脱硫石膏与结构改良剂配合施用对龟裂碱土理化性状和水稻生长的影响

杜雅仙[1]，黄菊莹[2]，康扬眉[1]，马凯博[1]，余海龙[1]，张俊华[2]
（1. 宁夏大学 资源环境学院，宁夏 银川 750021；2. 宁夏大学 环境工程研究院，宁夏 银川 750021）

摘　要：[目的] 筛选出最适宜宁夏回族自治区银北灌区盐碱地水稻生长的土壤结构改良剂施用量，为中国同类型地区盐碱地的改良应用提供科学依据。[方法] 设置田间定位试验，研究银北灌区龟裂碱土在施用不同剂量土壤结构改良剂(0，150，270，375 kg/hm^2)与统一施用定量脱硫石膏(22.5 t/hm^2)对土壤基本理化性质及水稻生长的影响。[结果] 在施用不同剂量结构改良剂后，0—20 cm 土层的土层容重、全盐量和 pH 值呈降低趋势，总孔隙度和水稳性团聚体则呈增加趋势。在 0—20 cm 土层，各处理改良效果均较显著，当深度大于 40 cm 时，所有处理的改良效果不明显。施加改良剂增加了水稻的成活率、株高和产量，且各处理间均差异显著($p<0.05$)。[结论] 脱硫石膏与结构改良剂配合施用能显著改善龟裂碱土理化性状，促进水稻成长。综合考虑经济因素，脱硫石膏(22.5 t/hm^2)＋土壤结构改良剂(270 kg/hm^2)的施用量效果最佳。

关键词：龟裂碱土；脱硫石膏；结构改良剂；改良；水稻
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2018)05-0046-06　　**中图分类号**：S156.4，S511

文献参数：杜雅仙，黄菊莹，康扬眉，等. 脱硫石膏与结构改良剂配合施用对龟裂碱土理化性状和水稻生长的影响[J]. 水土保持通报，2018，38(5)：46-51. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20180920.001. Du Yaxian, Huang Juying, Kang Yangmei, et al. Effect of desulfurized gypsum and structure amendment application on soil physical and chemical properties of takyr solonetz soil and rice growth[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 46-51.

Effect of Desulfurized Gypsum and Structure Amendment Application on Soil Physical and Chemical Properties of Takyr Solonetz Soil and Rice Growth

DU Yaxian[1], HUANG Juying[2], KANG Yangmei[1], MA Kaibo[1], YU Hailong[1], ZHANG Junhua[2]
(1. *College of Recourses and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*;
2. *Institute of Environmental Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

Abstract: [Objective] To selecte the optimal application amount of soil structure amendment for the growth of rice in saline alkali land in the Yinbei irrigated area of Ningxia Hui Autonomous Region, in order to provide scientific basis for the improvement and application of saline alkali land of the same type in China. [Methods] A field experiment was conducted in Yinbei irrigation region in 2016. Different application rate of soil structure amendment (0, 150, 270 and 375 kg/hm^2) with uniform desulfurized gypsum application rate (22.5 t/hm^2) were used in the experiment. [Results] With the application of desulfurized gypsum and structure amendments, the pH value, total salt content and bulk density at 0—20 cm soil layer showed a decreasing trend, while the total soil porosity and water-stable aggregate content showed an increasing trend. The improvement effect was better at 0—20 cm layer, but the effect was not obvious below the depth of 40 cm. Application of the amendment increased the survival rate, plant height and yield of rice, and there were significant differences between treatments ($p<0.05$). [Conclusion] The application of desulfurized gypsum and structure amendment can significantly improve the physical and chemical properties of the takyr solonetz

收稿日期：2017-12-25　　**修回日期**：2018-04-17
资助项目：国家自然科学基金项目“干湿交替灌溉模式下灌淤土裂隙特征及其对优先流的影响”(41561060)
第一作者：杜雅仙(1993—)，女(汉族)，宁夏回族自治区中卫市人，硕士研究生，研究方向为生态恢复。E-mail：15109685601@163.com。
通讯作者：余海龙(1979—)，男(汉族)，甘肃省酒泉市人，博士，教授，硕士生导师，主要从事恢复生态学研究。E-mail：yhl@nxu.edu.cn。

soil and promote the growth of rice. Considering the economic factors, the optimal soil structure amendment rate was 270 kg/hm^2 and the optimal desulfurized gypsum application amount was 22.5 t/hm^2.

Keywords: takyr solonetz soil; desulfurized gypsum; structure amendment; reclamation; rice

盐碱地的高效利用对中国耕地农业生产力的提升,耕地数量的增加,国家粮食安全的保障,1.20×10^8 hm^2 耕地红线的坚守,具有重要意义[1]。中国的盐碱地资源量多且分布广泛。据全国第二次土壤普查数据,中国盐渍土总面积约 3.60×10^7 hm^2,占全国可利用土地面积的 4.88%[2],主要分布在西北、华北、东北和沿海地区。随着中国人口数量的不断增长以及在推进城市化进程中人均耕地面积的减少,作为重要的土地资源之一的盐碱地,其改良与利用对确保中国耕地"红线"不被突破及实现农业可持续发展具有重要意义[3]。银北灌区由于长期的引黄灌溉,灌溉定额大,灌溉水的利用效率低,致使地下水位升高,引起明显的土壤次生盐渍化现象[4]。银北灌区有1.533×10^6 hm^2 盐碱荒地,属于典型的宜垦荒地[5]。银北灌区土壤的 pH 值与碱化度较高,质地粘重,土壤肥力较低。这些区域多为低产田或撂荒地,虽然土壤理化性状不良,但地势平坦,土层深厚,具有开发利用的潜力。对其进行改良、开发和利用,可缓解人口与土地间的矛盾,对保持农业可持续发展、改善生态环境,推动区域经济、社会和生态可持续发展具有重要意义。

近年来,利用燃煤烟气脱硫废弃物作为盐碱地土壤改良剂已经得到了广泛应用。大量研究表明,施用脱硫石膏改良盐碱地可以在一定程度上提高土壤养分、降低土壤 pH 和碱化度、改善土壤结构,从而使作物出苗率和产量提高,但由于各地土壤、地下水、气候和生态环境等主要影响因素不同,改良剂的改良效果差距很大[6-13]。利用脱硫石膏改良碱化土壤,虽然可以消除或减轻交换性 Na^+ 对作物的危害,但对碱化土壤"粘、板、瘦"等理化特性导致的作物生长不良问题无明显改善[14]。当下,碱化土壤改良剂种类多样,而组成物料的差异性同样较大,一旦用量不够,便会减弱改良的效用,乃至没有任何效用,过多的用量,会增加成本,导致虚耗;一些改良剂甚至会污染土壤,因此,生产成本较低、效用较高的环保改良剂十分关键。所以,根据不同的成因选择合适的改良措施,并结合综合的治理方式改良盐碱地,才会取得较好的改良效果。

因此,针对河套灌区典型盐碱地土壤特性,研究适合该地区水稻的高效、安全、低成本的功能性结构改良剂,是提高该地区盐碱地改良效果的迫切需求。基于已有研究中脱硫石膏改良盐碱地的显著效果,本研究拟研制以脱硫石膏为主体的盐碱土改良剂。为探明盐碱地改良剂改良龟裂碱土的应用效果,本研究于 2016 年设置了脱硫石膏与不同剂量结构改良剂配合施用对盐碱地种植水稻效果的田间试验,以探明改良剂对水稻成活率、生长、生物产量及土壤理化性状的影响,旨在筛选出最适宜银北灌区盐碱地水稻生长的土壤结构改良剂施用量,同时也为中国同类型地区盐碱地的改良应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　样地概况

试验地位于宁夏银北西大滩,地处贺兰山东麓洪积扇的边缘,地理坐标为 114°24′E,35°01′N,属于干旱的暖温带季风气候,年均气温 13.9 ℃,多年平均降雨量为 205 mm,年蒸发量 1 875 mm。地下水埋深约 1.50 m,地下水主要含氯化物和硫酸盐。境内分布有典型的龟裂碱土(俗称白僵土)。土壤碱化度约为 15.00%～60.00%,pH 值约为 8.00～10.40,全盐约为 2.50‰～6.50‰。土壤盐分分布有明显的表聚性,盐分类型主要有 NaCl,Na_2SO_4,Na_2CO_3,土壤质地粘重,透水性较差[15]。

1.2　试验材料

供试作物为水稻。

脱硫石膏由宁夏马莲台电厂提供,其 pH 值为 7.95,容重为 1.03 g/cm^3,含 11.10%的结晶水,其化学成分含量见表 1[16]。

表 1　马莲台电厂脱硫石膏的化学成分

项目	SO_3	CaO	MgO	Al_2O_3	Cl	Na_2O	K_2O	P_2O_5	其他
含量/%	49.52	34.12	1.01	1.00	0.57	0.27	0.11	0.02	2.18

结构改良剂由生化黄腐酸、硝酸铵钙、微生物菌剂按 10∶3∶7 的比例配制而成。这些物质可以改善土壤结构,提高土壤养分,促进种子萌发[17-18]。

1.3　研究设计

试验共设 5 个处理(如表 2),4 次重复(共 20 个小区),随机区组排列。小区面积 8 m×8 m。根据处

理要求先划定小区，小区之间打埂，高 30 cm，宽 50 cm。种植前结合整地将脱硫石膏与有机肥一次性人工均匀施于地表，深翻 15—20 cm，保证与土壤充分混匀。再施入所需结构改良剂、有机肥和化肥，深翻混合均匀，然后灌水进行水稻移栽。每个处理除改良剂施用量不同外，其他管理方式均一致。基肥施用量：有机肥(30 t/hm^2)和无机肥(含 N34%的尿素 450 kg/hm^2，含 $P_2O_5$12%的过磷酸钙 690 kg/hm^2，含 K_2O 50%的硫酸钾 50 kg/hm^2)。在苗期追施 45 kg/hm^{2}尿素，在分蘖期追施 90 kg/hm^2 尿素，尿素在孕穗期追施 45 kg/hm^2。

表 2 试验地脱硫石膏和结构改良剂施用量

处 理	T_1(CK)	T_2	T_3	T_4	T_5
脱硫石膏/(t·hm^{-2})	0	22.5	22.5	22.5	22.5
结构改良剂/(kg·hm^{-2})	0	0	150	270	375
结构改良剂成本/元	0	0	450	810	1125

注：T_1 为空白处理；T_2 为单施 22.5 t/hm^2 脱硫石膏；T_3 为 22.5 t/hm^2 脱硫石膏和 150 kg/hm^2 土壤结构改良剂配合施用；T_4 为 22.5 t/hm^2 脱硫石膏和 270 kg/hm^2 土壤结构改良剂配合施用；T_5 为 22.5 t/hm^2 脱硫石膏和 375 kg/hm^2 土壤结构改良剂配合施用。下同。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 *土壤指标的测定* 于 2016 年 4 月中旬和 10 月上旬在每个小区不同深度采集土壤样品，每个小区采集 3 个土样混匀，风干后过筛进行土壤指标的测定。土壤有机质、全 N、全 P、碱解 N、速效 P、速效 K 参考鲍士旦的《土壤农化分析》[19]。酸度计法测定 pH 值、残渣烘干法测定全盐、环刀法测定容重、湿筛法测定水稳性团聚体。

1.4.2 *植物指标的测定* 分别于 2016 年 6 月上旬、7 月下旬和 10 月上旬对水稻试验地进行了水稻成活率、株高和产量的调查。

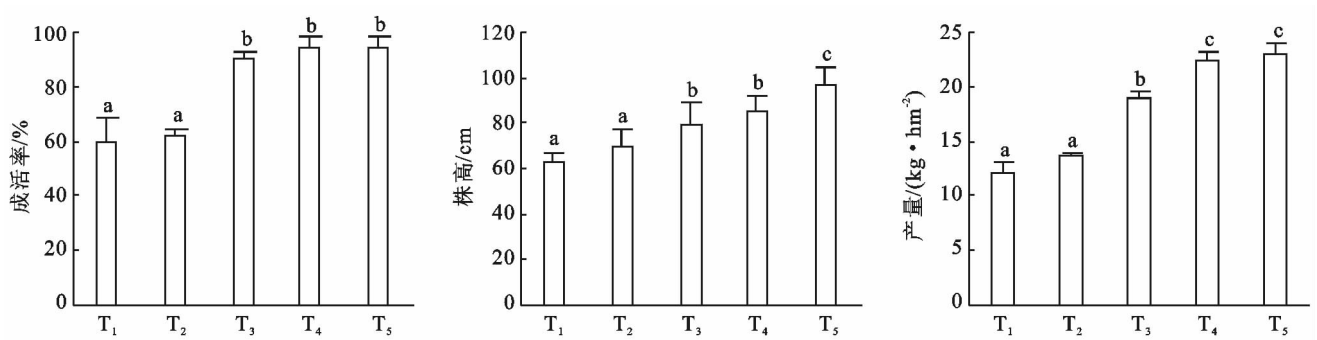
1.5 数据分析

统计分析和图表绘制在 Excel 2007 和 SPSS 13.0 数据分析软件中完成。采用 one-way ANOVA 进行单因素方差分析，采用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较。数据点为平均值±SE(n=4)。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻生长的影响

分别于 2016 年 6 月上旬、7 月下旬和 10 月上旬对 2016 年水稻试验地进行了水稻成活率、株高和亩产量的调查(图 1)。结果显示，脱硫石膏及其与结构改良剂的配合施用下，水稻的成活率、株高和产量较高。单施脱硫石膏后，水稻成活率、株高和产量较对照分别提高了 4.90%，9.50%和 13.14%。脱硫石膏配合结构改良剂施用下，水稻成活率、株高和产量分别提高了 52.00%～58.80%，26.30%～53.80%和 57.02%～91.27%，且结构改良剂施用量越大水稻成活率、株高和产量越高，说明脱硫石膏与结构改良剂的配合施用促进了水稻的生长。但 T_4 处理较 T_3 处理的水稻产量增幅为 18.32%，而 T_5 处理较 T_4 处理的水稻产量增幅为 2.95%，考虑到结构改良剂的成本，说明 T_4 处理为改良剂最佳施用量。



注：小写字母代表各处理间的差异性，字母不同代表差异显著(p<0.05)；T_1 为空白处理；T_2 为单施 22.5 t/hm^2 脱硫石膏；T_3 为 22.5 t/hm^2 脱硫石膏和 150 kg/hm^2 土壤结构改良剂配合施用；T_4 为 22.5 t/hm^2 脱硫石膏和 270 kg/hm^2 土壤结构改良剂配合施用；T_5 为 22.5 t/hm^2 脱硫石膏和 375 kg/hm^2 土壤结构改良剂配合施用。下同。

图 1 不同处理间水稻成活率、株高及产量的比较

2.2 不同处理对土壤性状的影响

于 2016 年 10 月上旬测定了水稻试验地土壤理化性质，结果显示：单施脱硫石膏提高了土壤有机 C，全 P、碱解 N 和全盐含量(表 3)，降低了速效 K，pH 值，对全 N 和速效 P 含量影响不显著。脱硫石膏配合结构改良剂施用使有机 C 含量提高了 26.46%以上，且 T_3 处理的施用量下有机 C 含量最高，这不仅是由于结构改良剂的主要成分为生化黄腐酸等富含有机质的物料，而且结构改良剂中含有大量微生物，促进了根系和地上凋落物的分解。但对全 N 和全 P

含量影响不显著,碱解 N、速效 P,pH 值和全盐的变化与结构改良剂的施用量密切相关。总体来看,脱硫石膏配合结构改良剂施用提高了碱解 N 和速效 P 含量,但降低了速效 K 含量,这可能是因为水稻的加速生长增加了对土壤速效 K 的消耗。对土壤容重和孔隙度的测定结果表明(表 4),单施脱硫石膏对土层容重和总孔隙度影响不显著。

脱硫石膏配合结构改良剂施用后,0—20,20—40 和 40—60 cm 土层容重分别降低了 5.76%～11.51%,6.25%～10.42%和 4.08%～8.84%,3 个土层总孔隙度分别提高了 6.35%～12.68%,7.45%～12.40%和 5.08%～11.00%。结构改良剂的 3 个施用量之间,T5 处理的施用量下具有最低的土壤容重和最高的总孔隙度。

表 3　不同处理间土壤理化性质的比较

指 标	土层/cm	种植前	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
有机 C/(g·kg^{-1})	0—20	3.95	4.27^{a}	5.25^{a}	12.18^{b}	5.48^{a}	5.40^{a}
	20—40	3.82	3.21^{a}	4.97^{a}	9.53^{b}	3.23^{a}	3.55^{a}
	40—60	3.18	2.98^{a}	9.39^{b}	3.51^{a}	2.90^{a}	2.28^{a}
全 N/(g·kg^{-1})	0—20	0.38	0.43^{a}	0.47^{a}	0.49^{a}	0.52^{a}	0.57^{a}
	20—40	0.35	0.34^{a}	0.42^{a}	0.44^{a}	0.39^{a}	0.33^{a}
	40—60	0.35	0.39^{a}	0.37^{a}	0.38^{a}	0.35^{a}	0.33^{a}
全 P/(g·kg^{-1})	0—20	0.59	0.65^{a}	0.78^{a}	0.75^{a}	0.73^{a}	0.79^{a}
	20—40	0.53	0.70^{ab}	0.69^{ab}	0.80^{a}	0.67^{ab}	0.62^{b}
	40—60	0.57	0.70^{a}	0.67^{a}	0.73^{a}	0.70^{a}	0.48^{b}
碱解 N/(mg·kg^{-1})	0—20	19.26	28.67^{ac}	33.73^{b}	26.70^{a}	32.86^{bc}	34.26^{b}
	20—40	15.32	13.98^{a}	19.58^{b}	23.77^{c}	19.58^{b}	28.67^{c}
	40—60	10.25	11.24^{a}	16.78^{ab}	18.18^{b}	16.16^{ab}	18.97^{b}
速效 P/(mg·kg^{-1})	0—20	10.55	16.88^{a}	16.17^{a}	18.66^{a}	27.13^{b}	26.88^{b}
	20—40	6.52	5.72^{a}	6.68^{ab}	12.63^{c}	6.38^{ab}	8.63^{b}
	40—60	4.28	4.38^{a}	4.08^{a}	13.25^{b}	5.25^{a}	4.60^{a}
速效 K/(mg·kg^{-1})	0—20	319.15	382.47^{a}	308.76^{b}	348.02^{ab}	339.32^{ab}	317.73^{b}
	20—40	326.10	367.27^{a}	319.36^{b}	308.76^{b}	300.80^{b}	339.32^{ab}
	40—60	320.02	335.33^{a}	329.34^{a}	318.36^{ab}	297.01^{b}	249.03^{c}
pH 值	0—20	9.41	9.29^{a}	8.71^{ab}	8.17^{b}	8.23^{b}	8.72^{ab}
	20—40	9.64	9.54^{a}	9.31^{a}	8.29^{b}	9.34^{a}	9.45^{a}
	40—60	9.28	9.44^{a}	9.52^{a}	8.28^{b}	9.35^{a}	9.42^{a}
全盐/(g·kg^{-1})	0—20	4.54	4.56^{a}	3.37^{a}	2.50^{ac}	1.84^{c}	1.64^{c}
	20—40	4.89	1.94^{a}	2.03^{ab}	1.99^{a}	1.97^{a}	2.35^{b}
	40—60	3.38	1.68^{a}	2.14^{a}	1.56^{a}	1.87^{a}	2.91^{b}

表 4　不同处理间土壤容重和总孔隙度的比较

指 标	土层/cm	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
容重/(g·cm^{-3})	0—20	1.39^{a}	1.36^{a}	1.30^{ab}	1.31^{ab}	1.23^{b}
	20—40	1.44^{a}	1.39^{ab}	1.35^{ab}	1.32^{b}	1.29^{b}
	40—60	1.47^{a}	1.41^{ab}	1.41^{ab}	1.38^{ab}	1.34^{b}
总孔隙度/%	0—20	47.55^{a}	48.68^{a}	50.94^{ab}	50.57^{ab}	53.58^{b}
	20—40	45.66^{a}	47.55^{a}	49.06^{ab}	50.19^{ab}	51.32^{b}
	40—60	44.53^{a}	46.79^{a}	46.79^{a}	47.92^{a}	49.43^{a}

同期,对土壤水稳性团聚体的分析表明(表 5),脱硫石膏及其与结构改良剂的配合施用改变了水稻试验地不同土层各粒级土壤水稳性团聚体的含量。对于 0—20 cm 土层而言,单施脱硫石膏提高了>5,2～5,1～2 和 0.25～0.5 mm 团聚体的百分比,降低了 0.5～1 和<0.25 mm 级别的团聚体百分比。配合结构改良剂施用后,>5,2～5 和 0.25～0.5 mm 粒级团聚体随施用量增加而增加,1～2 和 0.5～1 mm 粒

级团聚体随施用量增加而降低，而<0.25 mm粒级团聚体在T_3处理的施用量下最低，T_4处理的施用量下最高；对于20—40 cm土层而言，脱硫石膏及其与结构改良剂的配合施用提高了>5和1～2 mm粒级团聚体含量，降低了2～5和<0.25 mm粒级团聚体含量；对于40—60 cm土层而言，脱硫石膏及其与结构改良剂的配合施用也提高了>5 mm粒级团聚体含量，但对<0.25 mm粒级团聚体含量的影响不明显（变化范围为73.17%～76.34%）。总体而言，脱硫石膏及其与结构改良剂的配合施用提高了大粒级团聚体含量，降低了小粒级团聚体含量，且结构改良剂施用量越大效果越明显，主要表现在3个土层>5 mm粒级团聚体含量升高，0—20和20—40 cm土层<0.25 mm粒级团聚体含量降低。

表5 不同处理间土壤水稳性团聚体含量的比较 %

土层/cm	分级团聚体/mm	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
0—20	>5	2.57	4.04	7.80	6.01	8.59
	2～5	3.69	4.18	1.74	2.15	8.71
	1～2	4.22	5.93	15.24	9.37	11.10
	0.5～1	5.75	3.64	12.38	2.78	2.95
	0.25～0.5	4.81	18.33	4.67	5.21	6.88
	<0.25	78.95	63.88	58.17	74.48	61.76
20—40	>5	3.75	3.67	4.22	4.72	4.27
	2～5	9.36	3.50	5.45	5.55	3.35
	1～2	7.87	5.10	13.63	12.33	16.42
	0.5～1	3.39	4.25	9.47	2.21	2.46
	0.25～0.5	12.38	14.29	12.46	12.54	14.66
	<0.25	63.24	75.75	54.76	62.65	58.85
40—60	>5	3.05	3.75	3.61	7.67	7.76
	2～5	7.12	3.14	4.45	1.56	0.88
	1～2	2.32	9.06	1.70	7.69	6.69
	0.5～1	6.90	7.44	11.15	2.20	4.13
	0.25～0.5	4.96	2.71	2.74	7.72	5.99
	<0.25	75.65	73.90	76.34	73.17	74.56

3 讨论

3.1 单施脱硫石膏对土壤性质和水稻生长的影响

影响龟裂碱土作物生长的两个关键因素是代换性Na^+和pH值。龟裂碱土土壤复合体中有较高含量的Na^+，致使土壤颗粒高度分散，土壤结构较差。脱硫石膏作为改良剂可以显著改善碱化土壤的理化性质，促进作物的生长发育[20-21]。土壤微团聚体组成和土壤pH值可作为评价盐碱地改良效果的综合指标。脱硫石膏可以降低土壤的pH值和电导率，因其含有高价离子可以使土壤胶体表面的电位势降低，有助于土壤胶体的凝聚，促进土壤形成团粒结构，改善作物生长环境，促进植物生长[22-23]。这和本研究的结果相似，添加脱硫石膏改良剂可显著增加土壤水稳性团聚体，且表现为随施用量的越多，效果越显著。在评价脱硫石膏改良盐碱土壤的效果时，必须要考虑到土壤全盐的变化。脱硫石膏施用量过大反而会导致盐分的积累，从而抑制作物的出苗和生长。本研究结果发现土壤pH值和全盐含量的下降幅度并不与脱硫石膏的施用量呈正比，而是表现为施用量过多或过少均达不到最好的改良效果。也即是说仅依赖脱硫石膏这一种改良剂可能在降低土壤pH值的同时增加了全盐含量。张峰举等研究发现，施用脱硫石膏降低了土壤容重，提高了团聚体的稳定性，改善了土壤的物理性状[24]。本研究结果表明：单施脱硫石膏可降低土壤容重，提高总孔隙度和>5 mm粒级团聚体含量，但其影响不显著，且对水稻的生长发育影响较小，脱硫石膏虽然可以减轻交换性Na^+对作物的危害，但对碱化土壤结构改良效果有限。因此，有必要将脱硫石膏配合土壤结构改良剂来改善碱化土壤的结构。

3.2 脱硫石膏配合结构改良剂施用对土壤性质和水稻生长的影响

土壤pH值是反映土壤酸碱状况的重要土壤指标，直接影响土壤养分的存在形态、转化和有效性，进而直接影响作物的生长发育。土壤结构改良剂中含有生化黄腐酸、硝酸铵钙和微生物菌剂，这些物质可提高土壤肥力，增加土壤中的微生物数量和酶活性，从而促进土壤水稳性团聚体的形成，降低容重，提高土壤总孔隙度，使得作物能健康生长发育[18,25-27]。生化黄腐酸作为酸性材料，可显著地降低土壤pH值，且具有较强的吸附力，能够固定土壤胶体中的钠盐，减小Ca^{2+}扩散到土壤颗粒孔隙内部的阻力，活化土壤中的Ca^{2+}，保证碱化土壤胶体吸附Na^+与Ca^{2+}的置换反应正常进行，被交换的Na^+不被淋失。不同改良剂对土壤pH值的影响是不同的，张俊华等[28]研究发现，施用脱硫废弃物和专用改良剂大幅度增加了土壤有机质和养分含量，降低了土壤pH值和ESP。王金满等[29]分析了脱硫石膏与微生物菌剂联合施用对盐碱化土壤的改良效果，结果表明脱硫石膏和微生物菌剂配合施用后一定程度上增加了土壤有机C、全N和速效养分，且其改良效果比单独施用脱硫石膏或微生物菌剂更好。本研究中，结构改良剂和脱硫石膏的配合施用在一定程度上提高了水稻试验地土壤有机C，全N，速效P和速效K的含量，降低了pH值、全盐和容重，提高了水稻产量，说明本研究采用的改良

措施有利于水稻在盐碱地中生长,与王金满等[28]和张俊华等[29]的研究结果一致。脱硫石膏施入土壤之后,会释放大量的 SO_4^{2-},S 作为一种有益元素,对植物的生长有促进作用。然而,土壤的有机 C 含量随着结构改良剂施用量的增加而降低,且在 T_3 处理下最高,说明过高的结构改良剂施用不仅对微生物产生一定程度的毒害,而且随着微生物数量增加,微生物之间的竞争升高,反而降低了有机 C 含量,与段雪娇[30]的研究结果相似。

4　结 论

(1) 脱硫石膏与结构改良剂二者配合施用的效果优于脱硫石膏单施。相较于单施脱硫石膏,脱硫石膏与结构改良剂的配合施用对水稻的生长有更好的促进效果。在生产实践中,依据当地土壤盐碱程度,并综合考虑了水稻种植过程中的产投比,初步确定 T_4(脱硫石膏 22.5 t/hm^2 + 结构改良剂 270 kg/hm^2)为最佳的施用量。

(2) 不同用量改良剂对盐碱土壤物理化学性质有不同的影响,施入改良剂后土壤的强碱性得到显著改善,各项化学指标均向良性趋势发展,其中 pH 值、全盐含量、土壤容重降低,而土壤水稳性团聚体含量显著增加。当继续增加用量至一定数值,碱化度不再发生明显变化。

(3) 脱硫石膏和结构改良剂对土壤理化性质的改良效果和机理各有差异。脱硫石膏可为碱化土壤提供丰富的 Ca^{2+} 以置换土壤胶体上的 Na^+ 并中和碱性离子,进而减少土壤的碱性成分,降低土壤碱化度和 pH 值,并且对 S 元素的提供能力较强。硝酸铵钙的施用是盐碱土壤中总氮、有效氮的主要来源,尤其对有效氮含量具有显著影响;生化黄腐酸具有较强的吸附力,能够作为载体保证碱化土壤胶体吸附 Na^+ 与脱硫石膏中 Ca^{2+} 的置换反应正常进行。微生物菌剂的有益菌群在土壤中定殖后,分泌有机酸可以溶解释放出被土壤颗粒等吸附的 N,P,K 养分,从而延长了土壤养分的有效供给。

[参 考 文 献]

[1] 王佳丽,黄贤金,钟太洋,等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报,2011,66(5):673-684.

[2] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社,1998.

[3] 张翼夫,李问盈,胡红,等. 盐碱地改良研究现状及展望[J]. 江苏农业科学,2017,45(18):7-10.

[4] 杨建国,黄冠华,叶德智,等. 宁夏引黄灌区春小麦微咸水灌溉管理的模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(4):49-56.

[5] 安东,李新平,张永宏,等. 不同土壤改良剂对碱积盐成土改良效果研究[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(5):115-118.

[6] Wang S J, Chen C H, Xu X C, et al. Amelioration of alkali soil using flue gas desulfurization byproducts: Productivity and environmental quality[J]. Environmental Pollution, 2008,151(1):200.

[7] Clark R B, Ritchey K D, Baligar V C. Benefits and constraints for use of FGD products on agricultural land [J]. Fuel, 2001,80(6):821-828.

[8] Chun S, Nishiyama M, Matsumoto S. Sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulfurization: Corn production and soil quality[J]. Environmental Pollution, 2001,114(3):453-459.

[9] Sakai Y, Matsumoto S, Sadakata M. Alkali soil reclamation with flue gas desulfurization gypsum in China and assessment of metal content in corn grains[J]. Journal of Soil Contamination, 2010,13(1):65-80.

[10] 王金满,杨培岭,张建国,等. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究[J]. 农业工程学报,2005,21(9):33-37.

[11] 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.

[12] 王文杰,贺海升,祖元刚,等. 施加改良剂对重度盐碱地盐碱动态及杨树生长的影响[J]. 生态学报,2009,29(5):2835-2844.

[13] 肖国举,罗成科,张峰举,等. 脱硫石膏施用时期和深度对改良碱化土壤效果的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(6):197-203.

[14] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.

[15] 杨军,孙兆军,刘吉利,等. 脱硫石膏糠醛渣对新垦龟裂碱土的改良洗盐效果[J]. 农业工程学报,2015,31(17):128-135.

[16] 王静,孙兆军,张浩,等. 燃煤烟气脱硫废弃物改良土壤种植沙枣效果研究[J]. 中国农学通报,2011,27(28):98-102.

[17] 李亮,龚平. 生化黄腐酸型融雪剂对草莓的生理指标的影响[J]. 食品科技,2016,41(1):16-22.

[18] 逄焕成,李玉义,严慧峻,等. 微生物菌剂对盐碱土理化和生物性状影响的研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(5):951-955.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,1999.

[20] 赵锦慧,李杨,乌力更,等. 石膏改良碱化土壤的效果(Ⅱ):石膏与土上部 20 cm 混匀的土柱系列[J]. 长江大学学报:农学卷,2006,3(1):119-122.

(下转第 57 页)

genase, phosphatase, amylase and invertase enzyme activities [J]. International Journal of Agricultural and Food Science,2012,2(1):1-6.

[11] Emami S, Pourbabaee A A, Alikhani H A. Effect of paraffin on the urease activity of soil[J]. Technical Journal of Engineering and Applied Sciences, 2013,3(15):1526-1529.

[12] Shahriari F, Higashi T, Tamura K. Effects of clay addition on soil protease activities in andosols in the presence of cadmium[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010,56(4):560-569.

[13] Kizilkaya R, Akca I, Askin T. Effect of soil contamination with azadirachtin on dehydrogenase and catalase and catalase activity of soil [J]. Eurasian Journal of Soil Science, 2012,24(2):98-103.

[14] 潘洁,肖辉,程文娟,等. 木醋液土壤灌溉对土壤养分、番茄产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2016(2):61-64.

[15] Mungkunkamchao T, Kesmala T, Pimratch S, et al. Wood vinegar and fermented bioextracts: Natural products to enhance growth and yield of tomato(*Solanum lycopersicum* L.)[J]. Scientia Horticulturae, 2013,154(2):66-72.

[16] 张超,刘国彬,薛萧,等. 黄土氏陵区不同林龄人工刺槐林土壤酶演变特征[J]. 林业科学,2010,46(12):23-29.

[17] 叶存旺,翟巧绒,郭梓娟,等. 沙棘一侧柏混交林土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(5):1-6.

[18] 杨万勤,宋光煌,韩玉萍. 土壤生态学的理论体系及其研究领域[J]. 生态学杂志,2000,18(4):53-56.

[19] 张威,张明,张旭东,张乐,等. 土壤蛋白酶和芳香氨基酶的研究进展[J]. 土壤通报,2008(6):1468-1474.

[20] Kamimura Y, Hayano K. Properties of protease extracted from tea-field soil. [J]. Biology & Fertility of Soils, 2000,30(4):351-355.

[21] 钱洲,俞元春,俞小鹏,等. 毛乌素沙地飞播造林植被恢复过程土壤酶活性的变化[J]. 水土保持研究,2014,21(6):95-100.

[22] 余娜,刘济明,张超,等. 不同沙生植被土壤酶活性分异特征研究[J]. 水土保持研究,2010,17(1):77-79.

[23] 王兵,刘国彬,薛芝,等. 黄土丘陵区撂荒对土壤酶活性的影响[J]. 草地学报,2009,17(3):282-287.

[24] Alef K,Nannipieri P. Methods in applied soil microbiology and biochemistry[M]. London: Academic Press, 1995:46-52.

[25] 李忠徽,王旭东. 灌施木醋液对土壤性质和植物生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,27(2):510-516.

[26] 胡春花,达布希拉图. 木醋液和炭醋肥对设施蔬菜土壤肥力及蔬菜产量的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(10):218-223.

(上接第 51 页)

[21] 陈欢,王淑娟,陈昌和,等. 烟气脱硫废弃物在碱化土壤改良中的应用及效果[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(4):38-42.

[22] 李焕珍,徐玉佩,杨伟奇,等. 脱硫石膏改良强度苏打盐渍土效果的研究[J]. 生态学杂志,1999,18(1):25-29.

[23] 王金满,杨培岭,石懿,等. 脱硫副产物对改良碱化土壤的理化性质与作物生长的影响[J]. 水土保持学报,2005,19(3):34-37.

[24] 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.

[25] 王金满,白中科,叶驰驱,等. 脱硫石膏与微生物菌剂联合施用对盐碱化土壤特性的影响[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(6):1080-1087.

[26] 回振龙,李自龙,刘文瑜,等. 黄腐酸浸种对 PEG 模拟干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 西北植物学报,2013,33(8):1621-1629.

[27] 李志洪,李翠兰,王淑华,等. 有机、无机复合肥及调节剂对玉米根系生长和根际效应的影响[J]. 吉林农业大学学报,2004,26(2):165-169.

[28] 王金满,杨培岭,任树梅,等. 烟气脱硫副产物改良碱性土壤过程中化学指标变化规律的研究[J]. 土壤学报,2005,42(1):98-105.

[29] 张俊华,孙兆军,贾科利,等. 燃煤烟气脱硫废弃物及专用改良剂改良龟裂碱土的效果[J]. 西北农业学报,2009,18(5):208-212.

[30] 段雪娇. 微生物菌剂对水稻土土壤微生物数量及酶活性的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.