

DOI:10.11686/cyxb2024448

http://cyxb.magtech.com.cn

闫玉龙, 杜学军, 王元月, 等. 脱硫石膏与粉煤灰配施对盐碱土改良效果研究. 草业学报, 2025, 34(10): 30—40.

YAN Yu-long, DU Xue-jun, WANG Yuan-yue, et al. Application of desulphurization gypsum with fly ash improves saline-alkali soils. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(10): 30—40.

脱硫石膏与粉煤灰配施对盐碱土改良效果研究

闫玉龙¹, 杜学军^{1*}, 王元月¹, 刘建立¹, 丁银贵¹, 魏源送²

(1. 中节能工程技术研究院有限公司, 北京 101302; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:为探究脱硫石膏与粉煤灰配施对干旱半干旱区盐碱土的改良效果, 本研究以定边县盐碱土壤为对象, 以紫花苜蓿为供试材料, 进行盆栽试验, 设置对照(CK)、添加脱硫石膏(1%、2%和4%; D₁、D₂和D₃)、添加粉煤灰(1%、2%和4%; F₁、F₂和F₃)以及添加脱硫石膏和粉煤灰混合物(0.5%+0.5%、1%+1%和2%+2%; DF₁、DF₂和DF₃) 10个处理, 对土壤盐碱化指标、土壤养分含量及苜蓿生长进行研究和分析。结果表明: 脱硫石膏可降低土壤pH, 增加土壤总磷含量, 提高苜蓿株高、生物量; SO₄²⁻、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量随脱硫石膏添加量的增加而增加。粉煤灰增加了土壤pH、SO₄²⁻、Ca²⁺和铁含量, 降低了K⁺含量、苜蓿株高和生物量。脱硫石膏和粉煤灰配施降低了铁含量, 增加了总磷含量, 对苜蓿生长没有明显影响, 说明二者配施对盐碱土的改良效果不佳。研究结果可为干旱半干旱区盐碱土改良以及煤基固废综合利用提供科学依据。

关键词: 干旱半干旱区; 土壤养分; 离子含量; 生物量

Application of desulphurization gypsum with fly ash improves saline-alkali soils

YAN Yu-long¹, DU Xue-jun^{1*}, WANG Yuan-yue¹, LIU Jian-li¹, DING Yin-gui¹, WEI Yuan-song²

1. China Energy Conservation and Environmental Protection Group Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 101302, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Saline-alkali soil is prevalent in arid and semiarid areas of Dingbian county. The aim of this study was to determine whether adding desulfurization gypsum, fly ash, or a combination of these two materials can improve saline-alkali soil. Pot experiments were conducted with alfalfa (*Medicago sativa*) growing in saline-alkaline soil with 10 treatments, including a control (CK), soil with the addition of desulfurization gypsum (1%, 2%, 4%; D₁, D₂, D₃), soil with the addition of fly ash (1%, 2%, 4%; F₁, F₂, F₃), and soil with the addition of mixture of desulfurization gypsum and fly ash (0.5%+0.5%, 1%+1%, 2%+2%; DF₁, DF₂, DF₃). The salinity, sodicity, and nutrient profile of the soils and plant growth were analyzed. The results showed that the addition of desulfurization gypsum reduced the soil pH, increased the total phosphorus content in soil, and increased plant height and biomass. The contents of SO₄²⁻, K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺ in soil increased with the addition of desulfurization gypsum. The addition of fly ash increased soil pH, SO₄²⁻, Ca²⁺, and total iron contents, decreased the soil K⁺ content, and resulted in decreased plant height and biomass. The mixture of desulfurization gypsum and fly ash significantly reduced the total iron content and increased the total P content in soil, but did not significantly affect plant growth. The results indicate that, compared with the addition of desulfurization gypsum and fly ash to saline-

收稿日期: 2024-11-15; 改回日期: 2025-01-15

基金项目: 中节能工程技术研究院博士后项目(ZYY-BH-2023-02)资助。

作者简介: 闫玉龙(1988—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士。E-mail: 15904881017@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: duxuejun19@163.com

alkali soil, the addition of desulfurization gypsum alone more effectively improved soil quality and promoted plant growth. These results provide a scientific basis for the improvement of saline-alkali soil and for the comprehensive utilization of coal-based solid waste in arid and semiarid areas.

Key words: arid and semi-arid areas; soil nutrient; ion concentration; biomass

土壤盐碱化是全球农业产量下降的主要因素之一,尤其是在干旱和半干旱地区^[1]。我国农耕地发生盐碱化面积已经达到760万hm²,占总农耕地面积的6.62%^[2]。盐碱土通常具有较高水平的pH值、可交换Na⁺、可溶性CO₃²⁻和HCO₃⁻^[3-4],土壤中的盐碱成分通过离子毒害、渗透胁迫和氧化胁迫等机制对植物造成危害^[5],从而影响植物生长发育,导致土壤生产力下降^[6-7]。

我国是煤炭消费大国,煤炭在利用过程中会产生脱硫石膏和粉煤灰等煤基固废^[8]。尽管脱硫石膏和粉煤灰在一些领域的应用已经相当成熟,但其利用率仍然偏低,大量脱硫石膏和粉煤灰只能以堆存的方式处置^[9]。这不仅会造成严重的环境污染,而且也造成了大量的土地资源浪费以及煤基固废中特含资源的浪费^[8]。

国内外研究人员在脱硫石膏和粉煤灰资源化利用方面进行了大量的研究探索,发现其对盐碱土壤有一定的改良作用^[10-11]。施用脱硫石膏可以降低盐碱土壤的pH、Na⁺、Cl⁻,并增加土壤孔隙度和碳含量^[12-13],还能提高作物幼苗成活率并显著提高作物产量,并且产量的增加与土壤交换性钠百分比和pH值的降低密切相关^[10,14]。可见,施用脱硫石膏改善了土壤质量,减轻了植物生长压力,从而提高了土壤生产力^[10,15]。粉煤灰用于土壤改良也表现出一定的效果,可以增加土壤养分含量和作物产量^[16-17],例如朱晓月等^[18]研究发现在盐碱土壤中添加粉煤灰对土壤有机碳、总氮和总磷含量均有积极影响,且与粉煤灰施用量有关系。高富东等^[19]在宁夏的研究发现,脱硫石膏和粉煤灰配施可显著降低龟裂碱化土壤的体积质量、pH值、碱化度和可溶性盐含量,提高土壤孔隙度、田间持水率,从而有利于苜蓿(*Medicago sativa*)的生长和发育。脱硫石膏和粉煤灰的主要化学成分具有一定的互补性^[8],二者配施是否能表现出更好的改良效果,这方面的研究还较少。

黄河“几字弯”生态区以干旱、半干旱地区为主。在长期的气候变化和人类活动的影响下,该地区土地荒漠化、盐碱化的范围不断扩大^[20]。同时,该区域是煤炭重要产区,煤炭产量占全国的40%^[21],全国煤炭生产和转化消费持续向此区域集中,脱硫石膏和粉煤灰产量巨大,长期不当堆存处置,对周边生态环境会构成区域性、累积性风险。所以,本研究选用脱硫石膏和粉煤灰两种煤基固废,探讨二者单施与配施对盐碱土壤的改良效果,为该区域盐碱土壤改良、煤基固废就近消纳提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土壤取自榆林市定边县,去除土壤表层枯枝、落叶等,取表层0~20 cm的土壤,放入密封袋中,带回实验室,其基本理化性质:pH为8.7,含盐量5.6 g·kg⁻¹,有机质含量7.1 g·kg⁻¹,总氮含量286 mg·kg⁻¹,总磷含量56.4 mg·kg⁻¹,速效氮含量93.3 mg·kg⁻¹,速效磷含量13.0 mg·kg⁻¹。脱硫石膏和粉煤灰由陕西恒源投资集团发电有限公司提供,脱硫石膏主要成分为CaSO₄,含有少量的SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO等,pH为7.8,粉煤灰主要成分为SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃,pH为12.4。选取紫花苜蓿为植物材料进行室内盆栽试验。

试验前测定了盐碱土壤、脱硫石膏和粉煤灰的主要重金属含量(表1)。两种固废的八大重金属含量均低于国家农用土壤污染风险管控标准(GB15618-2018)^[22],甚至除汞外,均低于供试盐碱土壤背景值,可以安全施用到盐碱土壤中。

1.2 试验设计

于2023年5—9月于北京市顺义区中国节能科技创新基地进行盆栽试验。共设10个处理(表2),包括对照(CK);3个脱硫石膏添加水平:D₁(1%)、D₂(2%)和D₃(4%);3个粉煤灰添加水平:F₁(1%)、F₂(2%)和F₃(4%);3个脱硫石膏+粉煤灰添加水平:DF₁(0.5%+0.5%)、DF₂(1%+1%)和DF₃(2%+2%),每个处理重复3次。将不同添加量煤基固废与盐碱土混匀后装入圆柱形塑料盆(下径22 cm,上径24 cm,盆高25 cm),每盆装入3 kg土

表1 试验材料中主要重金属含量

Table 1 The content of heavy metals in experimental materials (mg·kg⁻¹)

名称 Name	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	镍 Ni	铬 Cr	镉 Cd	汞 Hg	砷 As
土壤 Soil	22.3	11.6	39.0	15.9	46.9	<0.1	<0.002	11.3
脱硫石膏 Desulfurization gypsum	1.7	<1.4	10.7	1.7	14.2	<0.1	0.300	4.4
粉煤灰 Fly ash	0.7	<1.4	1.9	2.4	3.5	<0.1	0.100	1.5
国家标准① National standards ①	100.0	170.0	300.0	190.0	250.0	0.6	3.400	25.0

注: ①采用农用地土壤污染风险管控标准(GB15618-2018)^[22]。

Note: ① Use standard for risk control of soil pollution in agricultural land (GB15618-2018)^[22].

样,撒入50粒紫花苜蓿种子。盆栽试验于室内进行,无任何施肥措施,浇水量视情况而定,基本保持土壤含水量为田间持水率的60%。试验开始于5月初,9月末收获,试验结束后测定植株的生长参数及土壤性质。

1.3 样品处理

试验结束后,采用四分法^[23]收集各处理土壤样品,测定理化性质。将新鲜土样铺平放在光滑的厚纸上,放置在阴凉、通风、清洁的室内风干,将风干的土样碾碎,过2 mm筛。过筛后土样经充分混匀后分成两份,一份直接用于测定pH、电导率、土壤主要离子等。另一份继续研磨至全部通过0.15 mm孔筛,用于测定有机质、重金属等。

1.4 测定方法

本研究中采用电极法^[23]测定土壤pH和电导率,电感耦合等离子体-原子发射光谱仪(iCAP Pro,美国赛默飞世尔科技公司)测定水溶性阳离子Ca²⁺、Na⁺、K⁺和Mg²⁺,离子色谱仪(Aquion RFIC,美国赛默飞世尔科技公司)测定SO₄²⁻、Cl⁻,双指示剂-中和滴定法^[23](pH计/FE-28,瑞士梅特勒-托利多国际有限公司)测定CO₃²⁻、HCO₃⁻,电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP Pro,美国赛默飞世尔科技公司)测定重金属Pb、Ni、Cr、Cd、Cu和Zn,原子吸收分光光度计(4610GF,上海仪电分析仪器有限公司)测定土壤Hg和As,原子吸收光谱仪(PE-5100-PC,美国珀金埃尔默股份有限公司)测定土壤铁含量,重铬酸钾氧化法^[23]测定有机质含量,碱解扩散法^[23]测定土壤碱解氮,碱熔-钼锑抗分光光度法^[23]测定土壤总磷。

苜蓿株高于盆栽试验结束时测定,每盆随机测定10株,取平均值。将地上部分全部刈割后置于105℃烘箱中杀青30 min,调温至65℃烘干至恒重,测定其干重为每盆苜蓿生物量。

1.5 数据处理与分析

利用Microsoft Excel 2019、SPSS 19.0、R等统计软件对数据进行处理、方差分析、相关性分析、模型建立及作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤盐碱化指标的影响

2.1.1 对土壤pH的影响 如图1所示,对照土壤pH为8.7,添加脱硫石膏使pH显著下降($P<0.05$),在D₁、D₂和D₃处理下分别降低了0.4、0.8和0.9个单位。而添加粉煤灰使土壤pH增加,F₂和F₃处理下均增加了0.2个单位($P<0.05$)。当脱硫石膏和粉煤灰配施时,DF₃处理使其显著降低了0.6个单位($P<0.05$)。

表2 不同处理下脱硫石膏和粉煤灰添加量

Table 2 Addition amount of desulfurization gypsum and fly ash under different treatments (%)

处理 Treatment	脱硫石膏添加量 Desulfurization gypsum application rate	粉煤灰添加量 Fly ash application rate
CK	0	0
D ₁	1	0
D ₂	2	0
D ₃	4	0
F ₁	0	1
F ₂	0	2
F ₃	0	4
DF ₁	0.5	0.5
DF ₂	1.0	1.0
DF ₃	2.0	2.0

2.1.2 对土壤浸提液电导率的影响 不同处理对土壤电导率的影响见图 2。电导率随脱硫石膏添加量的增加而升高,且当施用量达到 2% 以上时,电导率值显著大于对照处理。添加粉煤灰对土壤电导率没有显著影响($P>0.05$)。在脱硫石膏和粉煤灰联合作用下,DF₃处理使土壤电导率显著增加($P<0.05$)。

2.1.3 对土壤八大离子含量的影响 土壤八大离子浓度见表 3,所有处理均未检测出 CO₃²⁻。与对照相比,不同处理对 Cl⁻和 Na⁺浓度影响不显著。随脱硫石膏添加量的增加,土壤 SO₄²⁻、K⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺的浓度逐渐增加,HCO₃⁻浓度则先降后增加。

添加粉煤灰降低了 HCO₃⁻浓度,但 F₁、F₂和 F₃处理间差异不显著($P>0.05$)。粉煤灰对土壤 K⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺浓度影响不显著。

脱硫石膏与粉煤灰配施使 HCO₃⁻浓度下降。土壤 SO₄²⁻、Ca²⁺和 Mg²⁺浓度在 DF₃处理下显著升高($P<0.05$)。

2.2 不同处理对土壤养分含量的影响

2.2.1 对土壤有机质的影响 由图 3可知,对照土壤有机质含量为 7.1 g·kg⁻¹,与对照相比,无论是添加脱硫石膏或粉煤灰,还是二者配施都没有对土壤有机质含量产生显著的影响($P>0.05$)。

2.2.2 对土壤速效氮的影响 不同处理对土壤速效氮的影响如图 4所示,对照组含量为 93.3 mg·kg⁻¹。所有处理均未显著影响土壤中速效氮的含量($P>0.05$)。

表 3 不同处理下土壤主要离子浓度

Table 3 Ion concentrations in different treatments (mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	氯离子 Cl ⁻	硫酸根离子 SO ₄ ²⁻	碳酸根离子 CO ₃ ²⁻	碳酸氢根离子 HCO ₃ ⁻	钾离子 K ⁺	钙离子 Ca ²⁺	钠离子 Na ⁺	镁离子 Mg ²⁺
CK	13.4±0.2ab	15.6±1.2d	0.0	538.8±28.3a	19.7±0.5cd	72.2±2.3e	27.9±1.2ab	15.6±0.2b
D ₁	14.6±0.2a	475.5±220.8d	0.0	433.1±46.6b	18.9±1.7cde	174.7±39.0d	32.4±0.9ab	12.7±1.8bc
D ₂	14.5±0.4a	4635.7±1014.0b	0.0	201.3±9.3d	30.0±2.5b	494.6±25.9b	32.0±3.5ab	31.4±1.7a
D ₃	13.9±0.8ab	7434.5±395.8a	0.0	228.8±31.0d	37.6±3.4a	598.4±16.8a	28.2±1.8ab	35.6±1.4a
F ₁	14.3±0.3ab	27.5±1.1d	0.0	371.1±25.4bc	20.8±0.6cd	91.7±2.0e	33.0±0.7a	14.0±0.3bc
F ₂	14.5±0.9a	24.4±1.6d	0.0	378.2±18.6bc	18.7±0.4cde	86.7±2.2e	29.8±2.1ab	14.4±0.2bc
F ₃	13.3±0.2ab	34.7±0.5d	0.0	348.7±7.1c	15.1±0.7def	77.7±3.2e	27.6±1.7ab	14.5±0.2bc
DF ₁	12.9±0.1b	24.9±1.4d	0.0	434.1±13.2b	13.6±0.4ef	78.7±0.8e	26.8±0.7b	11.3±0.3bc
DF ₂	13.9±0.2ab	34.3±6.8d	0.0	322.3±14.3c	11.4±0.7f	82.8±2.1e	28.0±0.8ab	8.9±0.6c
DF ₃	14.4±0.4ab	2575.7±1252.9c	0.0	213.5±23.3d	21.4±3.2c	384.1±73.0c	31.3±1.2ab	29.8±5.3a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level.

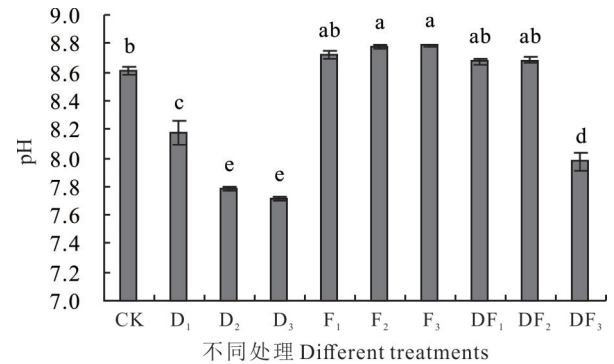


图 1 不同处理对土壤 pH 的影响

Fig. 1 The effects of different treatments on soil pH

不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at the 0.05 level. The same below.

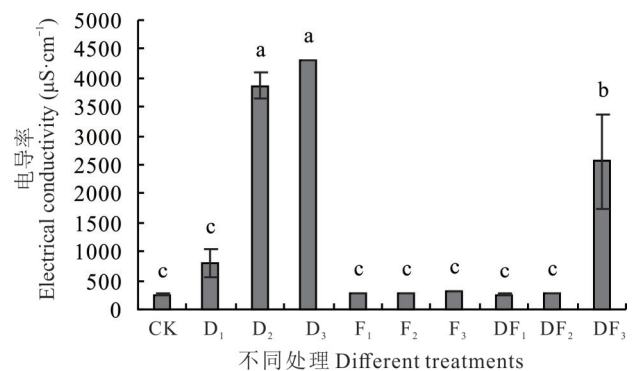


图 2 不同处理对土壤浸提液电导率的影响

Fig. 2 The effects of different treatments on electrical conductivity of soil extract

2.2.3 对土壤总磷的影响 如图5所示,对照土壤总磷含量为 $56.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。添加脱硫石膏以及脱硫石膏和粉煤灰配施使总磷含量显著增加($P<0.05$),但不同处理之间差异不显著($P>0.05$)。而单独添加粉煤灰对总磷含量没有显著影响($P>0.05$)。

2.2.4 对土壤铁含量的影响 如图6所示,对照土壤铁含量为 $14.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,添加脱硫石膏对其没有显著影响($P>0.05$)。铁含量随粉煤灰添加量的增加而增加, F_2 和 F_3 处理分别使其增加了8.6%和14.3%。而脱硫石膏和粉煤灰配施显著降低了土壤铁含量($P<0.05$)。

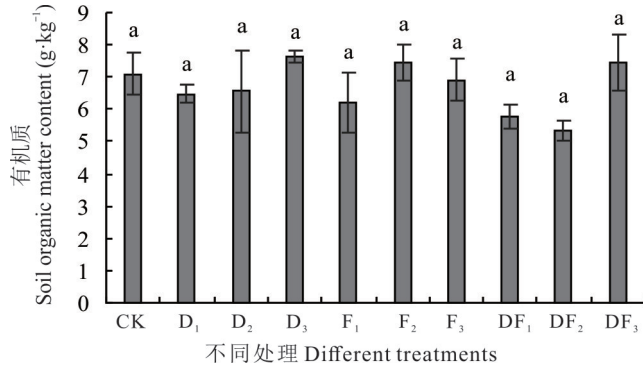


图3 不同处理对土壤有机质含量的影响

Fig. 3 The effects of different treatments on soil organic matter content

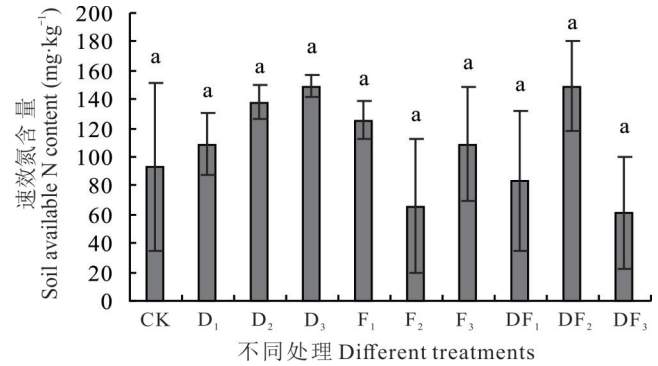


图4 不同处理对土壤速效氮含量的影响

Fig. 4 The effects of different treatments on soil available N content

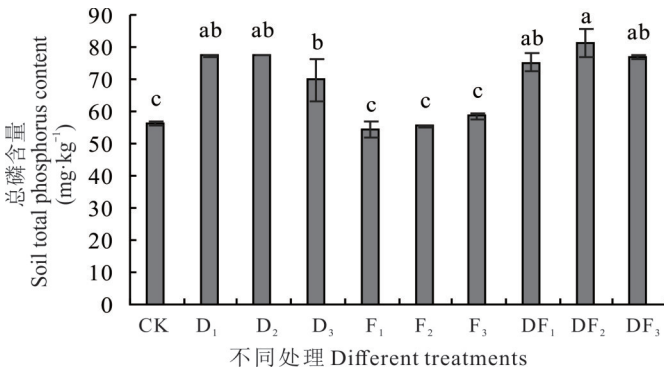


图5 不同处理对土壤总磷含量的影响

Fig. 5 The effects of different treatments on soil total phosphorus content

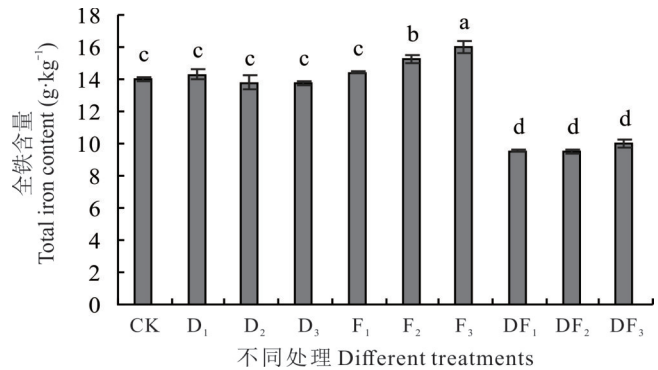


图6 不同处理对土壤全铁含量的影响

Fig. 6 The effects of different treatments on soil total iron content

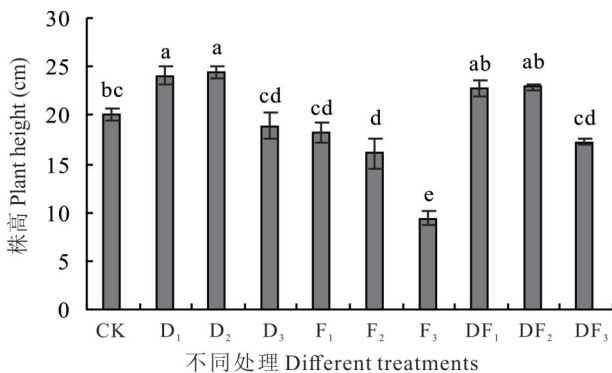


图7 不同处理对苜蓿株高的影响

Fig. 7 The effects of different treatments on plant height of alfalfa

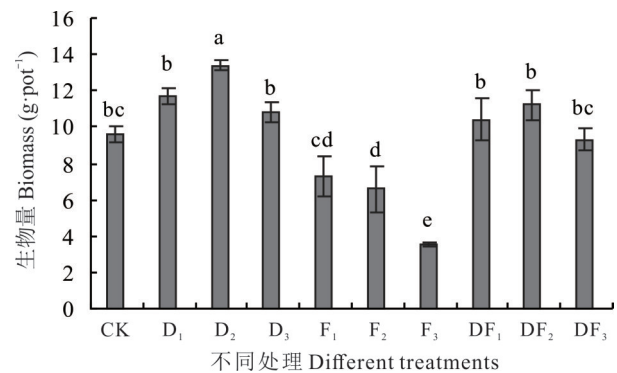


图8 不同处理对苜蓿生物量的影响

Fig. 8 The effects of different treatments on biomass of alfalfa

2.3 不同处理对苜蓿生长的影响

2.3.1 对株高的影响 如图 7 所示, D₁ 和 D₂ 处理使苜蓿株高增加了 20.0% 和 21.4% ($P < 0.05$)。脱硫石膏和粉煤灰联合施用对株高没有显著的影响 ($P > 0.05$)。苜蓿株高随粉煤灰添加量的增加呈下降的趋势, F₂ 和 F₃ 处理分别使其降低了 20% 和 53% ($P < 0.05$)。

2.3.2 对生物量的影响 不同处理对苜蓿生物量的影响如图 8 所示。对照组生物量为每盆 9.6 g, 添加脱硫石膏使生物量呈增加的趋势, D₂ 处理使其增加了 39.6% ($P < 0.05$)。脱硫石膏和粉煤灰配施对生物量影响较小 ($P > 0.05$)。而随着粉煤灰添加量的增加, 苜蓿生物量呈下降的趋势。

2.4 苜蓿生物量与土壤理化性质之间的关系

本研究采用 Pearson 相关性分析探讨了土壤性质和苜蓿生长参数之间的关系(表 4)。结果显示苜蓿生物量与 pH 和全铁含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), 而与电导率、总磷、Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。株高与全铁含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$), 而与总磷含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。此外, 鉴于土壤 pH、全铁含量、总磷含量等参数与生物量相关性较大, 通过趋势图分析了生物量与土壤参数之间的关系(图 9), 生物量与土壤 pH 之间呈显著的负相关关系 ($R^2 = 0.331$, $P = 0.001$); 生物量随铁含量的增加呈先增加后下降的趋势 ($R^2 = 0.464$, $P = 0.021$), 铁含量为 12 g·kg⁻¹ 时生物量达到最大值; 生物量随土壤总磷含量的增加而增加 ($R^2 = 0.463$, $P < 0.001$)。

2.5 脱硫石膏和粉煤灰对苜蓿生长的影响

本研究通过偏最小二乘路径模型 (partial least squares path modeling, PLS-PM) 确定了两种煤基固废对土壤性质以及苜蓿生长的直接和间接影响(图 10)。总而

表 4 土壤和植物指标之间的相关性

项目 Item	pH	电导率 Electrical conductivity	全铁 Total iron	有机质 Organic matter	速效氮 Available nitrogen	总磷 Total phosphorus	钾离子 K ⁺	钙离子 Ca ²⁺	镁离子 Mg ²⁺	钠离子 Na ⁺	氯离子 Cl ⁻	硫酸根离子 SO ₄ ²⁻	碳酸氢根离子 HCO ₃ ⁻	生物量 Biomass
电导率 Electrical conductivity	-0.922*													
全铁 Total iron	0.063	-0.019												
有机质 Organic matter	-0.202	0.204	0.330											
速效氮 Available nitrogen	-0.140	0.152	0.068	-0.232										
总磷 Total phosphorus	-0.500*	0.359	-0.638*	-0.235	0.079									
钾离子 K ⁺	-0.793*	0.852*	0.294	0.325	0.236	-0.024								
钙离子 Ca ²⁺	-0.942*	0.994*	-0.025	0.231	0.154	0.369*	0.862*							
镁离子 Mg ²⁺	-0.863*	0.961*	0.046	0.297	0.075	0.179	0.865*	0.957*						
钠离子 Na ⁺	-0.257	0.210	0.205	0.064	0.146	0.062	0.292	0.210	0.211					
氯离子 Cl ⁻	-0.289	0.275	0.146	-0.024	0.010	0.120	0.279	0.262	0.241	0.775*				
硫酸根离子 SO ₄ ²⁻	-0.858*	0.964*	0.029	0.262	0.186	0.287	0.878*	0.960*	0.919*	0.190	0.259			
碳酸氢根离子 HCO ₃ ⁻	0.647*	-0.746*	0.155	-0.132	-0.102	-0.389*	-0.503*	-0.739*	-0.703*	-0.187	-0.249	-0.693*		
生物量 Biomass	-0.575*	0.444*	-0.418*	-0.207	0.181	0.680*	0.273	0.446*	0.275	0.137	0.148	0.390*	-0.171	
株高 Plant height	-0.341	0.176	-0.424*	-0.354	0.154	0.604*	0.081	0.173	-0.002	0.206	0.211	0.131	0.036	0.879*

*: $P < 0.05$.

言之,脱硫石膏和粉煤灰通过对土壤pH、电导率、营养元素产生影响,进而影响了苜蓿的生长。PLS-PM 解释了86.98%的苜蓿生长变异。结果表明,脱硫石膏对土壤pH值有负面影响,对营养元素和电导率有积极影响。而粉煤灰对土壤pH和电导率有积极影响,对营养元素有负面影响。土壤pH对苜蓿株高和生物量有负面影响,营养元素含量对苜蓿株高和生物量有正面影响,而电导率对株高有负面影响。

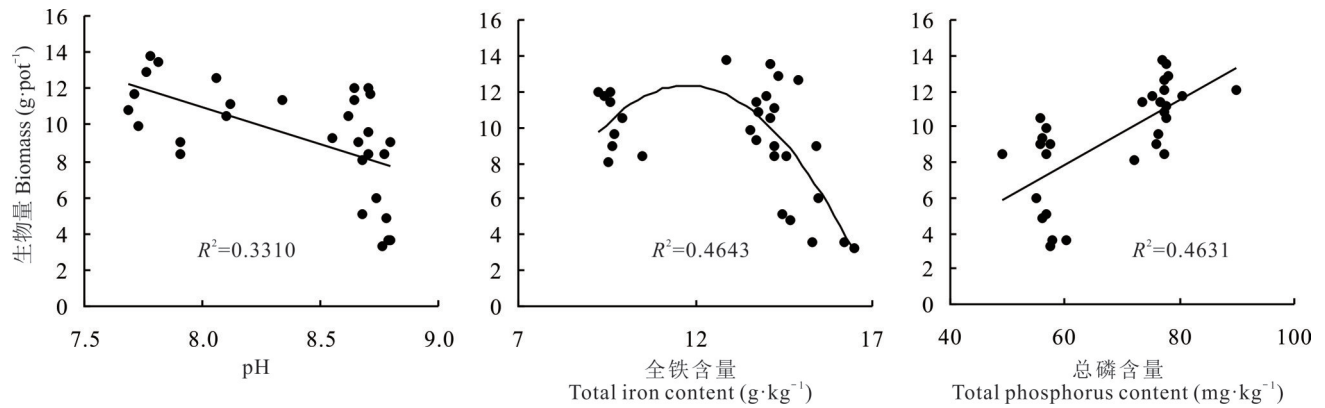


图9 苜蓿生物量与土壤性质之间的关系

Fig. 9 Relationships between biomass of alfalfa and soil properties

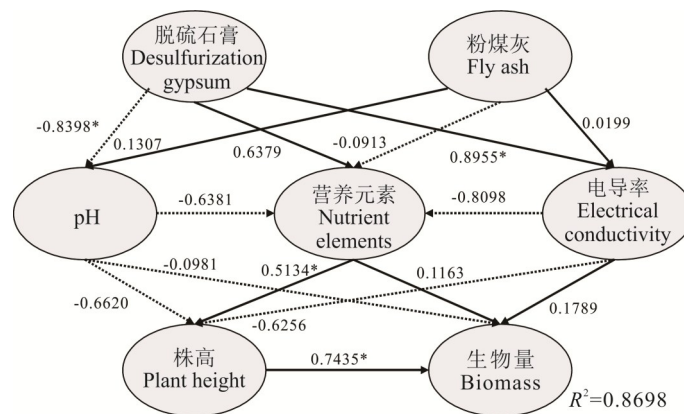


图10 脱硫石膏和粉煤灰对苜蓿生长的影响

Fig. 10 Effects of application of desulphurized gypsum and fly ash on alfalfa growth

偏最小二乘路径模型的拟合优度为0.5003,图中虚线代表负效应,实线代表正效应,*代表 $P < 0.05$ 。The Goodness of Fit (GOF) value of the PLS-PM is 0.5003. The dashed line represents negative effects, the solid line represents positive effects, * represents $P < 0.05$.

3 讨论

土壤盐碱化不仅会产生渗透胁迫和离子毒害,还会固化土壤中的营养元素,严重影响植物的生长^[24]。盐碱地改良要降低土壤pH和盐离子^[25],改善土壤养分状况^[26]。土壤pH值是影响植物生长最为关键的环境因素之一^[10],本研究中,施用脱硫石膏显著降低了土壤的pH,使其接近中性(图1),有效改善了土壤碱化现象。随脱硫石膏添加量增加,土壤的pH值呈下降趋势,加入2%脱硫石膏时,土壤pH值变化较大,而继续增加用量,变化却平缓。这可能是由于刚加入脱硫石膏时,钙离子溶解进入到土壤溶液中,导致其中钙离子浓度增大,促进 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 反应生成 CaCO_3 沉淀和 H^+ ,氢离子浓度升高,pH值下降。继续增加脱硫石膏后,随着氢离子浓度的增大,反应逐渐受到抑制,氢离子浓度增加趋势渐缓,即土壤pH值下降趋势变缓。表3中 HCO_3^- 含量的变化趋势也说明了这一点,且相关性分析也表明pH值和 HCO_3^- 呈显著正相关关系(表4)。此外,前人大量研究已经证明脱硫石膏中的钙离子和有机物质结合形成的胶结物质能够促进盐碱土壤中大团聚体的比例,增加土壤孔隙度^[13,17],进

而改善土壤结构,提高透水透气性能。脱硫石膏改善了盐碱土壤理化性质,尤其是降低了盐碱土壤的pH值,增加了土壤总磷含量(图5),因此能够促进苜蓿生长,提高株高(图7)和生物量(图8)。偏最小二乘路径模型结果也验证了脱硫石膏通过降低土壤pH值进而促进了苜蓿株高和生物量的增加(图10)。除此之外,脱硫石膏对钾和镁离子含量均有一定的改善效果(表3),能够为苜蓿生长提供良好的土壤环境,增加中、微量元素含量,为苜蓿生长提供良好的养分条件,对生长发育有显著的促进效应^[27-28]。但脱硫石膏未显著增加有机质、速效氮等营养元素的含量,这说明脱硫石膏可以补充盐碱土壤的磷素,但在利用脱硫石膏改良土壤时应适当补充氮肥以及其他微量元素肥料作为补充。

粉煤灰的主要成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 ,与土壤较为相似,同时还含有Ca、Fe、K等植物生长所必需的中微量元素^[8],另外,粉煤灰的孔隙较大,有利于提供良好的透水透气性能^[29],正如陈翔宇^[30]研究发现粉煤灰可以显著降低盐碱土壤pH值。但本研究发现了相反的结果,这可能是由于本研究使用的粉煤灰属于碱性($\text{pH}=12.4$),添加粉煤灰使土壤pH增加,粉煤灰中的碱性氧化物与 H^+ 发生中和反应,从而提高了土壤pH值。因此单施粉煤灰处理,苜蓿株高和生物量随粉煤灰添加量的增加而下降,这可能有两个原因,一方面是因为土壤pH增加(图1);另一个原因可能是添加粉煤灰使土壤全铁含量增加(图6),钾离子含量降低(表3),导致苜蓿受到了铁毒害而生长受阻^[31],本研究结果显示当土壤铁含量增加到一定值时,苜蓿生物量随铁含量的继续增加呈下降趋势(图9和表4)。

与单施脱硫石膏和粉煤灰相比,二者配施对盐碱土壤理化性质和苜蓿生长的影响表现出不同的趋势。 DF_3 处理使土壤 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 含量大幅度增加(表3),电导率显著增加(图2),同时pH值明显下降(图1)。脱硫石膏的添加增加了土壤电导率,这是因为脱硫石膏的主要成分是 CaSO_4 ^[8,32],提供的 Ca^{2+} 能置换土壤胶体上的 Na^+ ,从而改变土壤可溶性盐离子组成,降低土壤盐碱程度^[33-34]。脱硫石膏和粉煤灰配施也显著增加了土壤总磷含量(图5),但却对苜蓿株高和生物量都没有显著的影响(图7和图8)。与对照相比,二者配施导致土壤铁含量明显下降(平均下降31.0%,图6),铁缺乏会影响植物的光合作用,导致植物生长速度变慢^[35],这可能是苜蓿株高和生物量都没有增加的原因。二者配施后土壤铁含量降低的原因可能是,脱硫石膏中硫酸根与粉煤灰中铁离子结合生成易溶的硫酸铁盐,再加上粉煤灰的多孔特性改善了土壤结构,导致铁元素随灌溉水下渗或淋洗速率增加^[30],进而降低了土壤中的铁含量,二者配施的土壤硫酸根离子含量远低于单施脱硫石膏处理也支持了这一观点(表3)。

总体而言,与单施脱硫石膏相比,脱硫石膏和粉煤灰配施并没有表现出更好的改良效果,但二者配施的改良效果优于单施粉煤灰。这是因为脱硫石膏可以中和粉煤灰自身过高的pH值,相较于对照, DF_3 处理显著降低了土壤pH值(图1),这也为将来脱硫石膏和粉煤灰的联合施用提供了可能。高富东等^[19]的研究认为当添加的脱硫石膏与粉煤灰的比例较高(2:1~3:1)时,盐碱地植物生物量也会明显增加。因此还应继续探讨脱硫石膏和粉煤灰不同添加比例的改良效果以达到二者真正的互补。

4 结论

本研究结果表明,与单独添加粉煤灰和脱硫石膏+粉煤灰配施相比,单独添加脱硫石膏对盐碱土壤有更好的改良效果(对比不同添加量脱硫石膏,1%~2%的添加量改良效果更好),脱硫石膏能降低盐碱土壤pH,增加土壤 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量,改善土壤盐基组分,为植物生长创造更有利的条件,从而增加植株高度提高产量。但添加脱硫石膏后土壤养分含量并没有较大的提高,因此用脱硫石膏改良盐碱地时还需要增肥以保证产量。粉煤灰因其自身较高的pH值,施用后明显增加了土壤pH值,且对苜蓿生长具有负面作用;而与脱硫石膏配施后的 DF_3 处理可明显降低土壤pH值,因此不建议单独施加粉煤灰,且应进一步探讨二者配施比例以达到最佳改良效果。

参考文献 References:

- [1] Daliakopoulos I N, Tsanis I K, Koutroulis A, *et al.* The threat of soil salinity: a European scale review. *Science of the Total*

- Environment, 2016, 573: 727–739.
- [2] Jiang H H. Saline-alkali soil remediation by the combined application of halotolerant phosphate solubilizing microorganism and rock phosphate. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
姜焕焕. 耐盐碱解磷菌与磷石膏联用改良盐碱土的效果与机制. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] Fan Z L, Jia Y J, Fan Y, *et al.* Growth of *Elymus nutans* in saline saline-alkali soil amended with calcium silicate slag: Performance and mechanism. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(2): 93–101.
范朕连, 贾阳杰, 范远, 等. 盐碱土施用硅钙渣对披碱草生长的影响及机制. 草业学报, 2021, 30(2): 93–101.
- [4] Wang S J, Chen Q, Li Y, *et al.* Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 121: 82–92.
- [5] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651–681.
- [6] Yang Z X, Zheng X, Chen L B, *et al.* Morphological adaptation strategies of *Rumex hanus* planted in saline-alkali land of arid areas. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(7): 15–27.
杨志新, 郑旭, 陈来宝, 等. 干旱区盐碱地食叶草根根系形态分布适应策略研究. 草业学报, 2022, 31(7): 15–27.
- [7] Liang P, Zhang Y Q, Zhang M, *et al.* Effects of PAM application depth on the growth and yield of quinoa under different salt-alkali stress. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(5): 130–137, 197.
梁萍, 张永清, 张萌, 等. 不同盐碱胁迫条件下PAM施用深度对藜麦生长及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 130–137, 197.
- [8] Tian Q Y, Kang F R, Zhang K Y, *et al.* Research progress on ecological utilization of coal-based solid waste. Journal of Yulin University, 2021, 31(6): 57–62.
田巧艳, 亢福仁, 张凯煜, 等. 煤基固废生态化利用研究进展. 榆林学院学报, 2021, 31(6): 57–62.
- [9] Liu H B. Evaluation and path research on the development and utilization of coal-based waste resources. Taiyuan: Shanxi University, 2023.
刘汉斌. 煤基废弃资源开发利用评价及战略路径研究. 太原: 山西大学, 2023.
- [10] Wang Y, Wang Z, Liang F, *et al.* Application of flue gas desulfurization gypsum improves multiple functions of saline-sodic soils across China. Chemosphere, 2021, 277(8): 130345.
- [11] Ji H H, Huang M L, He J, *et al.* Effects of fly ash on promoting soil properties and fertility: A review. Soils, 2017, 49(4): 665–669.
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. 土壤, 2017, 49(4): 665–669.
- [12] Sun J J, Ma B, Li F J, *et al.* Effects of applying flue gas desulfurized gypsum on improvement and carbon sequestration in saline-sodic soils. China Powder Science and Technology, 2024, 30(3): 1–11.
孙金山, 马斌, 李福杰, 等. 施加脱硫石膏对盐碱土改良和固碳的影响. 中国粉体技术, 2024, 30(3): 1–11.
- [13] Liu J, Zhang F H, Li X D, *et al.* Effect of flue gas desulfurization gypsum on the saline soil improvement and security under drip irrigation. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(11): 87–93.
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. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 87–93.
- [14] Kost D, Ladwig K J, Chen L M, *et al.* Meta-analysis of gypsum effects on crop yields and chemistry of soils, plant tissues, and vadose water at various research sites in the USA. Journal of Environmental Quality, 2018, 47(5): 1284–1292.
- [15] Wang J, Yang P. Potential flue gas desulfurization gypsum utilization in agriculture: a comprehensive review. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018, 82(2): 1969–1978.
- [16] Jiang X, Guo L Z, Niu J J, *et al.* Improvement effect of different amendments on soil fertility status of saline alkali soil in Hexi Irrigation Area. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(4): 1086–1098.
姜雪, 郭丽琢, 牛济军, 等. 不同改良剂对河西灌区盐碱地土壤肥力状况的改良效应. 江西农业大学学报, 2024, 46(4): 1086–1098.
- [17] Chen W T, Guo L Z, Shan B, *et al.* Effects of amendments on oat growth and soil physical properties in saline-alkali land. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(5): 136–144.
陈文涛, 郭丽琢, 剡斌, 等. 改良剂对盐碱地燕麦生长及土壤物理性状的调控效应. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(5):

- 136—144.
- [18] Zhu X Y, Ma C, Fang Y, *et al.* Effects of drought stress and fly ash on fractal dimension and fertility of aeolian sandy soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 103—110.
朱晓月, 马灿, 方燕, 等. 水分胁迫和粉煤灰添加对风沙土颗粒分形维数及肥力的影响. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 103—110.
- [19] Gao F D, He J, Li M, *et al.* Improving alfalfa growth through amending alkalized soil with mixture of desulfurization gypsum and fly ash. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024, 43(4): 59—65.
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. *灌溉排水学报*, 2024, 43(4): 59—65.
- [20] Li S, Yang Z Y, Zhao H Y, *et al.* Spatio-temporal changes of aeolian desertification in the Jiziwan of the Yellow River from 1975 to 2020. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(5): 13—22.
李森, 杨宗英, 赵鸿雁, 等. 1975—2020年黄河“几字弯”沙漠化时空变化. *中国沙漠*, 2024, 44(5): 13—22.
- [21] Tian Y J, Yang B H, Wang S M, *et al.* Typical characteristics of geological hazards and ecological environment of coal base in the bends area of the Yellow River. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(6): 104—117.
田艳军, 杨博涵, 王双明, 等. 黄河几字弯区煤炭基地地质灾害与生态环境典型特征. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(6): 104—117.
- [22] Li X T. Soil environment quality, risk control standard for soil contamination of agriculture land: GB 15618-2018. Beijing: Standards Press of China, 2018.
李晓弢. 土壤环境质量, 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618-2018. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [23] Bao S D. Soil agro-chemical analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2018.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版, 2018.
- [24] Liang P X, Tang R, Guo R, *et al.* Effect of mixed salt-alkaline stress on growth and physiological characteristics in *Cyperus esculentus* L. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(10): 185—192.
梁培鑫, 唐榕, 郭睿, 等. 混合盐碱胁迫对油莎豆生长及生理性状的影响. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(10): 185—192.
- [25] Zhang Y C, Hong M, Zhao B, *et al.* Effects of different measures on the improvement of severe saline soil in Hetao irrigation area. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 309—315.
张宇晨, 红梅, 赵巴音那木拉, 等. 不同措施对河套灌区重度盐渍土改良效果. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 309—315.
- [26] Chen X D, Wu J G, Fan W, *et al.* Effects of different organic materials on the morphology and composition of soil humus binding in primary saline and alkaline land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 200—205.
陈晓东, 吴景贵, 范围, 等. 不同有机物料对原生盐碱地土壤腐殖质结合形态及组成的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 200—205.
- [27] Dai X G, Chao B, Bao Q G L, *et al.* Effects of combined application of laboratory waste liquids and gypsum on chemical properties of alkali soils and alfalfa growth. *Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 44(3): 16—23.
戴旭光, 朝博, 包庆格乐, 等. 实验室废液与脱硫石膏配施对碱土化学性质及苜蓿生长的影响. *农业科学研究*, 2023, 44(3): 16—23.
- [28] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, *et al.* Effects of straw layer and flue gas desulfurization gypsum treatments on soil salinity and sodicity in relation to sunflower yield. *Geoderma*, 2019, 352: 13—21.
- [29] Dong S W, Ma S H, Chu M, *et al.* Microstructure changes of saline-alkali soil influenced by fly ash-based soil conditioner. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2022, 22(3): 357—365.
董少文, 马淑花, 初莱, 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. *过程工程学报*, 2022, 22(3): 357—365.
- [30] Chen X Y. Study on improvement mechanism of saline-alkali soil by using fly ash-based soil conditioner. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
陈翔宇. 粉煤灰基土壤调理剂盐碱地改良机理研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [31] Zhou F L, Jiang L, Wang S F, *et al.* Amelioration of Fe²⁺ toxicity by K⁺ in rice. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, 28(4): 6—10.

- 周锋利, 江玲, 王松凤, 等. 钾离子对水稻亚铁毒害的缓解作用. 南京农业大学学报, 2005, 28(4): 6—10.
- [32] Liao R, Yu H, Yang P, *et al.* Quantitative evaluation of pore characteristics of sodic soils reclaimed by flue gas desulphurization gypsum using X-ray computed tomography. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(5): 545—556.
- [33] Wang Z, Sun Z J, Sameh E S, *et al.* Effects of *Enteromorpha prolifera* biochar and wood vinegar co-application on takyric solonetz improvement and yield of oil sunflower. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 6078—6090.
- 王正, 孙兆军, Sameh E S, 等. 浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油葵产量. 环境科学, 2021, 42(12): 6078—6090.
- [34] Zhao Y G, Zhang W C, Wang S J, *et al.* Effects of soil moisture on the reclamation of sodic soil by flue gas desulfurization gypsum. *Geoderma*, 2020, 375: 114485.
- [35] Huang Y Z, Zhu Y G, Huang F T, *et al.* Effects of cadmium and iron and their interactions on plants growth: a review. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3): 406—409.
- 黄益宗, 朱永官, 黄凤堂, 等. 镉和铁及其交互作用对植物生长的影响. 生态环境, 2004, 13(3): 406—409.