

王 彬,沈靖丽,田 蕾.施用脱硫石膏对苜蓿营养器官离子分布及抗逆性的影响[J].江苏农业科学,2017,45(23):177-180.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.23.050

施用脱硫石膏对苜蓿营养器官离子分布及抗逆性的影响

王 彬¹,沈靖丽²,田 蕾¹

(1.宁夏大学农学院,宁夏银川 750021;2.宁夏农林科学院农业资源与环境研究所,宁夏银川 750002)

摘要:针对碱化土壤施用脱硫石膏对苜蓿耐盐生理特征的影响,从植物体内离子分布规律入手,采用大田和盆栽相结合的方法,开展苜蓿根系和叶片钠(Na)、钾(K)、钙(Ca)离子分布规律与其耐盐性的关系研究。结果表明,施用脱硫石膏后,显著减少了苜蓿对 Na⁺ 的吸收,减轻或消除了离子毒害;促进了苜蓿对 Ca²⁺、K⁺ 等营养元素的吸收,改善了养分亏缺的状况;苜蓿的抗逆能力得到提高,出苗率、产量均大幅上升,显著促进了苜蓿的生长发育,施脱硫石膏用量为 15.0 t/hm² 时,效果最佳。

关键词:脱硫石膏;苜蓿;离子分布;抗逆性;盐碱地改良

中图分类号:S541⁺.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2017)23-0177-04

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)是世界上最早栽培的,种植最广的饲草,经“丝绸之路”传入我国后,已有 2 000 多年的栽培史^[1]。由于宁夏得天独厚的自然条件,使之成为我国苜蓿主产区之一,截至 2014 年,宁夏苜蓿种植面积达 39 万 hm²^[2]。但受制于干旱少雨、蒸发强烈的气候条件,宁夏引扬黄灌区的苜蓿种植基地均存在不同程度的土壤盐渍化问题,尤其是土壤碱化问题,已严重制约了宁夏草产业的发展。

许多国内外学者研究表明,利用脱硫石膏改良碱化土壤是个行之有效的办法^[3]。目前,在这方面已取得了大量研究成果,这些成果已得到大面积应用。但这些研究鲜有从离子吸收方面来解释脱硫石膏施用对植物生长发育的影响。碱化土壤中含有大量钠离子(Na⁺),Na⁺在植物体内大量积累会造成渗透胁迫和代谢障碍^[4]。大量研究表明,钙离子(Ca²⁺)可以减少 Na⁺在植物根和茎叶中的积累,促进植物对钾离子(K⁺)的积累,提高植物的耐盐性^[5]。脱硫石膏中含有大量

Ca²⁺,在土壤中施用脱硫石膏后,应该会影响植物对离子的吸收,进而影响其抗逆性。

因此,本研究从植物对离子的吸收入手,探明脱硫石膏施用后,苜蓿体内不同离子的积累变化情况,再结合相关抗逆指标,揭示脱硫石膏施用与植物抗逆性之间的关系。本研究结果将丰富脱硫石膏改良盐碱地的理论体系,也为盐碱地发展草产业提供理论支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

大田试验地点选在宁夏平罗县西大滩前进农场 7 队。前进农场东临黄河,西倚贺兰山,地势西高东低,海拔 1 091 ~ 1 102 m,干旱少雨,年降水量 172.5 mm,年平均蒸发量达 1 755 mm,属中温带半干旱荒漠气候。盆栽试验在宁夏大学农学院温室内进行。

1.2 试验材料

选择紫花苜蓿(宁苜 1 号)为试验材料。

1.3 试验设计

本试验采用大田和盆栽相结合的方法。

大田试验采用单因素拉丁方设计,小区面积 54 m² (9 m×6 m)。设 5 个处理:CK,不施脱硫石膏;T₁,施脱硫石

收稿日期:2016-08-07

基金项目:宁夏自然科学基金(编号:NZ12147)。

作者简介:王 彬(1977—),男,陕西汉中,人,博士,副教授,主要从事植物生理生态方面的教学和研究工作。E-mail:wb_y2004@nxu.edu.cn。

控制 3 000 尾/hm² 为宜,大小规格为 8~10 cm。

参考文献:

- [1]孙军德,魏雅冬,佟德利,等.溶藻细菌对青苔的防除效果研究[J].沈阳农业大学学报,2009,40(4):439-443.
- [2]钱 华,张和林,卜兴泉,等.蟹池套养细鳞斜颌鲷青苔少效益高[J].水产科技情报,2009,36(4):168-170.
- [3]孙德祥.河蟹套养细鳞斜颌鲷生态养殖关键技术研究[J].中国水产,2016(12):90-92.
- [4]毕靖红,许冬梅,房元喧,等.河蟹、鳊鱼和细鳞斜颌鲷混养生态

防控青苔效益高[J].科学养鱼,2011(8):81.

- [5]侯冠军,宋光同,陈 静,等.池塘套养细鳞斜颌鲷对虾蟹生长的影响[J].水产科技情报,2012,39(6):314-317.
- [6]毛国庆,唐玉华.蟹池中青苔滋生的原因、危害及防控[J].科学养鱼,2016(12):61-62.
- [7]彭小云.河蟹养殖池塘青苔的危害及处理方法[J].渔业致富指南,2015(3):68-69.
- [8]李定国,王煜恒,王会聪,等.水草密度对河蟹池塘水质和养殖效益的影响[J].水产养殖,2015,36(12):11-15.
- [9]陆新华,宗照明,周 萍,等.高沙土地区河蟹、青虾、细鳞斜颌鲷池塘高产高效生态混养技术[J].科学养鱼,2012(1):29-30.

膏 7.5 t/hm²; T₂, 施脱硫石膏 15.0 t/hm²; T₃, 施脱硫石膏 22.5 t/hm²; T₄, 施脱硫石膏 30.0 t/hm²。2014 年秋季结合整地冬灌将脱硫石膏一次性均匀施于地表, 旋耕深翻 20 cm, 使其与土壤充分混匀。2015 年 5 月上旬人工条播播种, 行距 30 cm, 播种量 30.0 kg/hm²。播种前施用有机肥(羊粪) 30 t/hm²、尿素 225 kg/hm²、普钙 600 kg/hm²、硫酸锌 45 kg/hm²。2015—2016 年进行田间观测。

盆栽试验采用单因素随机区组设计, 试验处理同大田试验, 每个处理重复 8 次, 共计 40 盆。栽盆规格为下径(19 cm) × 上径(25 cm) × 盆高(33 cm)。盆栽试验土壤取自大田试验地 0~30 cm 的耕作层, 脱硫石膏、有机肥和化肥施用量均按 1 125 t/hm² 的耕层土壤密度进行折算后与土壤混匀装入盆中。2016 年 5 月上旬人工撒播, 分别于苜蓿幼苗期、现蕾期、成熟期取样测定。

1.4 测定指标与方法

Na⁺、Ca²⁺、K⁺ 含量采用 FP8801 火焰光度计测定, 细胞膜透性采用电导率仪法测定, 脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定, 出苗率与产量采用小区统计法测定。

表 1 脱硫石膏施用后碱化土壤盆栽苜蓿根系和叶片中 Na⁺ 含量的变化(2016 年)

处理	苗期 Na ⁺ 含量(%)		现蕾期 Na ⁺ 含量(%)		成熟期 Na ⁺ 含量(%)	
	根系	叶片	根系	叶片	根系	叶片
CK	1.89 ± 0.02a	0.82 ± 0.02a	2.01 ± 0.02a	1.05 ± 0.06a	2.65 ± 0.12a	1.25 ± 0.06a
T ₁	1.65 ± 0.10b	0.52 ± 0.05b	1.75 ± 0.11b	0.84 ± 0.11b	1.93 ± 0.11b	1.01 ± 0.04b
T ₂	1.55 ± 0.10c	0.55 ± 0.03b	1.76 ± 0.05b	0.70 ± 0.03c	1.89 ± 0.03c	0.92 ± 0.12c
T ₃	1.64 ± 0.03b	0.42 ± 0.10c	1.85 ± 0.04b	0.75 ± 0.02c	1.99 ± 0.07b	1.05 ± 0.04b
T ₄	1.56 ± 0.01c	0.57 ± 0.05b	1.70 ± 0.04c	0.71 ± 0.03c	2.00 ± 0.12b	0.95 ± 0.05c

注:表中数据为 3 次重复的“平均值 ± 标准误差”;同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著($P < 0.05$)。表 2~表 4 同。

2.2 不同脱硫石膏施用量对苜蓿根系和叶片 Ca²⁺ 吸收量的影响

从表 2 可知,施用脱硫石膏后,碱化土壤盆栽种植苜蓿的根系和叶片中 Ca²⁺ 含量在不同生育期均显著高于与对照($P < 0.05$)。表明施用脱硫石膏后,显著增加了苜蓿对 Ca²⁺ 的吸收量。从表 2 中还可看出,随着脱硫石膏施用量的增加,苜蓿对 Ca²⁺ 的吸收有增加的趋势,但 T₂、T₃ 和 T₄ 处理间差异不显著。这表明对于 Ca²⁺ 的吸收而言,脱硫石膏的施用量并

1.5 数据分析
用 Excel 2010、DPS 10.0 软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 不同脱硫石膏施用量对苜蓿根系和叶片 Na⁺ 吸收量的影响

从表 1 可知,施用脱硫石膏后,碱化土壤盆栽种植苜蓿的根系和叶片中 Na⁺ 含量在不同生育期均显著低于与对照($P < 0.05$)。表明施用脱硫石膏后,显著减少了苜蓿对 Na⁺ 的吸收,从而避免了离子毒害。总体看来,各处理中以 T₂ 处理的改良效果最为显著。T₂ 处理苜蓿的根系 Na⁺ 含量在 3 个生育期内均值为 1.73%,比对照降低了 20.61%;T₂ 处理叶片 Na⁺ 含量均值为 0.72%,比对照降低了 30.45%。由此看来,苜蓿叶片比根系更明显地减少对 Na⁺ 的吸收。从表 1 中还可看出,随着生育期的延长,各处理苜蓿根系和叶片中 Na⁺ 含量均呈上升趋势,且在整个生育期内,叶片中的 Na⁺ 含量均低于根系中的。

不是越多越好,故以 T₂ 处理的施用量为最佳。T₂ 处理的苜蓿根系 Ca²⁺ 含量在整个生育期内均值为 0.59%,比对照增加了 76.24%;T₂ 处理叶片 Ca²⁺ 含量均值为 2.81%,比对照增加了 65.95%。由此看来,苜蓿根系比叶片对 Ca²⁺ 吸收的增量更为明显。从表 2 中还可看出,各处理苜蓿根系中 Ca²⁺ 含量在整个生育期中变化较为稳定,而叶片中 Ca²⁺ 含量在现蕾期最高,在苗期最低;此外,在不同生育期内,叶片中 Ca²⁺ 含量远高于根系中的。

表 2 脱硫石膏施用后碱化土壤盆栽苜蓿根系和叶片中 Ca²⁺ 含量变化(2016 年)

处理	苗期 Ca ²⁺ 含量(%)		现蕾期 Ca ²⁺ 含量(%)		成熟期 Ca ²⁺ 含量(%)	
	根系	叶片	根系	叶片	根系	叶片
CK	0.32 ± 0.02c	1.52 ± 0.10c	0.35 ± 0.04c	1.96 ± 0.12c	0.34 ± 0.09c	1.60 ± 0.12c
T ₁	0.52 ± 0.01b	2.01 ± 0.11b	0.55 ± 0.02b	3.21 ± 0.13b	0.50 ± 0.04b	2.64 ± 0.13b
T ₂	0.55 ± 0.04ab	2.15 ± 0.05ab	0.63 ± 0.05a	3.55 ± 0.14a	0.60 ± 0.03a	2.73 ± 0.14ab
T ₃	0.61 ± 0.02a	2.21 ± 0.14a	0.60 ± 0.03ab	3.46 ± 0.07ab	0.58 ± 0.02a	2.79 ± 0.07a
T ₄	0.58 ± 0.05a	2.22 ± 0.03a	0.65 ± 0.02a	3.52 ± 0.09a	0.57 ± 0.03a	2.81 ± 0.09a

2.3 不同脱硫石膏施用量对苜蓿根系和叶片 K⁺ 吸收量的影响

从表 3 可知,施用脱硫石膏后,碱化土壤盆栽种植苜蓿根系和叶片中 K⁺ 含量在整个生育期内整体上显著高于对照($P < 0.05$),表明施用脱硫石膏后,促进了苜蓿对 K⁺ 的吸收。总体看来,各处理中以 T₂ 处理的施用效果为最佳。T₂ 处理苜蓿根系中 K⁺ 含量在整个生育期的均值为 3.68%,比对照

增加了 37.61%;T₂ 处理叶片中 K⁺ 含量均值为 5.90%,比对照增加了 37.45%。由此看来,苜蓿根系与叶片对 K⁺ 吸收的增量是基本相等的,这与对 Na⁺、Ca²⁺ 的吸收不同。由表 3 还可看出,各处理苜蓿根系中 K⁺ 含量在整个生育期内呈下降趋势;而叶片中 K⁺ 含量在整个生育期内变化不大,只是在现蕾期略高;此外,在整个生育期内,叶片中 K⁺ 含量高于根系中的,这与 Ca²⁺ 含量的分布情况相似。

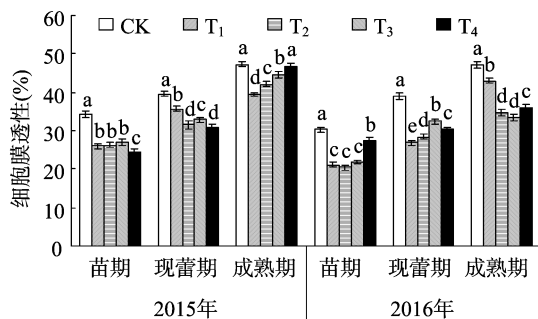
表 3 脱硫石膏施用后碱化土壤盆栽苜蓿根和叶片中 K^+ 含量变化 (2016 年)

处理	苗期 K^+ 含量 (%)		现蕾期 K^+ 含量 (%)		成熟期 K^+ 含量 (%)	
	根系	叶片	根系	叶片	根系	叶片
CK	3.02 ± 0.08c	4.11 ± 0.15e	2.95 ± 0.05c	4.56 ± 0.05c	2.06 ± 0.04d	4.20 ± 0.05c
T ₁	3.88 ± 0.12b	5.10 ± 0.17d	3.56 ± 0.05bc	6.01 ± 0.08ab	3.12 ± 0.03c	5.23 ± 0.08b
T ₂	3.99 ± 0.10a	5.69 ± 0.16c	3.62 ± 0.11b	6.12 ± 0.13a	3.44 ± 0.11a	5.88 ± 0.13a
T ₃	4.02 ± 0.14a	5.91 ± 0.20a	3.71 ± 0.04a	5.92 ± 0.12b	3.26 ± 0.12b	5.75 ± 0.12ab
T ₄	4.05 ± 0.12a	5.82 ± 0.12b	3.54 ± 0.06bc	6.00 ± 0.09ab	3.45 ± 0.08a	5.80 ± 0.09a

2.4 不同脱硫石膏施用量对苜蓿叶片细胞膜透性的影响

从图 1 可看出,施用脱硫石膏后,碱化土壤盆栽种植苜蓿各处理的叶片细胞膜透性整体上显著低于对照 ($P < 0.05$),这表明在碱化土壤中施入脱硫石膏后,土壤盐碱状况得以改良,苜蓿遭受的胁迫减轻,因此细胞膜透性降低。总体看来,各处理中以 T₂ 处理的改良效果较好。在改良第 1 年 (2015 年) 的苗期, T₂ 处理的叶片细胞膜透性为 26.21%, 比对照降低了 23.60%; 现蕾期 T₂ 处理的叶片细胞膜透性为 31.56%, 比对照降低了 20.34%; 成熟期 T₂ 处理的叶片细胞膜透性为 42.19%, 比对照降低了 10.89%。从图 1 中还可看出,在一个生长季内,苜蓿叶片细胞膜透性呈上升趋势,即苗期 < 现蕾期 < 成熟期。

由图 1 还可看出,施用脱硫石膏后,苜蓿叶片细胞膜透性呈逐年下降趋势。2016 年苗期各处理 (CK 除外) 细胞膜透性均值为 22.71%, 比 2015 年同期降低 12.39%; 2016 年现蕾期各处理 (CK 除外) 均值为 29.54%, 比 2015 年同期降低 9.66%; 2016 年成熟期各处理 (CK 除外) 均值为 36.85, 比 2015 年同期降低 14.64%。结果表明,施用脱硫石膏后对碱化土壤的改良是逐年变好的。



图中数据为3次重复的平均值±标准误差, $n=3$; 同时期中不同小写字母表示在0.05水平上差异显著 ($P < 0.05$)

图1 脱硫石膏施用后碱化土壤盆栽种植苜蓿在不同年份不同生育期叶片细胞膜透性的变化

2.5 不同脱硫石膏施用量对苜蓿叶片脯氨酸含量的影响

从表 4 可以看出,施用脱硫石膏后,各处理苜蓿叶片中脯

氨酸含量均显著低于对照 ($P < 0.05$), 表明施入脱硫石膏后,碱化土壤得以改良,苜蓿遭受的盐碱胁迫减轻,故脯氨酸含量降低。各处理中以 T₂ 处理的改良效果较好。2015 年, T₂ 处理的脯氨酸含量在苗期比对照降低了 43.18%, 现蕾期的相应含量比对照降低了 17.12%, 成熟期的相应含量比对照降低了 38.53%; 2016 年, T₂ 处理的脯氨酸含量在苗期比对照降低了 41.19%, 现蕾期的相应含量比对照降低了 34.81%, 成熟期的相应含量比对照降低了 29.10%。

由表 4 还可看出,施用脱硫石膏后,苜蓿叶片中脯氨酸含量呈逐年下降趋势。2016 年苗期各处理脯氨酸含量均值 (CK 除外) 为 325.87 $\mu\text{g/g}$, 比 2015 年同期降低 16.27%; 2016 年现蕾期各处理脯氨酸含量均值 (CK 除外) 为 436.72 $\mu\text{g/g}$, 比 2015 年同期降低 36.91%; 2016 年成熟期各处理 (CK 除外) 脯氨酸含量均值为 308.89 $\mu\text{g/g}$, 比 2015 年同期降低 12.07%。表明脱硫石膏施用后对碱化土壤的改良是逐年变好的。

2.6 不同脱硫石膏施用量对苜蓿出苗率和产量的影响

从表 5 中可看出,施用脱硫石膏后,碱化土壤大田种植苜蓿的出苗率和鲜草产量均显著高于对照 ($P < 0.05$)。表明施入脱硫石膏后,碱化土壤得以改良,苜蓿生长发育趋势好。各处理中以 T₂ 处理的改良效果较好,2015 年, T₂ 处理的出苗率达到 77.21%, 比对照提高了 39.82%; 2016 年, T₂ 处理的鲜草产量达到 18 233.40 kg/hm^2 , 比对照提高了 69.52%。

3 讨论与结论

目前,有关施用脱硫石膏改良碱化土壤并促进植物生长发育的研究报道很多。白海波等报道,脱硫石膏施用后,不同作物的出苗率、株高和产量均显著提高,植物的细胞膜透性、渗透调节物质含量以及抗氧化保护酶活性均显著降低^[6-9]。这些研究均表明,脱硫石膏施用能促进植物的生长发育,但研究者并未指出脱硫石膏施用与作物抗逆性之间的关系。岳自慧等报道,脱硫石膏施用后,不同作物的抗逆性均有显著提高^[10-12]。这些研究多从植物抗逆指标入手,分析了植物抗逆性的提高,并未从离子吸收角度来阐述脱硫石膏施用与作物

表 4 脱硫石膏施用后碱化土壤盆栽种植苜蓿在不同年份不同生育期叶片脯氨酸含量变化

处理	2015 年叶片脯氨酸含量 ($\mu\text{g/g}$)			2016 年叶片脯氨酸含量 ($\mu\text{g/g}$)		
	苗期	现蕾期	成熟期	苗期	现蕾期	成熟期
CK	615.28 ± 22.11a	758.41 ± 26.55a	489.11 ± 12.65a	502.61 ± 30.11a	612.34 ± 15.26a	398.17 ± 12.62a
T ₁	457.81 ± 18.59b	681.24 ± 30.25c	341.62 ± 25.64c	286.49 ± 20.61c	515.67 ± 12.57b	305.42 ± 9.56c
T ₂	349.61 ± 15.67d	628.57 ± 15.64d	300.67 ± 16.47d	295.61 ± 10.29c	399.17 ± 24.61d	282.31 ± 8.21d
T ₃	336.77 ± 20.19d	716.19 ± 19.41b	406.97 ± 19.22b	362.91 ± 14.27b	446.44 ± 18.94c	315.64 ± 12.89b
T ₄	412.52 ± 28.49c	742.67 ± 28.99a	355.88 ± 13.45c	358.46 ± 10.64b	385.61 ± 17.62d	332.19 ± 17.56b

表 5 脱硫石膏施用后碱化土壤大田种植苜蓿出苗率
和产量变化(2015—2016 年)

处理	2015 年出苗率 (%)	2016 年鲜草产量 (kg/hm ²)
CK	55.22 ± 3.25d	10 755.75 ± 491.4c
T ₁	69.56 ± 2.56b	15 273.30 ± 646.95b
T ₂	77.21 ± 3.47a	18 233.40 ± 547.05a
T ₃	73.69 ± 4.01ab	17 602.05 ± 631.5ab
T ₄	62.41 ± 2.94c	14 960.40 ± 799.20b

注:表中数据为 5 次重复的“平均值 ± 标准误差”;同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著($P < 0.05$)。

抗逆性之间的关系。

从本研究结果可以看出,脱硫石膏施用后,苜蓿根系和叶片中 Na⁺ 含量显著降低,而 Ca²⁺、K⁺ 含量显著上升。表明脱硫石膏施用后不但显著改善了作物的营养状况,还有助于提高作物的抗逆性。有关 Ca²⁺、K⁺ 能促进植物生长发育、提高其抗逆性的研究报道很多^[13-14],但有关脱硫石膏施用后土壤与根系的互作关系等研究鲜有报道,仍需进一步研究。

在盐渍环境中,植物主要受到 Na⁺、Cl⁻ 的毒害,其危害程度主要取决于盐分离子在植物体内的浓度、分布及植物对盐分的耐性^[15-16]。因此,通过研究植物体内不同离子分布,可以了解植物的抗逆性与离子分布之间的关系,进而从某一方面揭示植物的耐盐机制。贾亚雄等研究发现,盐草(*Distichlis spicata*)可以通过根组织有效控制 Na⁺、Cl⁻ 进入运输途径中,将大量有害离子排除在根组织之外^[17]。张利文等研究发现,随着盐胁迫强度的增加,K⁺、Mg²⁺ 在四翅滨藜(*Atriplex canescens*)根、茎、叶中的含量减少,而 Na⁺、Cl⁻ 的含量在增加^[18]。朱义等研究发现,经适当浓度的 CaCl₂ 处理后,高羊茅(*Festuca arundinacea*)的细胞膜透性有所下降,细胞膜的稳定性和选择性加强,阻止了大量 Na⁺ 进入植物体内,同时提高了 K⁺、Ca²⁺ 含量,增强了植物的耐盐性^[19]。这与本研究结果十分相似,脱硫石膏施用后,苜蓿的细胞膜透性下降,其体内 Na⁺ 含量显著降低,而 Ca²⁺、K⁺ 含量显著上升。

从本研究结果还可看出,苜蓿根系中的 Na⁺ 含量高于叶片中的。一般说来抗逆性较强的植物在生育前中期有较强抗性,可以将土壤中过多的 Na⁺ 限制在根部,这样一方面限制了有害离子向上运输,避免植株地上部分细胞受到伤害;另一方面降低根部渗透势,起到渗透调节的作用。这与杨洪兵等的研究结果^[20-21] 较为一致。有关脱硫废弃物施用后 Na⁺、Ca²⁺、K⁺ 等离子在植物生长发育过程中的互作机制仍有待进一步研究。

综上所述,施用脱硫石膏后,显著减少了苜蓿对 Na⁺ 的吸收,减轻或消除了离子毒害;同时,促进了苜蓿对 Ca²⁺、K⁺ 等营养元素的吸收,改善了养分亏缺的状况。此外,苜蓿的抗逆能力得到提高,出苗率、产量均大幅上升,显著促进了苜蓿的生长发育。其中,施脱石膏施用量为 15.0 t/hm² 时,效果最佳。

参考文献:

[1] 杨青川,苏加楷,耿华株,等. 紫花苜蓿耐盐育种及耐盐遗传基础

的研究进展[J]. 中国草地,2001,23(1):59-62.

[2] 宁夏农牧厅信息中心. 宁夏苜蓿种植机械化取得良好效果[EB/OL]. [2016-08-01]. www.nongji1688.com/news/201506/10/5402431.html.

[3] 许兴,孙兆军,肖国举,等. 脱硫废弃物改良盐碱地原理及施用技术研究[M]. 宁夏:黄河出版传媒集团阳光出版社,2013:5-8.

[4] Cheeseman J M. Mechanisms of salinity tolerance in plants[J]. Plant Physiology,1988,87(3):547-550.

[5] Cuin T A, Miller A J, Laurie S A, et al. Potassium activities in cell compartments of salt-grown barley leaves[J]. Journal of Experimental Botany,2003,54(383):657-661.

[6] 白海波,毛桂莲,李晓慧,等. 脱硫废弃物对盐碱地水稻幼苗抗氧化酶活性和膜脂过氧化作用的影响[J]. 西北农业学报,2009,18(3):122-126.

[7] 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.

[8] 赵小霞,何文寿,张峰举,等. 施肥对碱化土油用向日葵光合特性及产量的影响[J]. 浙江农业学报,2016,28(10):1755-1763.

[9] 王静,许兴,肖国举,等. 脱硫石膏改良宁夏典型龟裂碱土效果及其安全性评价[J]. 农业工程学报,2016,32(2):141-147.

[10] 岳自慧,许兴,毛桂莲. 燃煤脱硫废弃物中的钙对提高作物抗盐碱胁迫的可能机理及进展[J]. 农业科学研究,2009,30(2):48-52.

[11] Mao G L, Xu X, Chen Q J, et al. Flue gas desulfurization gypsum by-products alters cytosolic Ca²⁺ distribution and Ca²⁺-ATPase activity in leaf cells of oil sunflower in alkaline soil[J]. Journal of Plant Interactions,2014,9(1):152-158.

[12] 陈亚萍,江凯,张隆春,等. 脱硫石膏改良盐碱土对水稻质膜和叶绿素荧光特性的影响[J]. 河南农业科学,2016,45(4):71-75,79.

[13] 章文华,刘友良. 盐胁迫下钙对大麦和小麦离子吸收分配及 H⁺-ATP 酶活性的影响[J]. 植物学报,1993,35(6):435-440.

[14] 郑青松,王仁雷,刘友良. 钙对盐胁迫下棉苗离子吸收分配的影响[J]. 植物生理学报,2001,27(4):325-330.

[15] 崔雪梅,郭海如,方婧,等. 基于主成分分析的油菜盐害生理反应规律[J]. 江苏农业科学,2016,44(2):105-108.

[16] 孙凯文,时佩佩,陆叶峰,等. 添加碳调节剂对次盐渍化土壤水溶性盐含量及白菜根系生长的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(5):241-245.

[17] 贾亚雄,李向林,万里强,等. 盐胁迫下盐草和高羊茅营养器官的离子微区分布[J]. 中国农业科学,2009,42(5):1595-1600.

[18] 张利文,胡生荣,高永. 盐胁迫下三种滨藜植物体内盐分离子分布格局[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版),2014,45(3):289-294.

[19] 朱义,何池全,杜玮,等. 盐胁迫下外源钙对高羊茅种子萌发和幼苗离子分布的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(11):133-137.

[20] 杨洪兵,陈敏,王宝山,等. 小麦幼苗拒 Na⁺ 部位的拒 Na⁺ 机理[J]. 植物生理与分子生物学学报,2002,28(3):181-186.

[21] 朱新广,张其德. NaCl 对光合作用影响的研究进展[J]. 植物学通报,1999,16(4):332-338.