}$ 增加; 脱硫石膏中的 $Ca^{2+}$ 置换出吸附在土壤胶体中的 $Na^+$ , 置换出的钠离子通过水的淋洗排出土体, 同时,  $Ca^{2+}$ 能够结合土壤中的 $HCO_3^-$ 和 $CO_3^{2-}$ , 从而降低土壤中的 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $CO_3^{2-}$ 、 $HCO_3^-$ 的含量。有机肥处理(T2)可增加土壤中的钾离子含量。灌水处理(T3)对 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $HCO_3^-$ 的淋洗作用非常明显。

表2 不同改良模式对盐碱地土壤理化性质的影响

Table 2 Soil physico-chemical properties affected by soil improvement modes

项目	pH 值	碱化度 (%)	全盐 (g/kg)	速效钾 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有机质 (g/kg)
T1	8.11	62.5	3.67	184.1	7.12	23.01	8.21
T2	8.01	61.4	4.17	480.4	7.03	21.52	16.20
T3	8.12	19.3	0.63	96.1	10.47	19.30	14.36
T4	8.12	16.0	0.92	115.7	5.89	25.97	15.26
T5	7.45	82.1	6.56	578.3	13.47	28.94	14.75
T6	8.57	21.6	0.27	86.3	8.71	34.14	7.07
T7	8.87	23.0	0.22	76.5	6.42	29.69	7.60
T8	8.46	13.1	0.42	66.7	6.95	36.36	11.66
T9	8.42	19.8	0.63	76.5	8.71	46.75	16.56
本底值	9.86	62.5	6.58	356.0	11.40	19.00	6.59
$B_0$	$9.64 \pm 0.19$	$68.18 \pm 2.91$	$4.42 \pm 0.44$	$347.34 \pm 54.93$	$8.53 \pm 1.21$	$17.65 \pm 2.41$	$8.10 \pm 0.88$
$B_1$	$-0.27 \pm 0.21$	$-4.27 \pm 3.19$	$0.35 \pm 0.48$	$92.23 \pm 60.17$	$0.15 \pm 1.32$	$5.93 \pm 2.64$	$5.76 \pm 0.96$
$B_2$	$-0.01 \pm 0.21$	$5.73 \pm 3.19$	$0.80 \pm 0.48$	$108.53 \pm 60.17$	$1.88 \pm 1.32$	$14.59 \pm 2.64$	$1.38 \pm 0.96$
$B_3$	$0.73 \pm 0.25$	$-51.16 \pm 3.69$	$-4.74 \pm 0.55$	$-398.16 \pm 69.48$	$-1.17 \pm 1.52$	$-1.40 \pm 3.05$	$-4.00 \pm 1.11$
$B_4$	$0.11 \pm 0.21$	$1.60 \pm 3.19$	$0.15 \pm 0.48$	$6.53 \pm 60.17$	$-1.70 \pm 1.32$	$4.20 \pm 2.64$	$1.69 \pm 0.96$
$F$ 值	1.36	27.95 **	9.13 *	3.61	0.64	3.69	3.58

T<sub>1</sub>:空白对照;T<sub>2</sub>:脱硫石膏+改良剂;T<sub>3</sub>:脱硫石膏+改良剂+灌水;T<sub>4</sub>:脱硫石膏+改良剂+灌水+种植水稻;T<sub>5</sub>:有机肥;T<sub>6</sub>:有机肥+灌水;T<sub>7</sub>:有机肥+灌水+种植水稻;T<sub>8</sub>:脱硫石膏+改良剂+有机肥+灌水;T<sub>9</sub>:脱硫石膏+改良剂+有机肥+灌水+种植水稻; $B_1$ :脱硫石膏+改良剂回归系数; $B_2$ :有机肥回归系数; $B_3$ :灌水回归系数; $B_4$ :种植水稻回归系数; $B_0$ 为常数。\*为0.05显著水平;\*\*为0.01显著水平。

表 3 不同改良模式对盐碱地土壤盐分离子浓度的影响  
Table 3 Soil ion concentrations affected by soil improvement modes

项目	阳离子				阴离子			
	Ca <sup>2+</sup> (g/kg)	Mg <sup>2+</sup> (g/kg)	K <sup>+</sup> (mg/kg)	Na <sup>+</sup> (g/kg)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (g/kg)	Cl <sup>-</sup> (g/kg)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/kg)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)
T1	1.69	0.10	45.9	3.38	2.15	8.81	0	17.9
T2	2.18	0.21	45.9	2.75	2.09	7.90	0	15.6
T3	1.56	0.14	77.8	0.04	2.28	0.89	0	17.2
T4	3.06	0.31	20.4	0.07	2.03	0.74	0	21.8
T5	2.94	1.03	262.8	10.88	1.35	19.87	0	60.8
T6	0.30	0.07	71.4	0.02	0.22	0.62	0	28.1
T7	0.23	0.15	109.7	0.02	0.60	0.57	1.5	39.0
T8	0.13	0.08	45.9	0.02	0.06	0.61	0	23.4
T9	0.90	0.13	58.7	0.05	1.47	0.39	0	23.4
本底值	0.84	0.32	101.7	1.46	6.25	10.70	0	30.5
B <sub>0</sub>	2.42 ± 0.45	0.36 ± 0.14	101.89 ± 30.25	4.91 ± 1.13	2.19 ± 0.22	11.16 ± 1.69	0.17 ± 0.22	28.31 ± 5.26
B <sub>1</sub>	0.33 ± 0.50	0.03 ± 0.16	-25.50 ± 33.14	-0.20 ± 1.24	0.22 ± 0.24	-0.37 ± 1.85	-0.50 ± 0.24	-7.53 ± 5.76
B <sub>2</sub>	-0.78 ± 0.50	0.23 ± 0.16	74.43 ± 33.14	2.49 ± 1.24	-1.19 ± 0.24	3.48 ± 1.85	0 ± 0.24	16.90 ± 5.76
B <sub>3</sub>	-1.46 ± 0.57	-0.44 ± 0.18	-69.48 ± 38.27	-6.41 ± 1.43	-0.68 ± 0.28	-12.52 ± 2.14	0.17 ± 0.27	-11.66 ± 6.65
B <sub>4</sub>	0.73 ± 0.50	0.10 ± 0.16	-2.10 ± 33.14	0.02 ± 1.24	0.51 ± 0.24	-0.14 ± 1.85	0.50 ± 0.24	5.17 ± 5.76
F 值	1.31	0.64	1.11	2.79	4.78	4.74	1.00	1.75

T<sub>1</sub>:空白对照;T<sub>2</sub>:脱硫石膏+改良剂;T<sub>3</sub>:脱硫石膏+改良剂+灌水;T<sub>4</sub>:脱硫石膏+改良剂+灌水+种植水稻;T<sub>5</sub>:有机肥;T<sub>6</sub>:有机肥+灌水;T<sub>7</sub>:有机肥+灌水+种植水稻;T<sub>8</sub>:脱硫石膏+改良剂+有机肥+灌水;T<sub>9</sub>:脱硫石膏+改良剂+有机肥+灌水+种植水稻;B<sub>1</sub>:脱硫石膏+改良剂回归系数;B<sub>2</sub>:有机肥回归系数;B<sub>3</sub>:灌水回归系数;B<sub>4</sub>:种植水稻回归系数;B<sub>0</sub>为常数。\* 为 0.05 显著水平; \*\* 为 0.01 显著水平。

2.2 不同改良模式对水稻生长发育的影响

2.2.1 不同改良模式对水稻生长发育的影响 由表 4 可知,苗期到成熟期, T7 与 T9 处理水稻株高显著高于 T4, T7 与 T9 处理的株高无显著差异。水稻不同生育期, T9 株高最高, 表明 T9 水稻生长最好。水稻分蘖期和抽穗期 T9 处理的叶龄显著高于 T4, 其他生育期各处理间叶龄差异不显著。SPAD 值与叶片中叶绿素含量相关, 也能较好地反映处理间的差异, 苗期至成熟期 T9 处理的 SPAD 值显著高于 T4。叶片水势和相对电导度越小, 表明水稻生长受盐碱胁迫的程度越小。苗期到成熟期水势的大小是 T9<T7<T4, 且差异显著。苗期到成熟期各处理间相对电导度差异不显著, 但仍表现出 T9<T7<T4 趋势, 抽穗后 T9 相对电导度显著低于 T4。苗期到成熟期 T9 与 T7 的单株干质量显著高于 T4。

2.2.2 不同改良模式对水稻光合指标的影响 各生育期不同处理间水稻的光合速率测定结果见表 5。从表 5 可以看出:水稻从苗期到成熟期光合速率

T9 处理最高, T7 处理次之, T4 处理最小, T9 处理显著高于 T7 和 T4, 说明施用脱硫石膏+改良剂和有机肥对水稻生长具有显著的促进作用。气孔导度表示气孔开合的程度, 影响光合作用、呼吸作用及蒸腾作用, 苗期、分蘖期、抽穗期 T9 处理与 T7 处理气孔导度无显著差异, 灌浆期、成熟期 T9 处理显著高于 T7 处理。胞间 CO<sub>2</sub> 浓度与气孔导度、蒸腾速率间存在较复杂关系, 共同决定了净光合速率的大小, 在光合作用过程中, 由气孔吸收 CO<sub>2</sub>, 所以气孔必须张开, 但气孔张开又不可避免地发生蒸腾作用, 气孔可以根据环境条件的变化来调节其开度的大小而使植株在损失水分较少的条件下获取最多的 CO<sub>2</sub>, 分蘖期和抽穗期胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、蒸腾速率 T9 处理显著高于 T7 处理。说明集成模式 T9 处理可减轻盐碱胁迫, 提高水稻光合速率, 促进水稻生长。

2.2.3 不同改良模式对水稻生化指标的影响 水稻生化指标测定结果见表 6。丙二醛是膜脂过氧化的主要产物, 分蘖期 T7、T9 处理丙二醛含量显著高



表4 不同改良模式对盐碱地水稻生长指标的影响

Table 4 Rice growth parameters affected by soil improvement modes in saline-alkali soil

指标	处理	苗期	分蘖期	抽穗期	灌浆期	成熟期
株高 (cm)	T4	29.3b	50.8b	53.7b	63.8b	65.5b
	T7	36.3a	60.9a	64.7a	70.3ab	88.2a
	T9	36.4a	60.9a	70.2a	79.7a	91.9a
叶龄	T4	5.8a	6.4b	7.6b	8.5a	10.0a
	T7	6.0a	7.4a	8.0ab	8.7a	10.0a
	T9	6.5a	7.6a	8.8a	8.9a	10.0a
SPAD 值	T4	27.5b	30.1b	34.6b	32.6b	24.4c
	T7	27.8b	35.4a	39.0ab	38.9ab	34.2b
	T9	35.1a	36.1a	41.6a	43.8a	40.0a
水势 ( $\times 10^6$ Pa)	T4	-0.62c	-0.56c	-0.56c	-0.87c	-0.68c
	T7	-0.50b	-0.50b	-0.50b	-0.44b	-0.44b
	T9	-0.19a	-0.25a	-0.12a	-0.25a	-0.19a
相对 电导度 (%)	T4	24.50a	27.55a	25.29a	70.01a	45.62a
	T7	22.74a	27.59a	24.72a	64.30a	28.05b
	T9	21.50a	25.32a	23.75a	32.36b	21.45b
干质量(g)	T4	0.041c	0.319c	1.140c	1.856b	1.501b
	T7	0.06b	0.492b	1.418b	3.165a	3.401a
	T9	0.084a	0.499a	1.825a	3.635a	3.975a

苗期指标测定日期为6月26日,分蘖期指标测定日期为7月31日,抽穗期指标测定日期为8月24日,灌浆期指标测定日期为9月6日,成熟期指标测定日期为9月20日;T4表示脱硫石膏+改良剂+灌水+种植水稻,T7表示有机肥+灌水+种植水稻,T9表示脱硫石膏+改良剂+有机肥+灌水+种植水稻;同一列数据后不同小写字母代表同一指标 T4、T7、T9 处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

于T4,苗期和抽穗期 T9、T7、T4 处理间丙二醛含量无显著差异,抽穗期以后丙二醛含量变化不规律。水稻苗期到抽穗期脯氨酸含量 T9 处理显著高于 T4 处理,除分蘖期外,其他生育期脯氨酸含量 T7 处理显著高于 T4 处理。在水稻苗期和分蘖期可溶性糖含量 T9、T7 处理显著高于 T4 处理,抽穗期、灌浆期和成熟期可溶性糖含量 T4 处理显著高于 T9 处理,这可能是由于水稻苗期是营养生长,可溶性糖在叶片积累,到生殖生长时期,养分向籽粒转移,叶片中可溶性糖含量降低。水稻苗期和分蘖期超氧化物歧化酶活性 T4 处理显著低于 T9 处理,各生育期过氧化物酶活性、苗期和分蘖期过氧化氢酶活性均表现为 T4 处理显著低于 T9 处理。四氮唑还原强度与根系活力成正相关,水稻苗期和分蘖期四氮唑还原强度, T9 处理最高, T7 处理次之, T4 处理最小,差异达

表5 不同改良模式对盐碱地水稻光合指标的影响

Table 5 Rice photosynthetic parameters affected by soil improvement modes

观测指标	处理	苗期	分蘖期	抽穗期	灌浆期	成熟期
光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , $\text{CO}_2$ ]	T4	6.85b	7.14c	9.12a	21.23b	2.69b
	T7	7.39b	10.69b	8.17a	20.99b	2.32b
	T9	8.71a	12.95a	9.46a	25.22a	4.11a
气孔导度 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , $\text{H}_2\text{O}$ ]	T4	0.14ab	0.10b	0.16a	0.07b	0.04ab
	T7	0.17a	0.30a	0.20a	0.07b	0.04b
	T9	0.12b	0.27a	0.21a	0.14a	0.05a
胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 [ $\mu\text{mol}/\text{mol}$ , $\text{CO}_2$ ]	T4	236.7b	244.7b	261.9b	257.4b	255.9ab
	T7	247.2a	295.8a	280.6ab	306.3b	276.4a
	T9	228.6b	301.6a	288.4a	339.2a	230.4b
蒸腾速率 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , $\text{H}_2\text{O}$ ]	T4	4.20a	3.41c	5.74b	1.79b	1.91ab
	T7	4.34a	7.12a	6.99ab	1.08c	1.60b
	T9	4.43a	5.54b	7.25a	2.75a	2.35a

各生育期指标的测定日期见表4; T4、T7 和 T9 处理见表4;同一列数据后不同小写字母代表同一指标 T4、T7、T9 处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

表6 不同改良模式对盐碱地水稻生化指标的影响

Table 6 Rice biochemical parameters affected by soil improvement modes

观测指标	处理	苗期	分蘖期	抽穗期	灌浆期	成熟期
丙二醛 含量 ( $\mu\text{mol}/\text{g}$ )	T4	10.93a	7.70a	6.05a	3.83b	7.60b
	T7	7.81a	4.80b	6.24a	9.25a	9.84a
	T9	6.84a	4.21b	5.38a	4.07b	9.50a
脯氨酸 含量 ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	T4	86.34b	31.71b	21.53c	52.08b	37.85b
	T7	97.80a	32.18b	43.40b	74.07a	62.85a
	T9	102.20a	73.50a	88.54a	62.15ab	26.74c
可溶性 糖含量 (%)	T4	1.22b	0.70b	2.84a	3.41a	2.09a
	T7	1.56a	1.00a	2.97a	2.01b	1.85b
	T9	1.67a	1.20a	2.38b	1.60b	1.80b
超氧化物 歧化酶活性 ( $\text{U}/\text{g}, \text{FW}$ )	T4	234.8b	274.3b	295.0a	284.4a	289.5a
	T7	240.9b	327.4a	290.5a	279.6a	288.9a
	T9	348.7a	328.3a	276.3a	272.8a	289.2a
过氧化物 酶活性 [ $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$ , $\text{FW}$ ]	T4	866.7b	1 183.3b	980.0c	1 150.0b	866.7c
	T7	986.7b	1 316.7b	1 186.7b	950.0c	986.7b
	T9	1 153.3a	1 853.3a	1 386.7a	1 553.3a	1 350.0a
过氧化氢 酶活性 [ $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$ , $\text{FW}$ ]	T4	257.71b	242.1c	1 173.3a	896.9a	1 601.5a
	T7	287.71b	455.6b	1 177.3a	912.9a	1 098.1b
	T9	452.50a	714.6a	1 339.4a	944.0a	1 429.4a
四氮唑 还原强度 [ $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ]	T4	13.42c	12.98c	12.63a	12.58a	11.74a
	T7	17.32b	15.19b	9.89b	13.21a	12.39a
	T9	18.16a	16.51a	12.21ab	12.16a	12.95a

各生育期指标的测定日期见表4; T4、T7 和 T9 处理见表4;同一列数据后不同小写字母代表不同指标 T4、T7、T9 处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

显著水平,而在水稻抽穗后,由于根系活力的逐渐减弱,处理间差异也缩小,测定结果规律性不强。

以上结果表明,水稻抗盐碱胁迫的生化指标随水稻生育期的不同,处理间生化指标的差异程度也不完全相同,脯氨酸含量、过氧化物酶、过氧化氢酶活性等指标能较好地反应 T4、T7、T9 处理间差异,可作为水稻盐碱胁迫的主要生化指标。同时,脯氨酸在盐碱胁迫下在植物体内积累,成为细胞渗透调节物质,在稳定大分子结构、降低细胞酸性、解除氨毒以及调节细胞氧化还原势等方面有非常重要作用,在盐碱胁迫下,水稻体内脯氨酸的含量显著增加。过氧化物酶以铁卟啉为辅基,可催化过氧化氢、氧化酚类和胺类化合物,具有消除过氧化氢和酚类、胺类毒性的作用。在测定结果中,丙二醛含量、可溶

性糖含量、超氧化物歧化酶活性、四氮唑还原强度等随水稻生长变化较大,可作为水稻盐碱胁迫特定时期的参考指标。

2.2.4 不同改良模式对水稻产量及产量构成的影响 表 7 显示,T9 处理水稻产量最高,为每盆 38.66 g,T7 处理次之,为每盆 37.99 g,施用有机肥(T9 处理-T4 处理)增产效果为每盆 10.27 g,施用脱硫石膏+改良剂(T9 处理-T7 处理)增产效果为每盆 0.67 g。产量构成因素主要是每穗粒数差异较显著,T9 处理每穗粒数为 60.54 粒,T7 处理每穗粒数为 53.74 粒,均显著高于 T4 处理。说明,盐碱地改良时,脱硫石膏和改良剂施用的同时还需施用一定量的有机肥。

表 7 不同改良模式对盐碱地水稻产量及产量构成指标的影响  
Table 7 Rice yield and yield components affected by soil improvement modes

处理	穗数 (个/盆)	穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	千粒质量 (g)	每盆理论产量 (g)	每盆实际产量 (g)
T4	40.8a	31.08b	91.44a	25.21a	29.23b	28.39b
T7	43.6a	53.74a	85.90a	23.36a	47.02a	37.99a
T9	43.8a	60.54a	91.97a	25.13a	61.29a	38.66a

T4、T7 和 T9 处理见表 4;同一列数据后不同小写字母代表 T4、T7、T9 处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

3 讨论

种植水稻是盐碱地改良的有效措施<sup>[11-14]</sup>,结合脱硫石膏+改良剂+有机肥的施用,可以获得最高的水稻经济产量和盐碱地改良的最佳效果。白海波等<sup>[15]</sup>研究发现,施用  $2.25\times 10^4$  kg/hm<sup>2</sup> 脱硫石膏能够显著提高盐碱地水稻植株不同生育期保护酶活性,减少体内活性氧过量累积,从而增强其耐盐性。随着脱硫石膏施用量的增加,水稻各生育期叶片和根系丙二醛含量、细胞质膜相对透性、超氧阴离子自由基产生速率和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 含量呈先减少后增加的趋势,超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶的活性则表现为先增加后减少的趋势,脱硫石膏施用量为  $2.25\times 10^4$  kg/hm<sup>2</sup> 时,水稻整个生育期内抗氧化保护酶的活性最高,而活性氧的含量最低和膜脂过氧化作用最弱。田蕾等<sup>[8]</sup>研究结果表明,随脱硫石膏施用量增加,水稻叶片细胞质膜相对透性、丙二醛含量呈现先减后增的趋势。

本研究通过回归分析,明确了脱硫石膏+改良

剂、有机肥、灌水、种植水稻 4 个因素对土壤的 pH 值、碱化度、全盐、速效钾、速效磷、碱解氮、有机质及土壤离子等理化指标的增减效应及贡献率,得出脱硫石膏+改良剂对 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 含量的影响为正效应,对 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup> 含量的影响为负效应,可使 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 增加、Cl<sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 减少,与已有研究结果<sup>[16-18]</sup> 一致,主要原因是脱硫石膏中以硫酸钙为主,因此 Ca<sup>2+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Mg<sup>2+</sup> 增加。脱硫石膏中的 Ca<sup>2+</sup> 置换出吸附在土壤胶体中的 Na<sup>+</sup>,置换出的钠离子通过水的淋洗排出土壤外,同时, Ca<sup>2+</sup> 能够结合土壤中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>,从而降低土壤中的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量。

对种植水稻处理(T4、T7、T9 处理)进行了分析,得出株高、叶片 SPAD 值、光合速率、脯氨酸含量、过氧化物酶、过氧化氢酶活性等水稻生长指标、生理指标及生化指标可作为水稻盐碱胁迫的主要指标。水稻叶片水势、相对电导度、丙二醛、可溶性糖含量、超氧化物歧化酶活性、四氮唑还原强度等指标

由于随水稻生长变化较大,仅可作为水稻盐碱胁迫特定时期的参考指标。光合速率可反映水稻盐碱胁迫时处理间差异,而气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率由于受气孔开合程度及水分蒸腾影响,仅可作为水稻盐碱胁迫的光合生理影响参考指标。

T4、T7、T9 处理在干物质积累和产量上也表现出很大差异。T9 处理,即脱硫石膏 ( $2.25 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ) + 改良剂 ( $1.50 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ) + 有机肥 ( $3.00 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ) + 灌水 ( $1.80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) + 种植水稻处理,水稻产量最高,每盆 38.66 g, T7 处理产量次之,每盆 37.99 g, T9、T7 处理产量显著高于 T4 处理。T9、T7 处理增产的主要原因是穗粒数较多,与 T4 处理差异较显著,与侯晓华等<sup>[19]</sup>的研究观点一致,即在盐碱土地地区,单位面积的穗粒数是影响产量的决定因素,应重视前期施肥,适当增加基肥和分蘖肥用量,促使秧苗早生快发,增加有效分蘖,以增加收获穗数和穗粒数,获得水稻高产。本试验有机肥增产效果(T9 处理-T4 处理)为每盆 10.27 g, 脱硫石膏+改良剂增产效果(T9 处理-T7 处理)为每盆 0.67 g,这与张永宏等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,即施用土壤改良剂对土壤及水稻生长有一定的促进效果。盐碱地改良还需重视耕作、栽培模式以及有机肥无机肥的合理施用<sup>[21-23]</sup>。综上所述,盐碱地种植水稻,需采用脱硫石膏 ( $2.25 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ) + 改良剂 ( $1.50 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ) + 有机肥 ( $3.00 \times 10^4 \text{ kg/hm}^2$ ) + 灌水 ( $1.80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) 的集成模式进行改良,改土效果和水稻经济产量好于单一改良措施。

#### 参考文献:

- [1] 曾玲玲,季生栋,王俊强,等.植物耐盐机理的研究进展[J].黑龙江农业科学,2009(5):156-159.
- [2] 李彬,王志春,孙志高,等.中国盐碱地资源与可持续利用研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):154-157.
- [3] 王彬,肖国举,杨涓,等.燃煤烟气脱硫废弃物施用对碱化土壤种植甜高粱的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):206-211.
- [4] 李松龄.脱硫废弃物改良盐碱土效果及对玉米生长发育的影响[J].西北农业学报,2012,21(8):94-100.
- [5] 黄菊莹,余海龙,张俊华,等.脱硫废弃物和专用改良剂在碱化土壤改良中的效果[J].土壤通报,2011,42(6):1467-1471.
- [6] 魏耀锋,苏德喜,李辉,等.施用燃煤烟气脱硫废弃物改良盐碱土的效应研究[J].安徽农业通报,2013,19(1-2):70-72.
- [7] 罗成科,肖国举,张峰举,等.脱硫石膏改良中度苏打盐渍土用量的研究[J].生态与农村环境学报,2009,25(3):44-48.
- [8] 田蕾,王彬,张雪艳,等.脱硫石膏改良盐碱土对水稻秧苗素质、根系特征及质膜透性的影响[J].广东农业科学,2014,41(21):1-6.
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [10] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [11] 赵国臣,齐春艳,侯立刚,等.吉林省苏打盐碱地水稻生产历史进程与展望[J].沈阳农业大学学报,2012,43(6):673-680.
- [12] 王云贺,王志春,杨帆,等.施用脱硫石膏对稻田碱土和排水可溶性盐分的影响[J].华南农业大学学报,2014,35(6):113-116.
- [13] 黄菊莹,余海龙,孙兆军,等.添加燃煤脱硫废弃物和专用改良剂对碱化土壤和水稻生长的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):70-74.
- [14] 陈永伟,马琨,胡景田,等.脱硫废弃物改良盐碱地对水稻生长发育及土壤的影响[J].宁夏大学学报:自然科学版,2011,32(3):288-292.
- [15] 白海波,毛桂莲,李晓慧,等.脱硫废弃物对盐碱地水稻活性氧代谢的影响[J].西北植物学报,2010,30(11):2225-2231.
- [16] 崔媛,张强,王斌,等.施加脱硫石膏对苏打盐化土不同层次主要离子的影响[J].山西农业科学,2016,44(1):48-52.
- [17] 李明,姜丽丽,孙兆军,等.脱硫废弃物对盐渍化土壤盐基离子和油菜生长的影响[J].西北农业学报,2014,23(12):128-134.
- [18] 张峰举,许兴,肖国举.脱硫石膏对碱化土壤团聚体特征的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(6):108-114.
- [19] 侯晓华,何绍桓.不同施氮法对盐碱土水稻生育和产量的影响[J].盐碱地利用,1990(1):13-19.
- [20] 张永宏,桂林国,尹志荣,等.不同土壤调理剂对盐碱地土壤理化性质及水稻产量的影响[J].安徽农业科学,2011,39(11):6491-6494.
- [21] 房宸,苏德荣,端温文,等.脱硫石膏与灌溉耦合对滨海盐碱土化学性质的影响[J].水土保持学报,2012,26(5):59-63.
- [22] 马巍,侯立刚,齐春艳,等.吉林省盐碱稻区不同栽培模式对土壤性质及水稻生长的影响[J].吉林农业科学,2014,39(4):17-21.
- [23] 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.

(责任编辑:陈海霞)