

羊草和脱硫石膏对内蒙古河套地区盐渍化土壤的改良效果

许 毅, 徐彦虎, 林启美, 李贵桐, 赵小蓉

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 为了解脱硫石膏和耐盐植物改良与培肥盐渍化土壤的作用与效果, 在内蒙古河套地区硫酸盐盐渍化土壤上设置田间试验, 测定施用脱硫石膏($30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)与不施用脱硫石膏并种植羊草后土壤盐分及基础理化性质的变化。结果表明: 春季灌溉可大幅度降低土体 pH 值、电导率(EC)和盐离子浓度, 施用脱硫石膏可加快降低土壤碱度, 主要盐分离子 Na^+ 和 SO_4^{2-} 分别降低了 80% 和 39% 以上, 但 EC 略有提高, 导致养分淋失; 羊草对脱硫石膏有良好的反应, 生物量提高了 30%, 但全磷含量降低了 22%, 全氮、全钾含量没有显著变化; 种植羊草降低 Na^+ 和 SO_4^{2-} 含量至 $3.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $132.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 且土壤有机质和碱解氮含量分别提高了 12% 和 37%, 同时施用脱硫石膏效果更好一些。说明脱硫石膏与羊草之间具有一定的相互作用, 可加速盐渍化土壤改良的进程, 但需要注意的是应适当增加施用 P、K 肥料, 以补充养分不足。

关键词: 羊草; 脱硫石膏; 盐渍化土壤

中图分类号: S156.4 文献标志码: A

Effects of *Aneurotepidimu chinense* and desulfurization gypsum on the amelioration of Na_2SO_4 saline soil in Hetao Inner Mongolia

XU Yi, XU Yan-hu, LIN Qi-mei, LI Gui-tong, ZHAO Xiao-rong

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To address the positive impacts of desulfurization gypsum and halophytes on saline soils, a field experiment was set up in a Na_2SO_4 saline soil of Hetao Inner Mongolia. Desulfurization gypsum was added into the soil and then *Aneurotepidimu chinense* were planted. The monitored parameters included salts and basic soil properties. The results showed that spring irrigation largely reduced the levels of pH, electrical conductivity (EC) and salt ions in all soil layers. Adding desulfurization gypsum resulted in further reduction of alkalinity. The main ions of Na^+ and SO_4^{2-} were reduced by more than 80% and 39%, respectively. However, the addition induced the increases of EC value and nutrient leaching. *Aneurotepidimu chinense* had a good positive response to desulfurization gypsum, increasing dry matter by 30%. But phosphorus content in plant tissues was decreased by 22%. The contents of N and K in plant tissues were not significantly influenced by adding desulfurization gypsum. *Aneurotepidimu chinense* cultivation resulted in significant decreases of Na^+ and SO_4^{2-} in soil to 3.38 and $132.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, but increases of soil organic matter and alkaline-released N by 12% and 37%, respectively. The better improvement on soil fertility was obtained when *Aneurotepidimu chinense* was grown along with the addition of desulfurization gypsum. It was evident that there was a positive interaction between *Aneurotepidimu chinense* and desulfurization gypsum, which accelerated the amelioration of saline soil. Additionally, it should be noticed that addition of PK fertilizers might be needed to compensate loss of soil available P and K nutrients.

Keywords: *Aneurotepidimu chinense*; desulfurization gypsum; saline soil

收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目“河套地区盐碱地耐盐植物高效利用与生态修复模式研究与示范”(2013BAC02B06)

作者简介: 许毅(1990—), 女, 山东蓬莱人, 硕士研究生, 主要从事土壤生物与生态系统健康研究。E-mail: xuyixw@163.com。

通信作者: 林启美(1961—), 教授, 主要从事土壤生物与生态系统健康研究。E-mail: linqm@cau.edu.cn。

全球有 9.5×10^4 万 hm^2 的土地受到不同程度的盐渍化危害,其中每年大约有 1 000 万 hm^2 土地因盐渍化而荒废^[1]。我国盐渍化土壤面积约 3 667 万 hm^2 ,其中盐渍化耕地面积近 670 万 hm^2 ,约占全国总耕地面积的 5%,主要分布在干旱、半干旱地区^[2]。因而,对于人多、耕地面积少的中国,改良利用盐渍化土壤,扩大耕地面积,提高单位面积产量,是长期面临的重大任务。

降低盐分含量是盐渍化土壤改良的首要任务,所采用的措施包括水利工程、施用化学改良剂、耕作栽培等农学措施,以及种植耐盐植物等生物技术措施。石膏是最常用的盐渍化土壤改良剂,脱硫石膏是燃煤发电厂废气脱除二氧化硫(SO_2)的产物,其主要成分和性质与天然石膏几乎相同^[3]。不少研究结果显示,脱硫石膏具有明显的改良盐渍化土壤的作用,如降低土壤的碱化度、pH 值以及增加土壤透水性^[4-5]。中国脱硫石膏年产生量也超过 100 万 t,并有逐年增长的势头^[4-6],亟待安全处置与资源化利用。

生物改良盐渍化土壤措施近来备受关注,主要是通过种植耐盐植物,以降低土壤盐分含量,提高土壤肥力。耐盐植物种类很多,包括真盐生植物、泌盐盐生植物和假盐生植物。据报道,柽柳、苇状羊茅、油葵等盐生植物,能有效地降低土壤盐分含量,表层土壤盐分分别降低 86.4%、71.5%、46.1%,还能够提高土壤肥力,土壤有机质含量分别提高 73.7%、

38.2%、21.3%^[7]。

最新研究结果显示,多种技术措施有机结合,不仅加快盐渍化土壤脱盐和土壤肥力提高的进程,而且效益也明显提高。如灌排工程与种植先锋植物结合,施用化学改良剂与精耕细作结合等,不仅能够使土壤快速脱盐,而且加快土壤熟化,提高土壤肥力和提高作物产量^[8-10]。关于脱硫石膏与耐盐植物的相互作用及其对盐渍化土壤的改良作用与效果,目前还缺乏了解。

鉴于此,本研究在内蒙古鄂尔多斯市十二连城乡东不拉村黄河滩盐渍化土壤上,设置施用脱硫石膏并种植羊草的田间试验,通过分析土壤盐分及基础理化性质的差异与变化,以期研究了解:(1) 脱硫石膏对灌溉洗盐的影响;(2) 羊草对盐渍化土壤的改良培肥作用与效果;(3) 脱硫石膏与羊草相互作用及其对盐渍化土壤的改良培肥作用。

1 材料与方法

1.1 土壤

2012 年 5 月初,土壤解冻灌溉洗盐之前,用土钻随机 5 点采集剖面样品,测定土壤 pH 值、EC 及盐分离子组成及含量(表 1)。供试土壤为碱化度比较高的硫酸钠盐渍化土壤,表层土壤黏粒(< 0.002 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)及砂粒(0.05 ~ 2 mm)含量分别为 23%、22%、55%,为粉砂质黏壤土,次表层和底层土壤质地相似^[11]。地下水位 0.8 ~ 2.0 m。

表 1 供试土壤剖面 pH 值、EC 及盐分离子组成及含量

Table 1 Values of pH, EC and salt ions in the soil profile

土层/cm Soil	pH	EC /($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	K^+ /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Na^+ /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Ca^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Mg^{2+} /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Cl^- /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	SO_4^{2-} /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	CO_3^{2-} /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	HCO_3^- /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
0 ~ 20	9.67	1.60	105.17	3327.04	291.79	208.16	584.40	3769.73	0.00	894.99
20 ~ 35	9.74	0.70	153.80	1891.91	603.36	60.34	204.54	1981.40	34.62	917.11
35 ~ 70	9.45	0.31	202.42	745.67	400.59	220.83	102.27	1403.76	0.00	789.40

1.2 脱硫石膏

脱硫石膏来自内蒙古托克托县大唐发电厂,粒径 < 0.080 mm,石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)含量 89.8%。

1.3 田间试验

试验地点为内蒙古鄂尔多斯市十二连城乡东不拉村黄河滩,试验设计施用和不施用脱硫石膏两个处理,种植羊草(*Aneurotepidimu chinense*)。小区面积为 120 m^2 ,设置 3 个重复,脱硫石膏用量 30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。春季解冻后,用机械将脱硫石膏均匀撒施于地表,犁翻后旋耕,大水漫灌洗盐,灌溉量约为 2 000 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。不施用脱硫石膏小区进行同样操作。

土壤落干后用土钻随机 20 点采取表层土壤,以了解灌溉洗盐效果。5 月初,撒施氮磷复合肥(折合 N 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),耕地后条播种植羊草,播种量为 45 ~ 60 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。收获时(9 月底)同样用土钻采取 0 ~ 20 cm 表层土壤样品,测定 pH 值、EC、8 大盐离子、有机质、速效 N、速效 P、速效 K,同时测定 3 个 1 m^2 (1 m × 1 m) 样方面积的羊草地上部生物量,植物样品杀青烘干粉碎后测定全 N、全 P、全 K 含量。

1.4 测定项目与方法

土壤机械组成用吸管法;有机质用重铬酸钾外

加热容量法;速效氮用碱解扩散法;速效磷用 Olsen 法;速效钾用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NH_4OAc 浸提火焰光度计法;pH 值和 EC 用 5:1 水土比浸提,分别用 UB-7 精密 pH 计和雷磁 DDS-307A 电导仪测定^[12]。

土壤 8 大离子:称取 < 2 mm 风干土样 100.00 g 于 1 000 mL 三角瓶中,加入 500 mL 无 CO_2 蒸馏水(水土比 5:1),充分振荡 5 min,滤液中的 K^+ 、 Na^+ 用火焰光度法测定, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 用 EDTA 滴定法测定, SO_4^{2-} 用 EDTA 间接络合滴定法测定, Cl^- 用硝酸银滴定法测定, HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 用双指示剂-中和滴定法测定。植物样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{H}_2\text{O}_2$ 消煮,消煮液氮浓度用凯氏定氮法测定,磷用钒钼黄比色法测定,钾用火焰光度计法测定,计算植物体 NPK 含量^[12]。

1.5 数据统计分析

所有测量均用烘干质量表示,除非特别说明,均

表 2 施用脱硫石膏和种植羊草前后 0~20 cm 表层土壤养分含量

Table 2 Nutrient contents in the surface soils before and after adding desulfurization gypsum and planting of *Aneurotepidimu chinense*

脱硫石膏 Desulfurization gypsum	采样时期 Sampling time	有机质 Organic matter /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Available N /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
不施用 Not use	播种前 Preplanting	1.40	21.00	13.72	140.02
	收获期 Harvest time	1.57	28.70	10.16	99.77
施用 Use	播种前 Preplanting	1.11	33.60	11.68	69.59
	收获期 Harvest time	1.17	20.30	6.98	59.59
<i>LSD</i> _{0.05}		0.07	1.89	0.52	4.36

种植羊草提高了供试土壤有机质和碱解氮含量,比种植前分别提高了 12% 和 37%,但土壤速效磷和速效钾含量则分别降低了 26% 和 29%。但同时施用脱硫石膏的处理,所检测的土壤指标均有所降低,比不施用脱硫石膏处理,土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾分别降低了 34%、41%、46% 和 67%。说明单独种植羊草有一定的培肥土壤作用,但同时施用脱硫石膏,并没有增强羊草这种培肥土壤效应。

2.2 羊草和脱硫石膏对盐渍化土壤 pH 值、EC 的影响

灌溉洗盐大幅度地降低了各层土壤 pH 值,比初始值降低了 17%~21%,其中表层土壤降低的幅度更大一些。表层和亚表层土壤 EC 也显著降低,分别降低了 220% 和 8%,但底层土壤 EC 反而升高了 28%(表 1 和表 3)。施用脱硫石膏促进了表层土壤 pH 值下降,但 EC 值却提高了 66%,对亚表层与底层土壤 pH 值、EC 影响比较小。这说明在本地区灌溉可有效地降低土壤盐分和 pH 值,施用脱硫石膏可加剧 pH 值降低,但盐分含量有所提高,可能是

为 2 次测定的平均值。用 SPSS20.0 进行单因素方差分析,用 *LSD*_{0.05} 表示置信度达到 95% 的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 羊草和脱硫石膏对盐渍化土壤养分的影响

施用脱硫石膏并进行灌溉洗盐,降低了播种前土壤有机质、速效磷和速效钾含量,比不施用脱硫石膏的土壤分别降低了 21%、15% 和 50%,但土壤碱解氮含量提高了近 60%(表 2)。可见,施用脱硫石膏可能加剧了灌溉洗盐过程中土壤溶解态有机物质、水溶性磷和钾等养分的淋失,导致这些组分降低;但可能增强土壤有机氮的水解,从而提高土壤碱解氮含量。

脱硫石膏所补充的盐分。

种植羊草后,各层土壤 pH 值均有所提高,分别增加了 0.17、0.59、0.38 个单位;表层土壤 EC 显著提高 130%,但亚表层和底层土壤则降低了 52%、67%。同时施用脱硫石膏,土壤 pH 值没有显著性变化,但表层土壤 EC 降低了 60%,而亚表层和底层土壤则分别提高了 55% 和 185%。显然,种植羊草导致土壤盐分富集,表层土壤尤其强烈;施用脱硫石膏可减缓表层土壤盐分累积,但增强底层土壤盐分累积。

2.3 羊草和脱硫石膏对盐渍化土壤盐分离子浓度的影响

灌溉洗盐大幅度地降低了各层土壤几乎所有的盐分离子浓度,比起初始值, K^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 浓度降低了 95% 以上, Na^+ 和 SO_4^{2-} 也显著降低,尤其表层土壤, Na^+ 和 SO_4^{2-} 分别降低了 80% 和 39%,亚表层和底层土壤出现 SO_4^{2-} 富集。施用脱硫石膏,表层土壤 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 分别降低了 100% 和 85%,但对其他离子含量没有显著的影响。显然,灌溉可有

效地洗脱表层土壤中几乎所有的盐分离子;某些离子淀积在底层土壤中,施用脱硫石膏对盐分离子淋洗没有产生显著的影响。

表3 施用脱硫石膏和种植羊草前后各土层土壤 pH 值和 EC 值

Table 3 Values of pH and EC in the soils of different layers before and after adding with desulfurization gypsum and then growing *Aneurotepidimu chinense*

脱硫石膏 Desulfurization gypsum	土层/cm Soil layers	采样时期 Sampling time	pH	EC /($\text{ms} \cdot \text{cm}^{-1}$)
不施用 Not use	0~20	播种前 Preplanting	8.13	0.50
	20~35		8.05	0.65
	35~70		8.10	0.43
	0~20	收获期 Harvest time	8.30	1.15
	20~35		8.64	0.31
	35~70		8.48	0.14
施用 Use	0~20	播种前 Preplanting	7.60	0.83
	20~35		8.17	0.55
	35~70		7.96	0.48
	0~20	收获期 Harvest time	8.37	0.46
	20~35		8.50	0.48
	35~70		8.67	0.40
LSD _{0.05}	0~20		0.65	0.03
	20~35		0.67	0.02
	35~70		0.61	0.01

种植羊草后,几乎所有土层土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量显著降低,尤其是 Na^+ 甚至降低至 $3.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, K^+ 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 HCO_3^- 含量则有所增加。同时施用脱硫石膏,表层土壤 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量进一步降低,比不施用脱硫石膏处理分别降低了 66%、54% 和 53%,甚至亚表层和底层土壤的 Mg^{2+} 也分别降低了 90% 和 49%,但 Na^+ 含量分别提高了 89% 和 26 倍。这说明种植羊草可增强盐分淋洗,有效地降低土壤盐分离子浓度,同时施用脱硫石膏的效果更为明显。

2.4 施用脱硫石膏对羊草生物量及 NPK 含量的影响

施用脱硫石膏,羊草地上部分生物量提高 30%,全磷含量却降低了 22%,全氮、全钾含量没有显著的影响(表 5)。

3 讨论与结论

3.1 脱硫石膏对盐渍化土壤灌溉洗盐和肥力以及羊草生长的影响

内蒙古河套地区土壤春季返盐十分严重,播种前必须进行灌溉洗盐,使表层土壤盐分含量降低至作物耐受范围^[13]。本研究结果显示,灌溉洗盐确实大幅度地降低了土壤盐分含量,尤其是表层土壤钠

盐含量降低了 220%。施用脱硫石膏加剧土壤 pH 值降低,但也增强土壤有机质、溶解态 PK 的淋失,王葆芳等^[13]也报道引黄灌溉洗脱盐分的同时,也淋洗出土壤有效养分。究其原因,主要可能包括两个方面,一是由于土壤处于淹水状态,沉淀与溶解平衡向溶解方向进行,吸附与交换平衡向交换方向进行,进入液相的盐分随水淋移;二是由于脱硫石膏所补充的离子,将胶体上吸附的离子交换下来,随水淋失。因此,在生产实践中应增强淋洗盐分后土壤的培肥与肥料施用,尤其是施用有机肥料,以补充淋失的养分。

脱硫石膏其主要成分为 CaSO_4 和 CaSO_3 的混合物,性质与天然石膏相类似,含有丰富的 S、Ca、Si 等植物必需或有益的矿质营养^[14-16]。研究报道,脱硫石膏可显著地降低盐渍化土壤 pH 值和 Na^+ 饱和度,提高出苗率和植株成活率,同时也提高作物产量^[5,17-19]。这与本研究所获得的结果相似,施用脱硫石膏导致土壤总盐分含量略有提高,但并未达到危害植物生长的程度,羊草生长不仅未受影响,其生物量反而显著提高;本研究也发现,施用脱硫石膏导致植株体内磷含量显著降低,但对氮钾含量没有显著的影响,这可能与脱硫石膏对土壤养分转化及其有效性有关,具体原因还有待进一步研究。

表 4 施用脱硫石膏和种植羊草前后各层土壤盐分离子含量/(mg·kg⁻¹)Table 4 Concentrations of salt ions in the soils of different layers before and after adding with desulfurization gypsum and growth of *Aneurolepidimu chinense*

脱硫石膏 Desulfurization gypsum	土层 Soil layers /cm	采样时期 Sampling time	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
不施用 Not use	0~20	播种前 Preplanting	670.00	0.00	200.00	73.20	6.75	32.79	2500.00	2.99
	20~35		950.00	0.00	150.00	67.10	4.50	9.15	3250.00	4.43
	35~70		610.00	0.00	110.00	79.30	3.75	26.69	2200.00	2.55
	0~20	收获期 Harvest time	307.17	1.66	126.67	77.94	0.00	62.69	566.93	30.03
	20~35		66.67	7.39	195.56	100.31	0.00	135.22	341.33	24.62
	35~70		3.38	1.55	71.11	62.36	0.00	68.63	132.27	12.80
施用 Use	0~20	播种前 Preplanting	750.00	0.00	180.00	100.00	0.00	5.08	2800.00	2.99
	20~35		810.00	0.00	150.00	91.50	2.50	41.18	2600.00	0.00
	35~70		690.00	0.00	120.00	97.60	0.00	26.43	2700.00	4.65
	0~20	收获期 Harvest time	104.64	1.66	120.00	35.92	0.00	40.67	265.07	29.54
	20~35		125.74	1.55	94.44	10.17	0.00	104.72	254.93	28.31
	35~70		91.98	1.77	104.44	31.86	0.00	103.02	208.53	32.74
LSD _{0.05}	0~20		11.56	0.05	13.65	5.32	0.12	1.96	36.85	1.35
	20~35		7.52	0.21	10.23	3.56	0.06	2.32	45.35	3.15
	35~70		12.65	0.05	9.85	8.32	0.16	8.67	21.65	5.32

表 5 施用脱硫石膏对羊草地上部分干生物量及全氮磷钾含量的影响

Table 5 Dry matter and NPK contents in the above ground tissues of *Aneurolepidimu chinense* with addition of desulfurization gypsum

脱硫石膏 Desulfurization gypsum	生物量 Dry matter /(kg·hm ⁻²)	全 N Total N /(g·kg ⁻¹)	全 P Total P /(g·kg ⁻¹)	全 K Total K /(g·kg ⁻¹)
不施用 Not use	294.90a	26.68a	2.58a	9.98a
施用 Use	758.40b	27.72a	2.00b	10.42a

注:同一列不同字母表示施用与不施用脱硫石膏之间的显著性差异($P < 0.05$)。

Note: The different letters in the same column indicate the significant differences between two treatments with or without desulfurization gypsum ($P < 0.05$).

3.2 种植羊草对盐渍化土壤的改良培肥作用

羊草为禾本科优良牧草,抗寒、抗旱、耐盐碱、耐瘠薄、适应性广,是欧亚大陆草甸草原及干旱草原重要的建群植被之一。据报道,羊草植株通过调整代谢过程,提高抗氧化酶活性,改变可溶性蛋白质的组成,增强渗透调节能力,提高对 Na⁺ 的缓冲作用,抵抗盐分胁迫^[20]。因此,羊草不仅可用于改良盐渍化土壤,加速土壤脱盐,提高土壤肥力,而且可提供优良牧草^[21]。本研究结果表明,羊草能够在盐渍化土壤上生长,对脱硫石膏有很好的正响应,干物质质量显著增加。种植羊草 1 年后,土壤有机质和碱解氮含量显著提高,促进土壤脱盐,Na⁺、Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 含

量显著降低,同时施用脱硫石膏的效果更好一些。需要注意的是,由于羊草植株的吸收作用,导致土壤速效 P、K 含量降低,应增加 PK 肥的施用。

3.3 结论

灌溉可有效地洗脱土壤盐分,降低土壤 pH 值。施用脱硫石膏能够加剧降低土壤 pH 值,但同时也导致养分流失。羊草对脱硫石膏有良好的反应,生物量显著提高;种植羊草不仅加速土壤脱盐,而且具有一定的培肥盐渍化土壤的作用。

参考文献:

- [1] 水利部计划司,农水司.全国灌溉面积发展“九五”计划及 2010 年规划[R].北京:中国水利水电科学研究院,1997:1-3.
- [2] 褚冰倩,乔文峰.土壤盐碱化成因及改良措施[J].现代农业科技,2011,14:309.
- [3] 蓝佩玲,廖新荣,李淑仪,等.燃煤烟气脱硫副产物在酸性土上的农用价值和利用原理[J].生态环境,2007,16(4):1135-1138.
- [4] 陈欢,王淑娟,陈昌和,等.烟气脱硫废弃物在碱性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.
- [5] 李彦,衣怀峰,赵博,等.燃煤烟气脱硫石膏在新疆盐碱土壤改良中的应用研究[J].生态环境学报,2010,19(7):1682-1685.
- [6] 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.
- [7] 肖克飏,吴普特,雷金银,等.不同类型耐盐植物对盐碱土生物改良研究[J].农业环境科学学报,2013,31(12):2433-2440.

- [9] 李倩,刘景辉,张磊,等.适当保水剂施用和覆盖促进旱作马铃薯生长发育和产量提高[J].农业工程学报,2013,29(7):83-90.
- [10] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [11] 曹翠玲,杨力,胡景江.多效唑提高玉米幼苗抗旱性的生理机制研究[J].干旱地区农业研究,2009,27(2):154-158.
- [12] Jia WS, Zhang JH. Stomatal movements and long distance signaling in plants[J]. Plant Signaling and Behavior, 2008,3(10):772-777.
- [13] 李文尧,张岁岐,丁圣彦,等.干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J].生态学报,2010,30(19):5140-5150.
- [14] Li W, Cao K F. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of *Terminthia paniculata* grown under different light level[J]. Acta Bot Boreal - Occident Sin, 2006,26(2):0266-0275.
- [15] Lal A, Edwards G E. Analysis of inhibition of photosynthesis under water stress in the C4 species *Amaranthus cruentus* and *Zeamays*: electron transport, CO₂ fixation and carboxylation capacity[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1996,23(4):403-412.
- [16] 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等.紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应[J].生态学报,2007,27(12):5229-5237.
- [17] Fong K L, Mekav P B, Poyer J L. Evidence that peroxidation of lysosomal membranes is initiated by hydroxyl free radicals produced during flavin enzyme activity[J]. J Biol Chem, 1973,248:7792-7797.
- [18] 王根轩,杨成德,梁厚果.蚕豆叶片发育与衰老过程中超氧化物歧化酶活性与丙二醛含量变化[J].植物生理学报,1989,15(1):13-17.
- [19] 赵丽英,邓西平,山仑.持续干旱及复水对玉米幼苗生理生化指标的影响研究[J].中国农业生态学报,2004,(3):59-61.
- [20] Alia P, Saradhi P, Mohanty P. Involvement of proline in protecting thylakoid membranes against free radical - induced photodamage[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology, 1997,38(2):253-257.
- [21] 王保莉,杨春.环境因素对小麦苗期 SOD、MDA 及可溶性蛋白的影响[J].西北农业大学学报,2000,28(6):72-77.
- [22] 施俊凤,孙常青.植物水分胁迫诱导蛋白研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(12):5355-5357,5385.
- [23] 李明,王根轩.干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J].生态学报,2002,(4),22:503-507.
- [24] 康建宏,吴宏亮,黄灵丹,等.干旱预处理的玉米幼苗对逆境的交叉适应研究[J].干旱地区农业研究,2006,26(6):143-148.
- [25] 吴增芳.土壤结构改良剂[M].北京:科学出版社,1976:24-34.
- [26] 陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].生态环境,2008,17(3):1282-1289.
- [27] 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.
- [28] 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.

(上接第 116 页)

- [8] 卞建民,刘彩虹,杨占梅,等.种植黄花草木樨对盐碱地土壤水、盐状况的影响[J].吉林农业大学学报,2012,34(2):176-179,183.
- [9] 郑普山,郝保平,冯悦晨,等.紫花苜蓿对盐碱地的改良效果[J].山西农业科学,2012,40(11):1204-1206.
- [10] 吴姝菊,刘凤歧,张月学,等.盐碱化土壤上不同因素对饲用燕麦鲜草产量的影响[J].中国农学通报,2011,27(21):199-202.
- [11] 岳燕,郭维娜,林启美,等.加入不同量生物质炭盐渍化土壤盐分淋洗的差异与特征[J].土壤学报,2014,51(4):914-919.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第三版.北京:中国农业出版社,2000:14-199.
- [13] 王葆芳,杨晓晖,江泽平.引黄灌区水资源利用与土壤盐渍化防治[J].干旱区研究,2004,21(2):139-143.
- [14] Clark R B, R itchey K D, Baligar V C. Benefits and constraints for use of FGD products on agricultural land[J]. Fuel, 2001,80:821-828.
- [15] 徐胜光,李淑仪,廖新荣,等.花生施用燃煤烟气脱硫副产物研究初报[J].土壤与环境,2001,10(1):23-26.
- [16] 李淑仪,蓝佩玲,徐胜光,等.燃煤烟气脱硫副产物在酸性土壤的农业资源化利用[J].生态科学,2003,22(3):222-226.
- [17] 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.
- [18] Chun S, Nishiyama M, Matsumoto S. Sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulfurization: corn production and soil quality[J]. Environmental Pollution, 2001,114:453-459.
- [19] 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]. Soil & Sediment Contamination, 2004,13(1):65-80.
- [20] 石连旋.松嫩不同盐碱化羊草草甸草原羊草光合及逆境生理生态特性研究[D].长春:东北师范大学,2007:1-97.
- [21] 颜宏,赵伟,尹尚军,等.羊草对不同盐碱胁迫的生理响应[J].草业学报,2006,15(6):49-55.