文章编号:1001-1498(2012)01-0107-04

脱硫石膏改良龟裂碱土对枸杞根际土壤理化性质及根系生长的影响

孙兆军[1,2], 赵秀海[1*], 王 静[2], 李 茜[2], 马 飞[2], 陈昌和[3], 李 彦[3]

(1.北京林业大学林学院,北京 100083; 2.宁夏大学新技术应用研究开发中心,宁夏 银川 750021;
3.清华大学热能工程系,北京 100083)

关键词:脱硫石膏;龟裂碱土;土壤盐分;枸杞;根系
中图分类号:S714 **文献标识码**:A

Effect of Amelioration of Takyr Solonetzs with FGDG on Rhizosphere Soil Properties and Root Growth of *Lycium barbarum*

SUN Zhao-jun[1,2], *ZHAO Xiu-hai*[1], *WANG Jing*[2], *LI Qian*[2], *MA Fei*[2], *CHEN Chang-he*[3], *LI Yan*[3]

(1. Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. R & D Center for New Technology Application, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;
3. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100083, China)

Abstract: In this study, the rhizosphere soil properties of Takyr Solonetzs ameliorated with FGDG, and its effect on root growth of *Lycium barbarum* were studied. The results indicated that with increasing applications of FGDG, the contents of Na^+, K^+, Mg^{2+}, Cl^-, and HCO_3^- in rhizosphere soil decreased gradually with the ratio of 51.9%, 16.7%, 42.7%, 44.7% and 28.2%, respectively, while the contents of Ca^{2+} and SO_4^{2-} showed an increasing trend and increased by 96.9% and 80.4% compared with those of the CK. As the content of exchangeable Na^+ decreased with the increasing application of FGDG, the exchangeable sodium percentage (ESP) and soil pH values decreased from 32.2% and 10.5 to 18.1% and 7.82, respectively and thus the soil physical properties improved. However, the lowest total salt content (2.91 $g \cdot kg^{-1}$) was found in T2 (2.5 t/(667m^2)), and similarly, the highest values of taproot length (44.78 cm), root surface area(179.97 cm^2) and root dry weight (17.53 g) were also found in T2, which suggested that applications of FGDG were not always positively correlated with soil reclamation, and excessive amount of FGDG would inhibit root's growth. Overall, application of FGDG is effective in ameliorating Takyr Solonetzs, but high amount of FGDG would result in excess salts against root growth and subsequently influence production.

Key words: FGDG; Takyr Solonetzs; soil salt; *Lycium barbarum*; root system

龟裂碱土主要分布在宁夏银川平原,是贺兰山碱化山体土壤在山洪冲击下淤积于银川平原而成。由于这种土壤干时地表皲裂似龟背状,故称“龟裂碱土”,也因土壤质地坚硬,表面呈白色,又称“白僵土”[1]。据调查,银川平原现有近 133 400 万 m^2,是我国龟裂碱土的主要分布区,其矿物组成以伊利和

收稿日期: 2011-07-20
基金项目: 国家林业行业专项(200804012);国家科技支撑项目(2007BAC08B02)
作者简介: 孙兆军(1963—),男,北京林业大学,博士生,研究员,主要从事生态学研究.
通讯作者:赵秀海. E-mail:blstx2008@126.com

高岭土为主,质地黏重,多为重壤土或黏土,土壤分散度高。土壤湿时吸水膨胀、泥泞、不易透水,干时收缩板结、坚硬、透水性很差;土壤肥力很低,有机质含量不足 10 g·kg^{-1},其它营养元素的含量也偏低。虽然其理化性状不良,但地势平坦,土层深厚,毗邻黄河,开发潜力巨大[2-4]。随着我国人口增加和城市化进程的推进,耕地资源日益紧缺的状况难以改变。对于广泛分布于银川平原的龟裂碱土,改良利用势在必行,尤其是种植耐盐碱且经济价值高的枸杞(*Lycium barbarum* L.)已成为当地政府的首选。

近几年,利用质地有别于石膏但廉价的燃煤电厂脱硫副产物——脱硫石膏,改良盐碱土效果明显[5]。脱硫石膏与天然石膏的主要成分都是 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$,其改良原理就是利用脱硫石膏溶解产生 Ca^{2+} 能代换土壤胶体上的 Na^+,从而降低土壤的碱化度、pH 值及土壤黏粒的分散性,增加透水性[6],而且脱硫石膏富含 S、Ca 等植物必需或有益的矿质营养[7-9]。利用脱硫石膏改良盐碱地,不仅避免其储存过程中的二次污染,实现工业废弃物资源化利用,而且降低盐碱地改良成本,对燃煤烟气脱硫石膏资源化利用和农业可持续发展具有重要意义。

目前,虽然国内外关于脱硫石膏改良盐碱土壤已有诸多研究,表明施用脱硫石膏能够显著降低碱土的 pH 值、碱化度和总碱度,增加作物产量[3,10-15],但关于脱硫石膏不同施用量改良碱土种植植物的根际微域土壤性质变化及对植物根系的效应研究却鲜见报道,而根际又是水分和矿质养分进入根系、参与生物循环最直接的区域[16],因此,本文主要从施用脱硫石膏改良龟裂碱土耕层的离子变化研究入手,探讨脱硫石膏不同施用量对改良龟裂碱土种植耐盐碱枸杞根际微域的盐分变化及对根胁迫改善的效应,为脱硫石膏改良龟裂碱土种植枸杞大面积推广示范提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设在宁夏银北西大滩核心试验站,位于黄河中上游宁夏贺兰山东麓洪积扇边缘的灌溉区(35°01′N,114°24′E),该地属干旱温带季风气候,年平均降水量 205 mm,年蒸发量 1 875 mm,年平均气温 13.9 ℃,≥10 ℃积温在 5 100 ℃以上,无霜期 220 d 左右。一般地下水埋深 1.5 m 左右,地下水主要含硫酸盐、氯化物,并且普遍含有苏打。土壤碱化度为 15%～60%,pH 值为 8.0～10.4,全盐为 2.5～6.5 g·kg^{-1},盐分类型主要有 NaCl、Na_2SO_4、Na_2CO_3,土质黏重,透水性差,为典型的龟裂碱土。

1.2 试验材料与试验方法

1.2.1 试验材料 硫石膏产于当地湿法脱硫的燃煤电厂,枸杞为宁夏枸杞研究所提供的 2 年生种苗(宁杞一号);水源以黄河水为主,有机肥均为牛粪。

1.2.2 试验方法 试验于 2007 年 4 月上旬开始。选择西大滩典型龟裂碱土 1 500 m^2,按正交试验设计 15 个实验小区,每个小区面积为 10 m×10 m,各小区打埂,埂高 50 cm。实验设置 5 个脱硫石膏施用量处理,分别为 CK(0.0 t/(667 m^2))、T1(1.8 t/(667 m^2))、T2(2.5 t/(667 m^2))、T3(3.0 t/(667 m^2))、T4(4.0 t/(667 m^2)),每处理重复 3 次,每小区施用等量有机肥 2 t/(667m^2);深耕翻并平整。

种植前结合整地将脱硫石膏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。于 2007 年 4 月 20 日按行距 2 m,株距 2 m 挖坑种植枸杞,坑深 30 cm,直径 50 cm,每坑 1 株,枸杞苗植入后培土填平,每个小区 25 株,种后立即大水灌溉;首次灌水量为 100.0 t/(667 m^2),并泡田 36 h 后,排出地表余水;待地表晾干后破板结并除草。实验过程中定期进行灌溉,防治病虫害。试验于 2009 年 9 月 10 日(第 3 年)取样测定各项指标,重点监测枸杞根际土壤 Ca^{2+}、Mg^{2+}、K^+、Na^+、Cl^-、HCO_3^-、CO_3^{2-}、SO_4^{2-} 等离子含量及土壤碱化度、pH 值、土壤密度和孔隙度的变化情况。

1.3 取样与测定

1.3.1 取样 每小区选定 8 棵枸杞苗作为测试对象。将选好的枸杞苗整株取出,轻轻抖落根系表面细粒土壤并混匀装入塑料袋内,作为根际土壤,用于测定根际盐分;同时,将枸杞根系剪切装入塑料袋,带回实验室,用于根系指标和根干质量测定。

1.3.2 根指标的测定 利用根系分析系统 WinRHIZO (Ver.4.1c;Regent Instruments,Quebec,Canada)测定根长和根表面积,然后将根样置于烘箱,105 ℃杀青 10 min 后,80 ℃烘干至恒质量,测定根系干质量。

1.3.3 根际土壤盐分测定 将取得的根际周围土样用 2 mm 筛网过筛,按土水 1∶5 与蒸馏水混合,充分振荡摇匀并过滤,用 DELTA320 型酸度计测定上层清夜 pH 值,用 DELTA326 型电导率仪测定电导率,并计算碱化度[17];Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量用原子吸收法

测定,Cl^- 含量采用 $AgNO_3$ 滴定法测定,SO_4^{2-} 含量采用 EDTA 法测定,K^+、Na^+ 含量采用 6400 火焰分光光度计测定。

1.4　数据处理

分别对不同处理条件下的根长、根表面积、根系干质量进行单因素方差分析,并对不同处理结果进行显著性检验。

2　结果与分析

2.1　脱硫石膏不同施用量对枸杞根际土壤离子含量的影响

由表 1 可知:随脱硫石膏施用量的变化,枸杞根际土壤离子含量有明显变化,土壤组成中的 Na^+、K^+、Mg^{2+}、Cl^- 和 HCO_3^- 离子含量逐渐降低。与 CK 相比,随着脱硫石膏施用量的增加,Na^+ 含量降低 14.7%～51.9%,K^+ 含量下降 5.6%～16.7%,Mg^{2+} 下降 19.9%～42.7%,Cl^- 下降 15.2%～44.6%,HCO_3^- 下降 14.8%～28.2%,而 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量分别提高 23.7%～96.9% 和 19.6%～80.4%。该结果说明,施用脱硫石膏增加了土壤中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的含量,并且土壤胶体吸附性较高的 Ca^{2+} 已经置换出土壤胶体表面的 Na^+、K^+、Mg^{2+} 等阳离子。

由于土壤溶液中的交换性 Na^+ 含量明显降低,土壤的理化性质也随之得到改善。试验表明:与 CK 相比,随着脱硫石膏施用量的增加,枸杞根际土壤碱化度、pH 值和土壤密度分别由 32.3%、10.51 和 1.50 g·cm^3 下降到 18.1%、7.82 和 1.35 g·cm^{-3},土壤孔隙度由 36% 增加到 47%,而土壤全盐含量却随脱硫石膏施用量的增加呈先降后升的趋势,但无明显变化。可能是因施用脱硫石膏后,可溶性 Ca^{2+} 代换出土壤胶体上交换性 Na^+ 和 Mg^{2+},并使盐分离子顺利淋洗出土壤胶体,而未施脱硫石膏的龟裂碱土质地黏重,土壤湿时吸水膨胀、泥泞、不易透水,限制了盐分淋洗,表现为当脱硫石膏施用量为 2.5 t/(667m^2)时,土壤全盐含量最低;脱硫石膏本身也是一种中等溶解度盐分,随着脱硫石膏施用量的增加,Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 可以引起土壤全盐含量的增加[9]。由此说明,脱硫石膏改良龟裂碱土效果明显,且改良效果在一定的范围内与脱硫石膏的施用量呈正相关,过量施用会导致土壤全盐含量增加。

表 1　脱硫石膏不同施用量对枸杞根际土壤离子含量和理化性质的影响

处理	根际土壤离子含量/(cmol(+、-、1/2Ca^{2+})·kg^{-1})								全盐/(g·kg^{-1})	碱化度/%	pH(H_2O)	土壤密度/(g·cm^{-3})	土壤孔隙度/%
	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}					
CK	8.63	0.18	7.56	6.98	14.92	11.13	0.51	0.00	4.70	32.3	10.51	1.50	36
T1	7.36	0.17	9.35	5.59	12.65	9.48	0.61	0.00	4.12	24.2	8.52	1.43	38
T2	5.31	0.16	11.48	5.01	11.08	9.10	0.70	0.00	2.91	20.8	7.90	1.40	39
T3	4.92	0.15	13.15	4.01	9.19	8.72	0.86	0.00	3.63	19.0	7.71	1.38	43
T4	4.15	0.15	14.89	4.00	8.26	7.99	0.92	0.00	4.42	18.1	7.82	1.35	47

2.2　施用脱硫石膏对枸杞根系生长的影响

由表 2 可以看出:对照与各处理间差异显著,T2 处理与其它处理间差异显著,T1、T3、T4 处理间差异不显著;T2 处理对枸杞根长、根表面积和根干质量的影响较显著。施用脱硫石膏明显促进枸杞根系的伸长、促进根表面积的增加及促进枸杞根生物量的积累。与 CK 相比,T1、T2、T3、T4 处理土壤的枸杞根长分别增长 22.8%、51.6%、27.3%、5.4%;枸杞根表面积分别增大 25.2%、41.1%、20.4%、2.8%;枸杞根干质量分别增加 6.3%、14.8%、4.3%、0.7%。当脱硫石膏施用量为 2.5 t/(667m^2)(T2)时,枸杞根系最长,根表面积最大,分别为对照的 1.5、1.4 倍,根干质量也最大;但当脱硫石膏施用量超过 2.5 t/(667m^2)时,枸杞的根长、根表面积、根干质量逐渐下降,受到明显抑制,说明过量施用脱硫石膏不利于枸杞根系的伸长、根系表面积的生长及根系生物量的积累。

表 2　脱硫石膏不同施用量对枸杞主根根长,根表面积和根干质量的影响

处理	根长/cm	根表面积/cm^2	根干质量/g
CK	29.53±1.547c	127.59±4.252d	15.27±0.351b
T1	36.27±1.198b	159.79±6.838b	16.23±0.611b
T2	44.78±2.431a	179.97±5.230a	17.53±0.351a
T3	37.58±1.279b	153.60±4.503b	15.93±0.808b
T4	31.13±0.902b	131.19±4.536c	15.37±1.012b

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,相同字母表示差异不显著。

3 结论与讨论

宁夏银北地区龟裂碱土最大的特点之一是具有较高的碱度,pH 在 9.5 以上,呈强碱性。虽然在银川平原分布极广,但因其碱性成分改良难以突破,长期得不到有效利用;因此,改良龟裂碱土对区域经济发展和生态环境改善意义重大。

本试验结果表明:施用脱硫石膏明显增加土壤溶液中可溶性 Ca^{2+} 的含量,显著降低了交换性 Na^{+} 的含量,使盐分动态发生了明显变化,改善了植物根系生长的微域环境。对脱硫石膏不同施用量改良的土壤种植枸杞发现:施用脱硫石膏各处理枸杞的根长、根表面积和根干质量均大于对照(表2),且随着脱硫石膏施用量的增加,枸杞的根长、根表面积和根干质量都呈先升后降的趋势。当脱硫石膏施用量为 2.5 t/(667m^2) (T2)时,枸杞的根长、根表面积和根干质量最大,分别达44.78 cm、179.97 cm^2、17.53 g。原因在于,当施用适量脱硫石膏改良碱土时,可溶性 Ca^{2+} 置换出土壤胶体上交换性 Na^{+} 和 Mg^{2+},并在灌溉淋洗作用下,使土壤中的 Na^{+}、K^{+}、Mg^{2+} 等离子向下迁移或排出,使土壤溶液中 Na^{+}、K^{+}、Mg^{2+} 等离子含量下降;而 HCO_3^{-}、CO_3^{2-} 含量的降低是因为 $CaSO_4$ 溶解度大于 $CaCO_3$,促使土壤中的 HCO_3^{-}、CO_3^{2-} 与 Ca^{2+} 发生沉淀反应,减轻 Na^{+} 对植物根系组织细胞的胁迫,使土壤全盐含量最低,促进植物根系和地上部分的生长发育,进而提高了枸杞的产量;但当脱硫石膏施用过量,所形成的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 会引起土壤全盐含量增加,从而抑制了根系生长发育,抑制了枸杞产量的增长。

总之,燃煤脱硫石膏改良龟裂碱化土壤的效果明显,但是改良效果与脱硫石膏的施用量仅在一定范围内呈正相关,过量施用脱硫石膏会影响植物根系生长发育。脱硫石膏施用量为 2.5 t/(667m^2)时,对土壤的改良效果最好,枸杞的根系生长发育达到最大。因此,针对不同物种选择合适的脱硫石膏施用量,对大面积改良盐碱地种植经济植物具有重要而深远的社会经济价值。

参考文献:

[1] 殷允相. 龟裂碱土的形成、性质及改良途径[J]. 土壤通报,1985(5):206-208

[2] 李跃进,乌力更,芦永兴,等. 燃煤烟气脱硫副产物改良碱化土壤田间试验研究[J]. 华北农学报,2004,19(S1):10-15

[3] 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 and Sediment Contam,2004,13:65-80

[4] 孙 权. 农业资源与环境质量分析方法[M]. 银川:宁夏人民出版社,2004

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

[6] Oster J D, Frenkel H. The chemistry of the reclamation of sodic soil with gypsum and lime[J]. Soil Sci Soc America,1980,44:41-45

[7] Chen L, Dick W A, Nelson S. Flue gas desulfurization by-products additions to acid soil: alfalfa productivity and environmental quality [J]. Environ Pollution,2001,114:161-168

[8] 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与利用原理[J]. 生态环境,2007,16(4):1135-1138

[9] Oster J D. Gypsum usage in irrigated agriculture: a review[J]. Fert Res,1982,3:73-89

[10] Sakai Y, Matsumoto S, Nitta Y, *et al*. Alkali soil reclamation in China using gypsum produced in flue gas desulfurization process: a case study[J]. J Global Environ Eng,2002,8:55-66

[11] 刘阳春,何文寿,何进智,等. 盐碱地改良利用研究进展[J]. 农业科学研究,2007,28(2):68-71

[12] 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

[13] 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

[14] 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

[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] 刘建军,陈海滨,田呈明,等. 秦岭火地塘林区主要树种根际微生态系统土壤性状研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(3):52-56

[17] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京:高等教育出版社,2001