

脱硫石膏与粉煤灰配施对碱化土壤改良及苜蓿生长的影响

高富东¹, 何俊^{1,2,3*}, 李敏¹, 雷梦媛¹, 王燕¹, 王宇¹, 王月琴¹

(1.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021; 2.中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021; 3.宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021)

摘要:【目的】筛选适宜新垦龟裂碱化土壤改良和苜蓿生长的脱硫石膏和粉煤灰配比。【方法】采用小区试验, 试验设置 CK (脱硫石膏 0、粉煤灰 0)、T1 (脱硫石膏 30 t/hm²、粉煤灰 15 t/hm²)、T2 (脱硫石膏 30 t/hm²、粉煤灰 30 t/hm²)、T3 (脱硫石膏 30 t/hm²、粉煤灰 45 t/hm²)、T4 (脱硫石膏 45 t/hm²、粉煤灰 15 t/hm²)、T5 (脱硫石膏 45 t/hm²、粉煤灰 30 t/hm²)、T6 (脱硫石膏 45 t/hm²、粉煤灰 45 t/hm²) 共 7 个处理, 研究脱硫石膏和粉煤灰配施对土壤 pH 值、碱化度和可溶性盐量及苜蓿生长影响。【结果】脱硫石膏和粉煤灰配施显著改善龟裂碱化土壤物理性质, 与 CK 相比, T3 处理土壤体积质量降低 7.69%, 土壤孔隙度和田间持水率分别提高 9.69% 和 18.70%; 脱硫石膏和粉煤灰配施对 0~40 cm 土层土壤化学性质改良效果较好, T4 处理 0~10、10~20 cm 土层土壤 pH 值分别降低 10.51%、11.66%, 碱化度分别降低 56.76% 和 50.27%; T4 处理 0~10、10~20、20~40 cm 土层土壤可溶性盐量分别下降 32.33%、52.55%、3.04%; T4、T1 处理苜蓿增产效果较好, 与 CK 相比, 苜蓿鲜质量分别提高 61.76%、43.21%, 干物质量分别提高 48.80%、30.72%; 但脱硫石膏和粉煤灰配施量过大则会造成减产, T6 处理苜蓿鲜质量和干物质量分别较 CK 降低 19.69%、10.24%。【结论】脱硫石膏和粉煤灰配合施用能有效降低龟裂碱化土壤的体积质量、pH 值、碱化度和可溶性盐量, 提高土壤孔隙度、田间持水率, 从而有利于苜蓿的生长和发育, 其中 45 t/hm² 脱硫石膏与 15 t/hm² 粉煤灰为最优配比组合。

关键词: 脱硫石膏; 粉煤灰; 碱化土壤; 苜蓿; 产量

中图分类号: K903

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023355

高富东, 何俊, 李敏, 等. 脱硫石膏与粉煤灰配施对碱化土壤改良及苜蓿生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 59-65.
GAO Fudong, HE Jun, LI Min, et al. Improving alfalfa growth through amending alkalized soil with mixture of desulfurization gypsum and fly ash[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 59-65.

0 引言

【研究意义】龟裂碱化土壤是盐碱土的一种类型, 俗称“白僵土”^[1-2], 土壤质地差, 具有不良的理化性状, 湿时膨胀泥泞, 干时收缩板结, 是制约当地农业生产的主要因素之一^[3-4]。当前, 我国是以煤炭为主要能源的国家之一, 燃煤发电是电力生产的主要来源^[5]。我国每年电厂脱硫石膏的产量已经超过了 8 000 万 t^[6-7], 粉煤灰排放量近 6 亿 t^[8-9], 其综合利用率分别不超过 80% 和 70%。大量煤基固废无法资源化利用进而堆积, 对土壤和大气环境产生了严重影响。因此, 开展煤基固废脱硫石膏和粉煤灰配施改良碱化土壤的研究, 对提高煤基固废资源化率、提高碱化土壤质量具有重要意义。

【研究进展】近年来, 国内外学者在脱硫石膏改

良盐碱地方面开展了广泛研究, 在粉煤灰改良盐碱地方面也开展了一定研究, 这不仅能解决煤基固废资源化利用问题, 又可以改善盐碱地区的生态环境。国内最早是 1995 年清华大学先后在内蒙古土默川平原、宁夏银川、吉林白城、内蒙古兴安盟等 10 余个省(市、区)利用脱硫石膏大面积改良盐碱地, 效果显著^[10-11]。20 世纪末, Chun 等^[12]和李焕珍等^[13]在辽宁省利用脱硫石膏改良盐碱地, 研究发现脱硫石膏可以降低土壤 pH 值、Na⁺量和碱化度。石懿等^[14]、王嘉航等^[15]和高惠敏等^[16]在内蒙古河套灌区研究表明, 施用脱硫石膏显著降低了耕层土壤 Na⁺量和 pH 值, 促进了作物生长并提高了作物产量。杨军等^[17]、孙兆军等^[18]和肖国举等^[19]通过龟裂碱土改良试验表明, 施用脱硫石膏能显著降低碱土 pH 值、碱化度, 显著提高作物产量。粉煤灰可以增大土壤孔隙度, 使土壤结构疏松, 增强土壤透水性和透气性, 明显改善土壤质地^[20-23]。施用粉煤灰导致土壤体积质量线性下降, 土壤持水量线性增加^[24]。董少文等^[25]研究表明, 施加粉煤灰的盐碱土壤孔隙率均有不同程度增加。Yang 等^[26]在苏打盐碱地改良试验中发现, 添加粉煤灰能够增强土壤持水性

收稿日期: 2023-08-08 修回日期: 2024-01-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1904303, 2021YFC3201205)

作者简介: 高富东 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事煤基固废改良盐碱地研究。E-mail: 1156317559@qq.com

通信作者: 何俊 (1983-), 男, 副研究员, 主要从事水土资源利用、生态修复及环境修复等方面的研究。E-mail: hejun3025@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

能, 能够很好地协调土壤的水肥气热。周文志等^[27]研究表明, 添加粉煤灰淋溶后, 土壤 pH 值、EC 值均较未添加粉煤灰处理显著降低。殷小琳等^[28]研究表明, 将脱硫石膏、柠檬酸渣和粉煤灰混匀, 各处理土壤降碱程度都超过 50%, pH 值均有下降。【切入点】单独施用脱硫石膏和粉煤灰均有改良盐碱地的作用, 但二者配施用于碱化土壤改良效果及适宜用量研究较少。【拟解决的关键问题】为此, 选择具有典型代表性的宁夏西大滩前进农场新垦龟裂碱化土壤, 研究脱硫石膏和粉煤灰配施对龟裂碱化土壤改良效果及苜蓿生长的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于宁夏平罗县西大滩前进农场

(106°23'E, 38°50'N), 地处贺兰山东麓洪积扇的边缘, 典型的干旱大陆性气候, 昼夜温差大, 光照充足, 蒸发强烈, 空气干燥, 无霜期短。年降水量为 213 mm 左右, 年蒸发量 2 000 mm 以上, 蒸降比为 10 左右。年均气温 9.3 °C, ≥10 °C 积温为 3 224 °C。试验地为 2022 年 4 月新开垦荒地, 研究区内地下水埋深为 1.5 m 左右, 地下水矿化度 <3 g/L, 土壤主要含硫酸盐、氯化物并且普遍含有苏打(碳酸钠), 0~60 cm 土层为黏土层, 60~80 cm 土层为砂土层。土壤 pH 值 >9.5, 碱化度 >30%, 属于重度碱化土壤^[29]。试验田 0~20 cm 土层基本理化性状见表 1。

1.2 试验材料

本研究所用的改良剂为脱硫石膏和粉煤灰, 于 2022 年 3 月 29 日购自宁夏宁东能源化工基地某电厂, 且符合国家安全标准, 其基本性状见表 2、表 3。

表 1 试验田土壤基本理化性质

Tab.1 Basic properties of the tested soils

土层深度/cm	pH 值	可溶性盐量/ (g kg ⁻¹)	碱化度/%	土壤体积质量/ (g cm ⁻³)	有机质量/ (g kg ⁻¹)	速效磷量/ (mg kg ⁻¹)	速效钾量/ (mg kg ⁻¹)	全氮量/ (g kg ⁻¹)
0~10	9.62	8.47	38.21	1.58	6.20	9.61	104.52	0.35
10~20	10.09	5.23	51.36	1.62	4.97	3.77	101.39	0.23

表 2 脱硫石膏组成和性状

Tab.2 Component and properties of desulfurized gypsum

pH 值	可溶性盐量/(g kg ⁻¹)	含水率/%	密度/(g cm ⁻³)	CaSO ₄ 2H ₂ O	CaSO ₄ 1/2H ₂ O	CaCO ₃
7.83	7.18	11.2	1.16	88.7	0.3	6.34

表 3 粉煤灰基本性质

Tab.3 Basic properties of fly ash

pH 值	可溶性盐量/(g kg ⁻¹)	体积质量/(g cm ⁻³)	平均粒径/μm
11.48	9.27	2.3	0.01~100

表 4 脱硫石膏和粉煤灰配施量

Tab.4 Dosage of desulfurized gypsum and fly ash

指标	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6
脱硫石膏用量/(t hm ⁻²)	0	30	30	30	45	45	45
粉煤灰用量/(t hm ⁻²)	0	15	30	45	15	30	45

1.3 试验设计

脱硫石膏施用量设置 30、45 t/hm² 共 2 个水平, 粉煤灰施用量设置 15、30、45 t/hm² 共 3 个水平, CK 为不施用脱硫石膏和粉煤灰, 试验共设 7 个处理(表 4), 每个处理 3 次重复, 共 21 个小区, 随机区组排列。将各处理脱硫石膏、粉煤灰分别均匀施于小区表层土壤, 并施用有机肥(30 t/hm²), 然后翻耕, 使改良物料与 0~20 cm 土层土壤充分混合。每个小区打埂, 田埂高 30 cm、宽 40 cm, 小区面积为 4 m×4 m, 2 个小区间设置 1 m 保护行。供试植物为“中苜三号”, 采用条播, 行距 30 cm, 开沟深度 4~5 cm, 播种深度为 1.5~2 cm, 播种量为 22.5 kg/hm²。于 2022 年 4 月 10 日种植, 7 月 30 日收获。试验地采用漫灌, 灌溉水为地下水, 平均矿化度 0.758 g/L, 种植前(4 月 5 日)灌水 1 次, 种植后分别于 5 月 19 日、6 月 12 日、6 月 29 日、7 月 15 日灌水 4 次, 单次灌水量为 1 350 m³/hm²。当 0~40 cm 土层土壤平均含水率低于田间持水率 50% 时开始灌水。

1.4 测试项目及方法

1) 土壤体积质量和孔隙度

于 2022 年 8 月 2 日采集 0~20 cm 土层土壤, 采用环刀法测定土壤体积质量^[29], 土壤孔隙度计算式为:

$$\text{土壤孔隙度} = (1 - \text{土壤体积质量} / 2.65) \times 100, \quad (1)$$

2) 土壤田间持水率^[30]:

$$\text{土壤田间持水率}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0}, \quad (2)$$

式中: m_0 为环刀质量(g); m_1 为烘干前环刀+湿土质量(g); m_2 烘干后环刀+干土质量(g)。

3) 土壤 pH 值、可溶性盐量、碱化度

于 2022 年 8 月 2 日采集 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层土样, 土壤样品经自然风干, 粉碎, 过 1 mm 筛后, 进行分析化验。采用 S220 多参数测试仪($m(\text{土}):V(\text{水})=1:5$)测定土壤 pH 值^[31]。采用残渣烘干-质量法测定土壤可溶性盐量^[31],

用 $m(\text{土}):V(\text{水})=1:5$ 混合后,充分震荡摇匀并过滤,取上清液,吸取40 mL的土壤浸提液,经水浴蒸干后,烘箱烘至恒质量,使用万分之一天平称质量计算土壤水溶性全盐量。用乙酸铵-氢氧化铵-火焰光度法测定 Na^+ 量,用乙酸钠-火焰光度法测定 $\text{CEC}^{[10]}$,碱化度计算式 $^{[32]}$ 为:

$$\text{碱化度}(\%) = \text{Na}^+ / \text{CEC} \times 100, \quad (3)$$

4) 苜蓿株高

苜蓿出苗后(2022年4月16日),分别于苜蓿幼苗期(5月9日)、分枝期(6月1日)、抽穗期(6月24日)、开花期(7月17日)测量株高,每个小区随机选取5株苜蓿测量地面到顶叶的垂直高度,计算平均株高。

5) 苜蓿分蘖数、鲜质量和干物质量

于2022年7月30日在每个小区挖取10株苜蓿求平均分蘖数;2022年7月30日每个小区收获1 m^2 长势均匀的苜蓿植株,测定鲜质量;鲜样带回实验室于烘箱105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青30 min后,65 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,称量苜蓿干物质量。

$$\text{鲜质量}(\text{t}/\text{hm}^2) = \frac{1 \text{ m}^2 \text{ 苜蓿鲜质量}(\text{kg}) \times 666.7 \text{ m}^2 \times 15}{1000}, \quad (4)$$

$$\text{干物质量}(\text{t}/\text{hm}^2) = \frac{1 \text{ m}^2 \text{ 苜蓿鲜质量烘干质量}(\text{kg}) \times 666.7 \text{ m}^2 \times 15}{1000}. \quad (5)$$

1.5 数据处理

运用SPSS 27.0进行试验数据处理和统计分析,利用Origin 2018作图。

2 结果与分析

2.1 脱硫石膏和粉煤灰配施对土壤物理性质的影响

由表 5 可知,脱硫石膏和粉煤灰配施显著降低土壤体积质量,增加土壤孔隙度和田间持水率,使土壤结构疏松,增强土壤透水性和透气性,但等量的粉煤灰比脱硫石膏对土壤物理性质的改良效果更好。与 CK 相比, T2、T3、T6 处理土壤体积质量降幅较大,分别降低了 6.49%、7.14%、6.49%。T2、T3、T5、T6 处理土壤孔隙度较 CK 分别增加 9.00%、9.60%、7.21%、9.00%。脱硫石膏和粉煤灰配施可提高土壤田间持水率, T2、T3、T5、T6 处理较 CK 分别提高了 17.79%、18.70%、17.46%、16.27%。

2.2 脱硫石膏和粉煤灰配施对土壤化学性质的影响

2.2.1 对土壤 pH 值的影响

图1为各处理土壤pH值。由图1可知,脱硫石膏和粉煤灰配施可有效降低耕层土壤pH值。0~10 cm土层, T1、T4处理土壤pH值降幅较大,分别较CK降低9.97%、11.06%。10~20 cm土层, T1、T4处理土壤pH值降幅也较大,分别较CK降低11.97%、11.66%。20~40、40~60、

60~80 cm土层土壤虽然未经改良,但土壤pH值均较CK有所下降。

表5 脱硫石膏和粉煤灰对龟裂碱化土壤体积质量、土壤孔隙度和田间持水率的影响

Tab.5 Effects of desulfurized gypsum and fly ash on bulk density, soil porosity and field water holding capacity of cracked alkaline soil

处理	土壤体积质量/(g cm^{-3})	土壤孔隙度/%	田间持水率/%
CK	1.54 $\pm$ 0.05a	41.89 $\pm$ 1.73c	24.28 $\pm$ 1.63b
T1	1.50 $\pm$ 0.03ab	43.39 $\pm$ 1.00ab	25.33 $\pm$ 1.26b
T2	1.44 $\pm$ 0.03b	45.66 $\pm$ 1.00a	28.60 $\pm$ 1.22a
T3	1.43 $\pm$ 0.04b	45.91 $\pm$ 1.53a	28.82 $\pm$ 1.59a
T4	1.49 $\pm$ 0.04ab	43.77 $\pm$ 1.51ab	25.61 $\pm$ 0.82b
T5	1.46 $\pm$ 0.04b	44.91 $\pm$ 1.64a	28.52 $\pm$ 0.77a
T6	1.44 $\pm$ 0.04b	45.66 $\pm$ 1.36a	28.23 $\pm$ 0.59a

注 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。

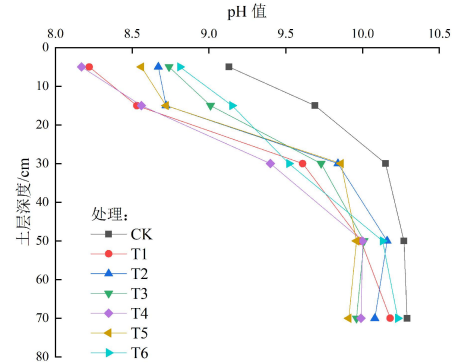


图1 各处理土壤 pH 值

Fig.1 Soil pH of different treatments

2.2.2 对土壤碱化度的影响

本研究土壤属于碱化土壤, Na^+ 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 质量浓度较高。由图2可知,脱硫石膏和粉煤灰配施可以显著降低耕层土壤碱化度,与土壤pH值变化趋势相似。0~10 cm土层, T1、T4、T5处理土壤碱化度降幅较大,分别较CK降低50.00%、56.76%、43.93%。10~20 cm土层, T1—T6处理土壤碱化度均与CK差异显著; T1、T4处理降幅较大,分别较CK降低47.44%、50.27%。20~40 cm土层, T1、T4、T6处理降幅较大,分别较CK降低20.61%、16.03%、12.86%,与0~20 cm土层相比,施用脱硫石膏和粉煤灰对深层土壤碱化度的改良效果较差,40~80 cm土层土壤碱化度均大于30%。

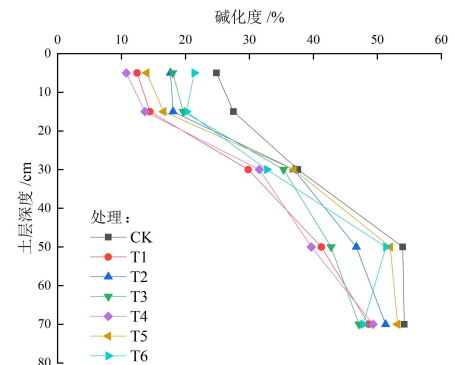


图2 各处理土壤碱化度

Fig.2 Soil alkalinity of different treatments

2.2.3 对土壤可溶性盐量的影响

脱硫石膏和粉煤灰配施可改善土壤物理性质,土壤可溶性盐分更易通过灌溉淋洗进入深层土壤,并通过排水系统排出,灌水洗盐效果整体上优于 CK。由图 3 可知,整个土壤剖面内,由于脱硫石膏和粉煤灰自身含有较高盐分且研究区蒸发旺盛,0~10 cm 土层土壤可溶性盐量均较高。与 CK 相比,0~10 cm 土层除 T6 处理土壤可溶性盐量有所增加外,T1—T5 处理均有不同程度降低,T4 处理较 CK 降幅最大,降低了 32.33%。10~20 cm 土层,T1—T6 处理土壤可溶性盐量分别较 CK 降低 58.60%、24.74%、13.46%、52.55%、51.69%、24.01%。20~40 cm 土层,T3、T4 处理土壤可溶性盐量较 CK 分别降低 7.05%、3.04%,其余处理土壤可溶性盐量均高于 CK。40~60 cm 土层,整体土壤可溶性盐量较高,T1、T4 处理较 CK 分别降低 3.38%、7.02%。60~80 cm 土层,T1—T6 处理均较 CK 有所降低,T1 处理降幅最大,降低了 46.26%。

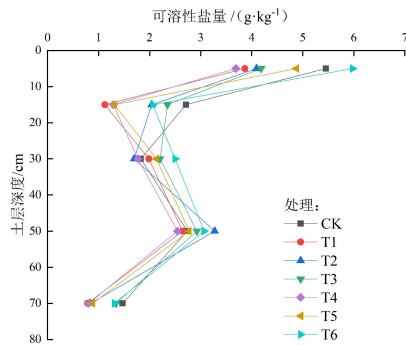


图3 各处理土壤可溶性盐量

Fig.3 Soil soluble salt content of different treatments

2.3 脱硫石膏和粉煤灰配施对苜蓿生长的影响

脱硫石膏和粉煤灰配施对苜蓿生长影响不同(图 4)。幼苗期,T1—T6 处理苜蓿株高与 CK 差异显著。分枝期,与 CK 相比,T4 处理苜蓿株高显著增加,增幅为 22.86%。抽穗期和开花期,与 CK 相比,T1、T4 处理苜蓿株高增幅较大,抽穗期苜蓿株高增幅分别为 15.11%、18.38%,开花期苜蓿株高增幅分别为 9.65%、14.01%。T6 处理在 4 个生育期株高整体较低,在开花期苜蓿株高较 CK 降低 4.65%。

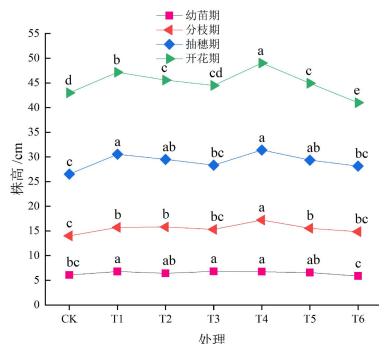


图 4 各处理苜蓿株高

Fig.4 Alfalfa plant height of different treatments

2.4 脱硫石膏和粉煤灰配施对苜蓿产量的影响

由表 6 可知,在整个生育期内,脱硫石膏和粉煤灰配施可显著提升苜蓿分蘖数、鲜质量和干物质量,且随着脱硫石膏和粉煤灰配施量的增加呈先增加后降低的趋势,T1、T4 处理苜蓿分蘖数较多,分别为 3.27、3.40 个,较 CK 分别增加 69.43%、76.17%。苜蓿鲜质量与干物质量的变化趋势一致,T1、T4 处理苜蓿鲜质量分别较 CK 增加 43.21%和 61.76%,干物质量分别较 CK 增加 30.72%和 48.80%。当脱硫石膏和粉煤灰施用量均为 45 t/hm²时,苜蓿分蘖数、鲜质量、干物质量均低于 CK,较 CK 分别降低 3.11%、19.69%、10.24%。

表6 不同处理对苜蓿分蘖数、鲜质量和干物质量的影响

Tab.6 Effects of different treatments on tiller number,

fresh weight and dry weight of alfalfa

处理	分蘖数	鲜质量/(t hm ⁻²)	干物质量/(t hm ⁻²)
CK	1.93±0.70c	5.23±0.80de	1.66±0.27cd
T1	3.27±1.03a	7.49±0.53ab	2.17±0.24ab
T2	2.67±0.72b	6.72±0.91bc	2.04±0.23b
T3	2.13±0.83bc	5.63±1.11cd	1.89±0.24bc
T4	3.40±1.06a	8.46±0.81a	2.47±0.26a
T5	2.53±0.83b	6.42±0.76abc	1.99±0.21bc
T6	1.87±0.83c	4.20±0.70e	1.49±0.17d

3 讨论

3.1 脱硫石膏和粉煤灰配施对土壤理化性质的影响

3.1.1 脱硫石膏和粉煤灰配施对土壤物理性质的影响

龟裂碱化土壤在高碱性环境下,土壤胶结的离子会和Na⁺发生交换反应,使得土壤中胶结物质的水化度增大,土壤胶体扩散双电层电动电位厚度增加导致土壤遇水易胶溶分散,导致土壤孔隙淤闭,孔隙度低且透水性差^[3, 33]。因此,对新垦龟裂碱化土壤来说,对土壤物理性质的改良尤为重要。脱硫石膏和粉煤灰配施能够有效改善土壤结构,T3处理土壤体积质量较CK降低7.14%,土壤孔隙度提高9.60%,田间持水率提高19.70%。可能其中粉煤灰比例小且孔隙度高,对土壤中的胶体有团聚作用,粉煤灰施加量越多,土壤体积质量越低,同时可以抑制裂缝生长,土壤干裂、板结现象较少,能够很好地协调土壤的水肥气热^[34]。且脱硫石膏中的钙质胶体可以提高土壤肥力,增加土壤中微生物数量和酶活性^[35],从而促进土壤水稳性团聚体形成,而团聚体具有多级孔性^[36],可以降低土壤体积质量,提高土壤总孔隙度,土壤物理指标向良性趋势发展,这与戴建军等^[37]研究结果一致。

3.1.2 脱硫石膏和粉煤灰对土壤化学性质的影响

本研究表明,脱硫石膏和粉煤灰配施能快速有效降低土壤pH值和碱化度。T1—T6处理0~10、10~20 cm 土层土壤 pH 值较 CK 分别降低 3.50%~10.51%、

5.57%~11.97%, 碱化度较CK分别降低14.00%~56.76%、26.74%~50.27%。其原因在于, 一方面脱硫石膏中含有的 Ca^{2+} 可以置换出土壤胶体中的 Na^{+} ^[33], 同时, 脱硫石膏中的 SO_4^{2-} 是强酸根, 能起到一定的中和酸碱作用^[38]。另一方面, 粉煤灰和有机肥又可以改善碱化土壤的孔隙结构和渗透性, 配合大水漫灌, 有效促进土壤中 Na^{+} 的淋洗, 降低 HCO_3^- 量, 增加 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 K^{+} 量^[39], 从而达到脱碱的效果。20~80 cm土层土壤未经改良剂直接改良, pH值和碱化度较CK均下降, 可能与水分淋洗带走部分碱基离子有关; 也可能与脱硫石膏中 Ca^{2+} 随水分运移到深层土壤, 置换出土壤胶体中可交换性 Na^{+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} , 生成的产物随水分淋洗排出有关^[15]。

研究区地下水埋深较浅、降水稀少, 蒸发强烈, 在毛细管作用下, 水盐运移导致大量盐分积聚在土壤表层^[40]。但脱硫石膏和粉煤灰配施可显著降低 0~20 cm 土层可溶性盐量, 其中 T4 处理 0~10 cm 土层改良效果最佳, 可溶性盐量降低了 32.29%, 主要是由于土壤物理性质改善, 水盐向下淋洗能力增强, 从而降低了土壤可溶性盐量。随着脱硫石膏和粉煤灰配施量的增加, 土壤可溶性盐量随之增加, T6 处理较 CK 提高 9.54%。这说明脱硫石膏和粉煤灰施用量较高时, 因自身带来的盐分存在增加土壤盐分的风险, 这与王旭等^[31]研究结果一致。其中, 60~80 cm 土层为砂土, 土壤孔隙度高, 土壤可溶性盐量整体较低, 可能部分盐分随土壤水进入深层土壤, Mg^{2+} 、 K^{+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 质量浓度较低, 但土壤胶体上吸附的交换性 Na^{+} 占阳离子交换量的百分率较高, 从而导致土壤的碱化度较高但可溶性盐量不高。

3.2 脱硫石膏和粉煤灰配施对苜蓿生长和产量的影响

由于本试验小区为新垦龟裂碱化土壤, 其苜蓿产量整体较低, 但二者配施对增加苜蓿株高、提高苜蓿分蘖数、鲜质量和干物质量有显著影响。当脱硫石膏和粉煤灰配施时, 碱化土壤体积质量降低、孔隙度和田间持水率增加, 有利于苜蓿根系的生长和吸收营养, 苜蓿株高、分蘖数增加, 对其产量提升明显, 可能粉煤灰中含有丰富的营养元素, 有利于作物的吸收与转化, 从而增加作物产量, 这与牟俊山等^[41]和 Nayak 等^[42]研究结果一致。同时, 施入脱硫石膏后增加作物对 Ca^{2+} 的吸收, 提高了作物抗逆性, 改善了土壤营养状况, 促进作物生长发育^[43], 其中, T4 处理鲜质量和干物质量分别较 CK 增加 61.76%和 48.80%。但脱硫石膏和粉煤灰配比过高, 则会降低苜蓿产量, T6 处理苜蓿鲜质量和干物质量分别较 CK 降低 19.69%和 10.24%, 这是由于脱硫石膏和粉煤灰中含有较多盐分, 一次性施入过多, 则会加剧盐害^[44-45], 影响作

物生长发育, 生长后期苜蓿叶片出现发枯发黄的现象。

4 结论

1) 粉煤灰和脱硫石膏配施能显著降低龟裂碱化土壤 pH 值、碱化度、可溶性盐量和土壤体积质量, 提高田间持水率及土壤孔隙度, 能够有效改善龟裂碱化土壤结构。

2) 粉煤灰和脱硫石膏配施能显著促进苜蓿生长, 提高苜蓿鲜质量和干物质量。本研究中 45 t/hm² 脱硫石膏和 15 t/hm² 粉煤灰配施对新垦龟裂碱化土壤的改良综合效果最佳。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 贾科利, 张俊华, 秦君琴. 典型龟裂碱土光谱特征分析及碱化程度预测[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 187-192, 199.
JIA Keli, ZHANG Junhua, QIN Junqin. Spectral characteristics of takyrsolonetzs and prediction of alkalization information[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 187-192, 199.
- [2] 王正, 孙兆军, SAMEH El-Sawy, 等. 苜蓿生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油葵产量[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 6 078-6 090.
WANG Zheng, SUN Zhaojun, SAMEH EL-SAWY, et al. Effects of enteromorpha prolifera biochar and wood vinegar co-application on takyric solonetz improvement and yield of oil sunflower[J]. Environmental Science, 2021, 42(12): 6 078-6 090.
- [3] 杨军, 马艳, 孙兆军. 宁夏龟裂碱土水盐运移及时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(S1): 214-221.
YANG Jun, MA Yan, SUN Zhaojun. Water-salt transfer and spatial-temporal distribution characteristics in takyric solonetz land in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(S1): 214-221.
- [4] 张俊华, 贾科利. 典型龟裂碱土土壤水分光谱特征及预测[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 884-890.
ZHANG Junhua, JIA Keli. Spectral reflectance characteristics and modeling of typical takyrsolonetzs water content[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 884-890.
- [5] 官贞珍, 潘卫国, 郭瑞堂, 等. 国内外燃煤电厂二恶英排放及控制[J]. 燃烧科学与技术, 2020, 26(5): 423-429.
GUAN Zhenzhen, PAN Weiguo, GUO Ruitang, et al. PCDD/fs emissions and control in coal-fired power plants at home and abroad[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(5): 423-429.
- [6] 王小彬, 闫湘, 李秀英, 等. 燃煤烟气脱硫石膏农用的环境安全风险[J]. 中国农业科学, 2018, 51(5): 926-939.
WANG Xiaobin, YAN Xiang, LI Xiuying, et al. Environment risk for application of flue gas desulfurization gypsum in soils in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(5): 926-939.
- [7] 田荣荣, 张文超, 李辉, 等. 燃煤烟气脱硫石膏改良盐碱地技术与工程化应用进展[J]. 燃烧科学与技术, 2022, 28(6): 736-748.
TIAN Rongrong, ZHANG Wenchao, LI Ye, et al. Progress in research and engineering application of flue gas desulfurization gypsum to reclaim saline-alkali land[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2022, 28(6): 736-748.
- [8] JIN S X, ZHAO Z H, JIANG S F, et al. Comparison and summary of relevant standards for comprehensive utilization of fly ash at home and abroad[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 621(1): 012 006.
- [9] 王迎霞, 杨保国. 粉煤灰“转行”改良土壤, 盐碱地里稻花香[N]. 科

- 技日报, 2021-10-22(6).
- [10] 刘娟, 张风华, 李小东, 等. 滴灌条件下脱硫石膏对盐碱土改良效果及安全性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 87-93.
LIU Juan, ZHANG Fenghua, LI Xiaodong, et al. Effect of flue gas desulphurization gypsum on the saline soil improvement and security under drip irrigation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(11): 87-93.
- [11] 赵永敢, 王淑娟, 李彦, 等. 脱硫石膏改良盐碱土技术发展历程与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(4): 735-745.
ZHAO Yonggan, WANG Shujuan, LI Yan, et al. Prospects of using flue gas desulfurization gypsum to ameliorate saline-alkaline soils[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(4): 735-745.
- [12] 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.
- [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(1): 26-30.
LI Huanzhen, XU Yupei, YANG Weiqi, et al. Study on effect of using sulfur-remaral gypsum as an amendment to the heavy soda saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 1999(1): 26-30
- [14] 石懿, 杨培岭, 张建国, 等. 利用 SAR 和 pH 分析脱硫石膏改良碱(化)土壤的机理[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(4): 5-10.
SHI Yi, YANG Peiling, ZHANG Jianguo, et al. The mechanism on sodic soils throwed desulfurized gypsum was analyzed from SAR and pH[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4): 5-10.
- [15] 王嘉航, 杨培岭, 任树梅, 等. 脱硫石膏配合淋洗改良碱化土壤对土壤盐分分布及作物生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 123-132.
WANG Jiahang, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effect of flue gas desulphurized gypsum and sodic soil reclamation by leaching water on soil salt distribution and the growth of crop[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 123-132.
- [16] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 脱硫石膏与有机物料配施对河套灌区土壤改良及向日葵生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 85-92.
GAO Huimin, WANG Xiangping, QU Zhongyi, et al. Combining desulfurization gypsum and organic materials to improve soil quality and sunflower growth in Hetao irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 85-92.
- [17] 杨军, 孙兆军, 罗成科, 等. 水盐调控措施改良龟裂碱土提高油菜产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 121-128.
YANG Jun, SUN Zhaojun, LUO Chengke, et al. Effect of salt-water regulation on improving takyric solonetz land and yield of oil sunflower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(18): 121-128.
- [18] 孙兆军, 赵秀海, 王静, 等. 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[J]. 林业科学研究, 2012, 25(1): 107-110.
SUN Zhaojun, ZHAO Xiuhai, WANG Jing, et al. Effect of amelioration of taky solonetz with FGDC on rhizosphere soil properties and root growth of lycium barbarum[J]. Forest Research, 2012, 25(1): 107-110.
- [19] 肖国举, 张萍, 郑国琦, 等. 脱硫石膏改良碱化土壤种植枸杞的效果研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(10): 2 315-2 320.
XIAO Guoju, ZHANG Ping, ZHENG Guoqi, et al. Research on the effect of planting matrimony-vine in alkali soil improved with desulfurized gypsum[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(10): 2 315-2 320.
- [20] 樊丽琴, 杨建国. 工业废弃物在盐碱地改良中的应用研究进展[J]. 河南农业科学, 2012, 41(1): 21-24.
FAN Liqin, YANG Jianguo. Research progress on industrial waste improving saline-alkali land[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2012, 41(1): 21-24.
- [21] TCHULDJIAN H, MCRAKTCHYSKA M, KAMENOVA-JOUHIMENKO S, et al. Fly ash addition to soils and its influence on some properties of soils and biological productivity of plants[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 1994, 8(2): 32-37.
- [22] 季慧慧, 黄明丽, 何键, 等. 粉煤灰对土壤性质改善及肥力提升的作用研究进展[J]. 土壤, 2017, 49(4): 665-669.
JI Huihui, HUANG Mingli, HE Jian, et al. Effects of flyash on promoting soil properties and fertility: A review[J]. Soils, 2017, 49(4): 665-669.
- [23] SKOUSEN J, YANG J E, LEE J S, et al. Review of fly ash as a soil amendment[J]. Geosystem Engineering, 2013, 16(3): 249-256.
- [24] KOHLI S J, GOYAL D. Effect of fly ash application on some soil physical properties and microbial activities[J]. Acta Agrophysica, 2010, 16(2): 327-335.
- [25] 董少文, 马淑花, 初茉, 等. 粉煤灰基土壤调理剂作用下盐碱土壤微观结构变化规律[J]. 过程工程学报, 2022, 22(3): 357-365.
DONG Shaowen, MA Shuhua, CHU Mo, et al. Microstructure changes of saline-alkali soil influenced by fly ash-based soil conditioner[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(3): 357-365.
- [26] YANG B B, LIU J W, ZHAO X M, et al. Evaporation and cracked soda soil improved by fly ash from recycled materials[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(9): 2 823-2 832.
- [27] 周文志, 李素艳, 孙向阳, 等. 不同改良材料对滨海盐碱土盐分淋溶特征的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(7): 1 485-1 492.
ZHOU Wenzhi, LI Suyan, SUN Xiangyang, et al. Effects of different materials on leaching characteristics of salinity in coastal saline-alkali soil[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(7): 1 485-1 492.
- [28] 殷小琳, 成晨, 丁国栋, 等. 含钙废弃物对盐碱土改良和胡枝子生长影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2020, 18(6): 115-122.
YIN Xiaolin, CHENG Chen, DING Guodong, et al. Improvement and effects of calcium-containing wastes on saline-alkali soil and growth of Lespedeza bicolor Turcz[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 115-122.
- [29] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [30] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
LI Fahu. Physical chemistry of soil[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [31] 王旭, 孙兆军, 韩磊, 等. 砾石暗沟提高脱硫石膏改良龟裂碱土效果及油菜产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22): 143-151.
WANG Xu, SUN Zhaojun, HAN Lei, et al. Subsurface gravel blind ditch increasing improved effects of takyric solonetz by desulfurized gypsum and yield of oil sunflower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(22): 143-151.
- [32] 李茜, 孙兆军, 秦萍, 等. 燃煤烟气脱硫废弃物和糠醛渣对盐碱土的改良效应[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 70-73.
LI Qian, SUN Zhaojun, QIN Ping, et al. Amelioration of saline-sodic soil with the by-product of flue gas desulphurization(BFGD) and furfural residue[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(4): 70-73.
- [33] 王旭, 何俊, 孙兆军, 等. 脱硫石膏糠醛渣对碱化盐土入渗及盐分离子的影响研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1 210-1 217.
WANG Xu, HE Jun, SUN Zhaojun, et al. Effects of desulfurized gypsum combined with furfural residue on permeability and salt ions in alkalinized solonchak[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1 210-1 217.
- [34] 李政轩. 燃煤电厂粉煤灰综合利用技术及其发展前景[J]. 工程技术研究, 2021, 6(9): 131-132.
- [35] 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.
WANG Jinman, YANG Peiling, SHI Yi, et al. Effect on physical and chemical properties of soil and sunflower growth when sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulphurization[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(3): 34-37.

- [36] 高敬尧, 王宏燕, 许毛毛, 等. 生物炭施入对农田土壤及作物生长影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 10-15.
- [37] 戴建军, 房秋娜, 汪丹妮, 等. 糠醛渣和石膏对盐碱土改良效果及水稻生长的影响[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(1): 37-45.
- DAI Jianjun, FANG Qiuna, WANG Danni, et al. Effects of furfural residue and gypsum on saline alkaline soil improvement and rice growth[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(1): 37-45.
- [38] 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.
- YANG Jun, SUN Zhaojun, LIU Jili, et al. Effects of saline improvement and leaching of desulphurized gypsum combined with furfural residue in newly reclaimed farmland crack alkaline soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 128-135.
- [39] TEJASVI A, KUMAR S. Impact of fly ash on soil properties[J]. National Academy Science Letters, 2012, 35(1): 13-16.
- [40] 张体彬, 康跃虎, 胡伟, 等. 宁夏银北地区龟裂碱土盐分特征研究[J]. 土壤, 2012, 44(6): 1 001-1 008.
- ZHANG Tibin, KANG Yuehu, HU Wei, et al. Study on salinity characteristics of takyric solonetz in Ningxia Yinbei Region[J]. Soils, 2012, 44(6): 1 001-1 008.
- [41] 牟俊山, 朱书全. 粉煤灰土壤改良剂在现代种植环境中的应用研究(英文)[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007(S1): 312-313.
- MOU Junshan, ZHU Shuquan. Research on application of coal fly ash soil ameliorant with in modern chinese planting environment[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007(S1): 312-313.
- [42] NAYAK A K, RAJA R, RAO K S, et al. Effect of fly ash application on soil microbial response and heavy metal accumulation in soil and rice plant[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 114: 257-262.
- [43] 李宏广, 何文寿, 段晓红, 等. 宁夏前进农场碱化土壤改良及水稻合理施肥技术研究[J]. 西北农业学报, 2009, 18(5): 217-222.
- LI Hongguang, HE Wenshou, DUAN Xiaohong, et al. Techniques of alkalized soil improvement and rational fertilization for rice on Qianjin farm in Ningxia Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(5): 217-222.
- [44] 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.
- WANG Jing, SUN Zhaojun, ZHANG Hao, et al. Study on the effect of amelioration of saline-sodic soil with the by-product of flue gas desulphurization(BFGD) to plant *elaegnus angustifolia* L.[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(28): 98-102.
- [45] 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.
- LI Ming, JIANG Lili, SUN Zhaojun, et al. Influence of flue gas desulphurization by-products on soil base cations and *helianthus annuus* growth[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(12): 128-134.

Improving alfalfa growth through amending alkalized soil with mixture of desulfurization gypsum and fly ash

GAO Fudong¹, HE Jun^{1,2,3*}, LI Min¹, LEI Mengyuan¹, WANG Yan¹, WANG Yu¹, WANG Yueqin¹

(1. School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan 750021, China; 3. Key Laboratory of Resource Evaluation and Environmental Regulation in Arid Region of Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objective】 Soil alkalization is an abiotic stress affecting agricultural production in many countries. Amending it by soil conditioners is a technique to ameliorate the adversary effect of alkalization and safeguard crop growth. In this paper, we study the efficacy of mixture of desulfurization gypsum and fly ash for improving alfalfa growth in a newly reclaimed alkalized soil. 【Method】 The field experiments were conducted in plots which were amended with mixture of desulfurization gypsum and fly ash at different ratios: 30 t/hm² of desulfurization gypsum and 15 t/hm² of fly ash (T1), 30 t/hm² of desulfurization gypsum and 30 t/hm² of fly ash (T2), 30 t/hm² of desulfurization gypsum and 45 t/hm² of fly ash (T3), 45 t/hm² of desulfurization gypsum and 15 t/hm² of fly ash (T4), 45 t/hm² of desulfurization gypsum and 30 t/hm² of fly ash (T5), 45 t/hm² of desulfurization gypsum and 45 t/hm² of fly ash (T6). The control is without amendment (CK). In each treatment, we measured the changes in soil properties and plant growth. 【Result】 Regardless of the mixture ratios, soil amendment significantly improved physical properties of the soil. Compared with CK, T3 reduced soil bulk density by 7.69% and increased porosity and water-holding capacity of the soil by 9.69% and 18.70%, respectively. The amendments also improved chemical properties of the soil, with T4 reducing the pH in the 0-10 and 10-20 cm of soil layers by 10.51% and 11.66%, alkalinity reduced by 56.76% and 50.27%, respectively. T4 also reduced soluble salt content in the 0-10, 10-20 and 20-40 cm of the soil layers by 32.33%, 52.55% and 3.04% respectively, compared to CK. Alfalfa grew better in T4 and T1, with its fresh weight increasing by 61.76% and 43.21%, and dry matter by 48.80% and 30.72%, respectively, compared to CK. It was found that overapplication of the conditioners comprised yield, with T6 reducing the fresh and dry matter by 19.69% and 10.24%, respectively, compared to CK. 【Conclusion】 Amending the alkalized soil with a mixture of desulfurization gypsum and fly ash at appropriate ratios can improve soil physical properties and reduce soil pH, alkalinity and soluble salt content in the soil, thereby promoting alfalfa growth. For all the treatments we compared, amending the soil with 45 t/hm² of desulfurization gypsum and 15 t/hm² of fly ash worked best.

Key words: desulfurization gypsum; fly ash; alkalized soil; alfalfa; yield

责任编辑: 白芳芳