

DOI: 10.11766/trxb202209020488

姜展博, 宁松瑞, 王全九. 脱硫石膏改良盐碱土壤综合效果评价研究[J]. 土壤学报, 2024, 61 (3): 699–713.

JIANG Zhanbo, NING Songrui, WANG Quanjiu. A Comprehensive Evaluation of the Effect of Desulfurized Gypsum for Improving Saline-alkali Soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61 (3): 699–713.

## 脱硫石膏改良盐碱土壤综合效果评价研究\*

姜展博, 宁松瑞, 王全九<sup>†</sup>

(西安理工大学, 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

**摘要:** 为探究区域脱硫石膏改良盐碱土壤的综合效果, 通过文献调研统计分析了施加量在 0~60 t·hm<sup>-2</sup> 范围内的脱硫石膏, 对土壤 pH、交换性钠百分率、浸提液电导率和作物产量的变化特征。基于灰色关联分析法和熵权法建立了以脱硫石膏施加量为自变量的盐碱土壤综合改良评价模型。结果表明: 施用脱硫石膏可降低土壤 pH 和交换性钠百分率, 提高作物产量 (油菜、苜蓿、玉米、水稻、小麦、枸杞和甜高粱), 但增加了土壤浸提液的电导率值。随着脱硫石膏施加量的增加, 土壤 pH 和交换性钠百分率的降低率及作物产量的增加率呈先增加后减少的趋势, 而土壤浸提液电导率的增加率呈增加的趋势。在中度或重度盐碱土壤为获得作物高产, 脱硫石膏施加量不宜超过 30 t·hm<sup>-2</sup>。为综合分析脱硫石膏改良盐碱土壤的效果, 本文基于熵权—灰色关联度评价模型, 分析脱硫石膏最佳施加量。轻、中度盐碱土施加 18~22 t·hm<sup>-2</sup> 的脱硫石膏; 重度盐碱土施加 23~29 t·hm<sup>-2</sup> 的脱硫石膏可取得良好的改土增产效果。研究成果为脱硫石膏改良盐碱土壤提供参考依据。

**关键词:** 土壤改良; 作物产量; pH; 交换性钠百分率; 土壤电导率

**中图分类号:** TV93; S156.4 **文献标志码:** A

## A Comprehensive Evaluation of the Effect of Desulfurized Gypsum for Improving Saline-alkali Soil

JIANG Zhanbo, NING Songrui, WANG Quanjiu<sup>†</sup>

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** **【Objective】** In order to comprehensively study the effect of desulfurized gypsum in improving saline-alkali soils, this paper statistically analyzed the change characteristics of soil pH value, exchangeable sodium percentage (ESP), soil electrical conductivity (EC), and crop yield after applying 0~60 t·hm<sup>-2</sup> desulfurized gypsum in the northwest, north, northeast, and coastal areas of China through literature search. To achieve this, a comprehensive improvement evaluation model of saline-alkali soil was used in which the desulfurized gypsum amount was designed as an independent variable based on the grey relational analysis and entropy weight method. **【Method】** Soil pH value and ESP are often used to evaluate the alkalization property of saline-alkali soil while EC is used to evaluate the salinization property of saline-alkali soil. This paper used the data of

\* 国家自然科学基金项目 (41830754, 42007008)、兵团重大科技项目 (2021AA003-2) 和新疆维吾尔自治区重点研发项目 (2022B02003) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41830754, 42007008), the Major Science and Technology Projects of the XPCC (No. 2021AA003-2) and Key R&D Projects in Xinjiang Uygur Autonomous Region (No.2022B02003)

<sup>†</sup> 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wquanjiu@163.com

作者简介: 姜展博 (1996—), 男, 博士研究生, 主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: j\_zhanbo@163.com

收稿日期: 2022-09-02; 收到修改稿日期: 2023-09-19; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-10-24

literature to explore the relative change rates of soil pH, ESP, and EC in 0~20 cm soil layer with and without desulfurized gypsum within 1 year after the crop harvest in order to quantitatively reveal its improvement effect. Grey relational analysis and entropy weight method were used to synthesize three soil indexes to evaluate the improvement effect of desulfurized gypsum on saline-alkali soil. Due to the few literature data on light saline-alkali soil and moderate saline-alkali soil, the application of desulfurized gypsum in severe saline-alkali soil was mostly studied. This paper combined light saline-alkali soil and moderate saline-alkali soil into light and moderate saline-alkali soil for analysis. 【Result】Application of desulfurized gypsum reduced soil pH and ESP and increased crop yield, but increased EC. As the application rate of desulfurized gypsum increased, the decrease rate of pH and ESP and the increase rate of crop yield increased first and then decreased whereas the increase rate of EC showed an increasing trend. When the amount of desulfurized gypsum applied to moderate saline-alkali soil and severe saline-alkali soil exceeded  $30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , the increase rate of crop yield(Oil sunflower, alfalfa, corn, rice, wheat, *Lycium barbarum*, and sweet sorghum)showed a decreasing trend. To further analyze the effect of desulfurized gypsum on the improved saline-alkali soil, an entropy weight grey correlation evaluation model was established, and the application of desulfurized gypsum was optimized. 【Conclusion】Through the study on the improvement effect of desulfurized gypsum applied in the range of 0~60  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  in saline-alkali soil, using statistical analysis and mathematical modeling, it was concluded that the amount of 18~22  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  desulfurized gypsum in light and moderate saline-alkali soil; the amount of 23~29  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  desulfurized gypsum in severe saline-alkali soil could achieve good soil improvement effect and increase crop yield. The research results provide a reference for improving saline-alkali soil with desulfurized gypsum.

**Key words:** Soil amelioration; Crop yield; pH; Exchangeable sodium percentage; Soil electrical conductivity

受气候、地形地貌、土壤质地、地下水和海水入侵及农田不合理灌溉等影响,一些地区的农用地遭受盐碱化威胁。土壤盐碱化已严重影响粮食安全和土地可持续利用。根据联合国教科文组织和粮农组织不完全统计,全世界盐碱土面积为 9.54 亿  $\text{hm}^2$ ,而中国现有盐碱土地约 9 900 万  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。中国干旱半干旱地区的土壤盐碱化问题尤为突出,其中新疆地区盐碱化耕地占灌区耕地面积的 37.7%<sup>[2]</sup>,严重制约当地农业发展。所以发展盐碱化土地改良技术,对增加农民收入、保障重要农产品有效供给、保护生态安全等具有重要意义<sup>[3]</sup>。

降低土壤胶体上的交换性  $\text{Na}^+$ 浓度是改良盐碱土壤的有效方法。当土壤胶体吸附的交换性  $\text{Na}^+$ 含量增加,一部分  $\text{Na}^+$ 水解后呈碱性,提高土壤 pH;此外土壤胶体吸附的交换性  $\text{Na}^+$ 含量过高时,  $\text{Na}^+$ 置换土壤中的  $\text{Ca}^{2+}$ 和  $\text{Mg}^{2+}$ ,使土壤团粒结构分散,破坏土壤团聚体,致使土壤导水和导气能力下降<sup>[4]</sup>。土壤受盐碱胁迫时,阻碍作物根系对水分和养分的吸收和运输,抑制植物组织和器官的生长,最终影响作物产量和品质<sup>[5-6]</sup>。为改良盐碱土壤,目前已形成和发展了包括化学措施在内的多种调控方法。其中脱硫石膏(主要成分  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )是常用的盐碱土壤改良剂,它是燃煤电厂对烟气进行脱硫后产生

的副产物,含有丰富的 Ca、S、Si、Mg 等植物生长所必需的矿质元素,解决了盐碱土壤改良存在的成本高和见效慢等问题。国内外学者对脱硫石膏在改良盐碱土壤中的作用进行了大量试验,发现在淋洗作用下,脱硫石膏产生的  $\text{Ca}^{2+}$ 可置换土壤胶体吸附的交换性  $\text{Na}^+$ ,被置换出来的  $\text{Na}^+$ 在水分淋洗作用下离开作物根区<sup>[7]</sup>,降低了土壤 pH 和交换性钠百分率(Exchange sodium percentage, ESP),有效改善土壤结构和导水导气能力,促进盐分淋洗,进而实现盐碱土壤改良和作物增产<sup>[8]</sup>。但由于脱硫石膏本身富含大量可溶性盐分,过量施加易加剧土壤盐害,影响土地质量和农业健康发展。所以使用脱硫石膏改良盐碱土壤时必须考虑施加后的土壤盐分含量。脱硫石膏施用量越大,土壤盐分含量越高。过量施用脱硫石膏不仅不会达到改良盐碱土壤的效果,反而会危害作物生长<sup>[9]</sup>,影响作物的产量和品质<sup>[10-11]</sup>。土壤 pH 和 ESP 常被用来评价盐碱土壤的碱化程度,土壤盐分含量常被用来评价盐碱土壤的盐化程度。因此,众多学者在研究脱硫石膏对盐碱土壤化学指标影响的同时,注重土壤盐分含量的变化,以完善脱硫石膏改良盐碱土壤的效果<sup>[12-14]</sup>。但是,前人的研究多注重单独分析土壤化学指标在施加脱硫石膏后的响应,缺乏包括作物产量在内的综合评价,也

未充分考虑不同地区作用效果的差异性。为系统分析盐碱土壤中施加脱硫石膏的效果,本文在总结国内有关施加脱硫石膏改良盐碱土壤的相关成果基础上,以土壤的 pH、ESP 和土壤盐分含量为切入点,基于灰色关联分析法和熵权法建立了以脱硫石膏施加量为自变量的盐碱土壤综合改良评价模型,并结合作物产量确定合理的脱硫石膏施加量,为科学利用脱硫石膏改良盐碱土壤提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 数据来源

我国盐碱土主要分布在西北、华北、东北和滨海地区<sup>[15]</sup>。本研究所收集的数据资料涉及全国 26 个地区,其中西北盐碱土地区 9 个,分布在甘肃、内蒙古、宁夏、陕西和新疆;华北盐碱土地区 7 个,分布在北京、内蒙古和山西;东北苏打盐碱土地区 4 个,分布在吉林和内蒙古;滨海盐碱土地区 6 个,分布在江苏、山东、上海、天津和浙江。具体数据分布地区如附表 1 所示。数据的收集遵循以下原则:(1)每个盐碱土分布地区收集数据不少于 15 组;(2)直接获取原文献中提供的原始数据或利用 GetData Graph Digitizer 软件从文献的柱状图或曲线图中获取数据;(3)土壤 pH 测定方法为配置土水质量比为 1:5 或 1:2.5 的混合液使用 pH 计进行测定;ESP 测定方法为采用交换性 Na<sup>+</sup>与可交换性阳离子的百分比计算;土壤含盐量测定方法有重量法、电导率法、比重计法和阴阳离子总和算法等。其中电导率法为配置土水质量比为 1:5 的混合液使用电导率仪进行测定,根据土壤浸提液电导率值(Electrical conductivity, EC)计算相应的土壤含盐量变化率。在数据收集过程中,关于研究脱硫石膏对土壤盐分的影响均由 EC 计算,未采用其他方法,故本研究利用 EC 计算土壤盐分。本文收集的土壤 pH 样本数为 131 个,ESP 样本数为 41 个,EC 样本数为 52 个,作物产量的样本数为 73 个。所收集的文献中脱硫石膏施加量不高于 60 t·hm<sup>-2</sup>,其中 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 的含量介于 87.40%~90.11%,游离水含量介于 5.35%~12.00%。本文参考李玉波等<sup>[12]</sup>(东北)、肖国举等<sup>[16]</sup>(西北)和王立志等<sup>[17]</sup>(华北)使用的盐碱土等级划分标准,以及参考李小刚等<sup>[18]</sup>

关于国内盐碱土划分标准的探讨和《农业部办公厅关于开展盐碱土治理调查的通知》(农办计函[2011]95 号)等相关文献资料,将我国盐碱土划分为轻度盐碱土(pH7.5~8.5, ESP<20%,全盐量 1.0~2.0 g·kg<sup>-1</sup>)、中度盐碱土(pH 8.5~9.0, ESP 20%~30%,全盐量 2.0~4.0 g·kg<sup>-1</sup>)和重度盐碱土(pH >9.0, ESP >30%,全盐量 4.0~6.5 g·kg<sup>-1</sup>)。本文中轻度盐碱土的数据来自附录参考文献[54-60];中度盐碱土的数据来自附录参考文献[60-70];重度盐碱土的数据来自附录参考文献[60]和[71-101]。

### 1.2 研究方法

通常将脱硫石膏施加在 0~20 cm 盐碱土中以改良土壤<sup>[19-20]</sup>。Ning 等<sup>[21]</sup>研究指出,对实测数据进行相对化计算之后的结果可以消除气候、地理环境、土壤类型、耕作措施、作物品种等因素对研究结果的影响。本文利用文献资料数据,探究施加脱硫石膏后 1 年内,在作物收获后分别计算各个文献中施加脱硫石膏与未施加脱硫石膏相比,0~20 cm 土壤 pH、ESP 和 EC 的相对变化率,以定量揭示其改良效果。采用灰色关联分析法和熵权法,综合土壤 pH、ESP 和 EC 指标,评估施加脱硫石膏对盐碱土壤的改良效果。因轻度盐碱土和中度盐碱土的文献数据较少,并且脱硫石膏施用在中度盐碱土的研究居多,所以本文将轻度和中度盐碱土合并为轻中度盐碱土进行分析。

### 1.3 灰色关联度分析法和熵权法

本文将灰色关联分析法和熵权法结合构建以脱硫石膏施加量为自变量的盐碱土壤综合改良评价模型。灰色关联分析是建立在充分利用客观数据的基础上,得到各个方案与最优理想方案的接近度,从而进行决策,其对于小样本指标的评价问题决策准确性较高;熵权法可以充分利用客观数据所提供的信息来确定客观权重,去除主观性影响,反映了各个指标在指标集中的重要性程度,是综合决策的基础<sup>[22-23]</sup>。

依据 Deng<sup>[24]</sup>和吕锋<sup>[25]</sup>构建的灰色关联度评价模型计算参考向量与比较向量的灰色关联系数  $\gamma_{ij}$ 。根据式(1)~式(3)计算土壤 pH 降低率、土壤交换性钠百分率降低率和土壤浸提液电导率增加率的信息冗余度并计算 3 个指标的熵权权重。通过熵权—灰色关联度的大小对参评样本进行优劣排序。

计算第  $j$  个指标的熵  $H_j$ :

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \cdot \ln f_{ij} \quad (1)$$

式中,  $f_{ij} = \gamma_{ij} / \sum_{i=1}^n \gamma_{ij}$  为第  $j$  个指标下第  $i$  个项目的指标值的比重。

计算第  $j$  个指标的信息熵冗余度和熵权  $w_j$ :

$$d = 1 - H_j \quad (2)$$

$$w_j = d / \sum_{j=1}^3 d \quad (3)$$

根据式 (1) ~ 式 (3) 计算评价对象的熵权—灰色关联度:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^3 w_j \gamma_{ij} \quad (4)$$

## 1.4 数据处理

使用 Excel 2016 (Microsoft Corporation, USA) 进行数据处理, 使用 Origin2019 (OriginLab Corporation, USA) 进行作图, 使用 MATLAB (MathWorks Incorporated, USA) 进行数学模型构建和求解。

## 2 结果

### 2.1 土壤 pH 变化特征

土壤 pH 是判断土壤酸碱程度的重要指标, 过高的 pH 改变土壤物理和化学性质, 使大部分作物生长的土壤环境退化<sup>[26]</sup>。脱硫石膏施用于碱性土壤中, 其含有的成分  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  微溶于水, 溶解在土壤中的  $\text{Ca}^{2+}$  会置换土壤胶体吸附的  $\text{Na}^+$ , 被置换出来的  $\text{Na}^+$  在水分淋洗作用下离开作物根区, 降低土壤 pH<sup>[27]</sup>。由于土壤的初始条件不同, 施用脱硫石膏引起土壤 pH 降低的程度不同。以本文所述研究方法, 通过分析施加脱硫石膏的土壤 pH ( $X_{\text{pH}}$ ), 并以未施加脱硫石膏的处理 ( $CK_{\text{pH}}$ ) 为基础, 计算施加脱硫石膏后土壤 pH 的降低率  $Y_{\text{pH}}$  (即  $Y_{\text{pH}} = \left(1 - \frac{X_{\text{pH}}}{CK_{\text{pH}}}\right) \times 100\%$ ), 如图 1 所示。因土壤 pH 降低

率在 15、22.5、30、45、60  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$  的脱硫石膏施加量下的出现频率较大, 所以以这 5 个施加量下的土壤 pH 降低率计算平均值。但由于各研究的初始土壤和脱硫石膏的 pH 不同, 导致土壤 pH 降低率分布较为分散, 变化幅度较大。为便于分析, 利用二次函数拟合土壤 pH 降低率的上限、下限以及轻中度和重度盐碱土壤 pH 降低率的平均值变化过程, 结果如下:

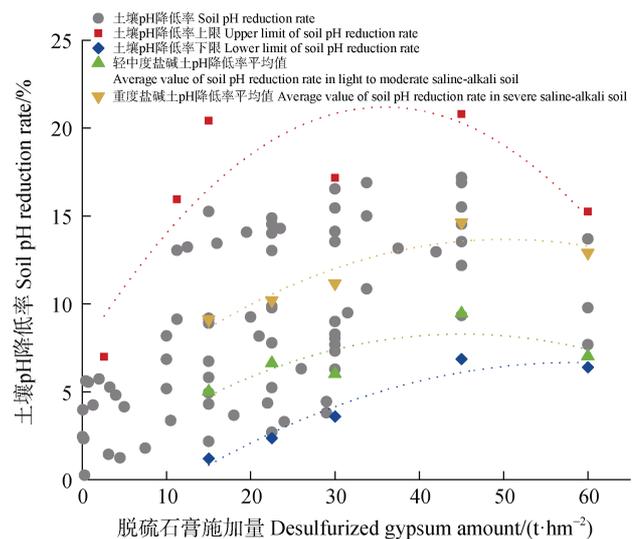


图 1 脱硫石膏施加量对土壤 pH 降低率的影响

Fig. 1 Effect of desulfurized gypsum amount on soil pH reduction rate

$$Y_{\text{pH 上限}} = -0.011M^2 + 0.772M + 7.376 \quad (n=6, R^2 = 0.71) \quad (5)$$

$$Y_{\text{pH 下限}} = -0.003M^2 + 0.362M - 3.907 \quad (n=5, R^2 = 0.95) \quad (6)$$

$$Y_{\text{pH 轻中平均}} = -0.004M^2 + 0.351M + 0.383 \quad (n=14, R^2 = 0.67) \quad (7)$$

$$Y_{\text{pH 重平均}} = -0.004M^2 + 0.409M + 3.413 \quad (n=32, R^2 = 0.88) \quad (8)$$

式中,  $Y_{\text{pH 上限}}$ 、 $Y_{\text{pH 下限}}$ 、 $Y_{\text{pH 轻中平均}}$  和  $Y_{\text{pH 重平均}}$  分别为指示作物收获后与未施加脱硫石膏的土壤相比, 施加脱硫石膏处理的土壤 pH 降低率的上限、下限以及轻中度和重度盐碱土壤 pH 降低率的平均值 (%),  $M$  为脱硫石膏施加量 ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $n$  为样本数。

依次对式 (5) ~ 式 (8) 进行求一阶导数可得,

当脱硫石膏施加量为  $35.72 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 土壤 pH 降低率上限存在最大值, 为 21.16%; 当脱硫石膏施加量为  $60.33 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 土壤 pH 降低率下限存在最大值, 为 7.01%; 当脱硫石膏施加量为  $44.94 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 轻中度盐碱土壤 pH 降低率平均值存在最大值, 为 8.26%; 当脱硫石膏施加量为  $49.87 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 重度盐碱土壤 pH 降低率平均值存在最大值, 为 13.61%。

## 2.2 土壤交换性钠百分率变化特征

利用  $\text{Na}^+$  的饱和度表示土壤交换性钠百分率 (ESP), 它是指土壤胶体上吸附的交换性  $\text{Na}^+$  占阳离子交换量的百分率<sup>[28]</sup>。土壤胶体吸附  $\text{Na}^+$  过多, 致使 ESP 升高、土壤团聚体崩解、黏粒分散。用脱硫石膏改良盐碱土壤是利用土壤的阳离子交换能力。盐碱土壤中加入脱硫石膏后, 由于  $\text{Ca}^{2+}$  较  $\text{Na}^+$  对土壤中胶体的吸附交换能力大, 在淋洗作用下  $\text{Ca}^{2+}$  与胶体上附着的  $\text{Na}^+$  发生置换, 将土壤交换性  $\text{Na}^+$  转化为水溶性离子, 从土壤表层淋洗至作物根层外, 从而降低 ESP, 达到土壤改良的目的<sup>[29]</sup>。以本文所述研究方法, 通过分析施加脱硫石膏后的 ESP ( $X_{\text{ESP}}$ ), 并以未施加脱硫石膏的处理 ( $CK_{\text{ESP}}$ ) 为基础, 计算施加脱硫石膏后 ESP 的降低率  $Y_{\text{ESP}}$  (即  $Y_{\text{ESP}} = \left(1 - \frac{X_{\text{pH}}}{CK_{\text{pH}}}\right) \times 100\%$ ), 图 2 显示了文献中施加脱硫

石膏后 ESP 降低率。因 ESP 降低率在 11.25、22.5、30、33.75、45  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  的脱硫石膏施加量下的出现频率较大, 所以这 5 个施加量下的 ESP 降低率计算平均值。由于土壤的初始条件不同, 经脱硫石膏改良后 ESP 发生变化也不同。由图 2 可知, 施加脱硫石膏降低了 ESP, 但是降低率变化幅度仍然较大。从 ESP 降低率的上限、下限以及轻中度和重度盐碱土 ESP 降低率的平均值来看, 随着脱硫石膏施加量的增加, 四者的降低率均呈现先增加后降低的趋势。利用二次函数对曲线进行拟合, 结果如下:

$$Y_{\text{ESP 上限}} = -0.022M^2 + 1.918M + 20.549 \quad (n=7, R^2 = 0.84) \quad (9)$$

$$Y_{\text{ESP 下限}} = -0.005M^2 + 0.346M + 5.667 \quad (n=5, R^2 = 0.98) \quad (10)$$

$$Y_{\text{ESP 轻中平均}} = -0.025M^2 + 1.481M + 20.984 \quad (n=10, R^2 = 0.91) \quad (11)$$

$$Y_{\text{ESP 重平均}} = -0.025M^2 + 1.745M + 8.270 \quad (n=8, R^2 = 0.91) \quad (12)$$

式中,  $Y_{\text{ESP 上限}}$ 、 $Y_{\text{ESP 下限}}$ 、 $Y_{\text{ESP 轻中平均}}$  和  $Y_{\text{ESP 重平均}}$  分别为指示作物收获后与未施加脱硫石膏的土壤相比, 施加脱硫石膏处理的 ESP 降低率的上限、下限以及轻中度和重度盐碱土 ESP 降低率的平均值 (%),  $M$  为脱硫石膏施加量 ( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),  $n$  为样本数。

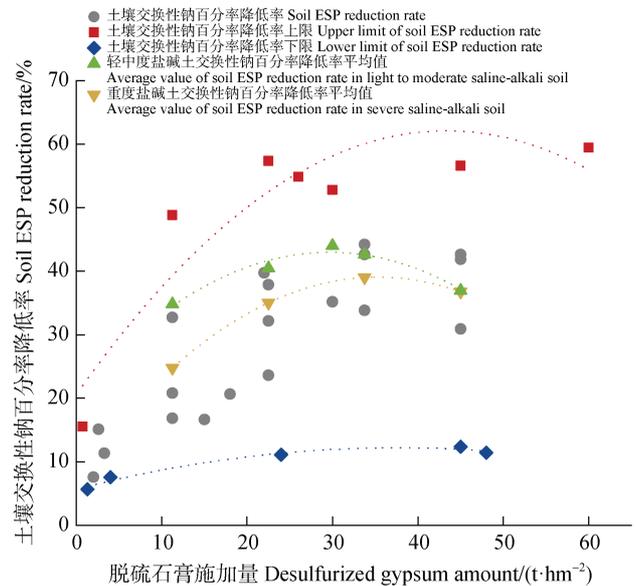


图 2 脱硫石膏施加量对土壤交换性钠百分率降低率的影响

Fig. 2 Effect of desulfurized gypsum amount on exchange sodium percentage reduction rate

依次对式 (9)~式 (12) 进行求一阶导数可得, 当脱硫石膏施加量为  $43.32 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, ESP 降低率上限存在最大值, 为 62.10%; 当脱硫石膏施加量为  $37.60 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, ESP 降低率下限存在最大值, 为 12.17%; 当脱硫石膏施加量为  $29.73 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 轻中度盐碱土 ESP 降低率平均值存在最大值, 为 42.99%; 当脱硫石膏施加量为  $35.32 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 重度盐碱土 ESP 降低率平均值存在最大值, 为 39.09%。

## 2.3 土壤盐分变化特征

土壤浸提液电导率 (EC) 常被用来表征土壤盐分含量, 两者呈正相关关系<sup>[30-31]</sup>。在数据收集过程中, 关于脱硫石膏对土壤盐分的影响研究均由 EC 计算, 故本研究利用 EC 的变化率来代表土壤盐分的变化率。若 EC 过大, 即土壤可溶性盐含量过高,

则导致土壤渗透势增大, 土壤水势降低, 植物根系吸收水分和养分困难。同时, 有毒的盐离子阻碍植物正常生长<sup>[32]</sup>。使用脱硫石膏改良盐碱土壤虽然会降低土壤的 pH 和 ESP, 但是不可避免地增加 EC, 过多地施加脱硫石膏反而会使土壤遭受盐害。以本文所述研究方法, 通过分析施加脱硫石膏的 EC ( $X_{EC}$ ), 并以未施加脱硫石膏的处理 ( $CK_{EC}$ ) 为基础, 计算施加脱硫石膏后 EC 变化率  $Y_{EC}$  (即  $Y_{EC} = \left( \frac{X_{EC}}{CK_{EC}} - 1 \right) \times 100\%$ ), 其中当  $Y_{EC}$  为负值时代表 EC 降低率; 为正值时代表 EC 增加率。图 3 显示了脱硫石膏施加量与 EC 变化率间的关系。因 EC 变化率在 11.25、15、22.5、30、45、60  $t \cdot hm^{-2}$  的脱硫石膏施加量下的出现频率较大, 所以以这 6 个施加量下的 EC 变化率计算平均值。由图 3 可知, 不同的初始土壤条件施加脱硫石膏后, EC 变化程度较为分散。EC 变化率的上限、下限以及轻中度和重度盐碱土 EC 变化率的平均值均随脱硫石膏施加量的增加呈线性增加趋势:

$$Y_{EC \text{ 上限}} = 9.070M + 106.920 \quad (n=6, R^2 = 0.93) \quad (13)$$

$$Y_{EC \text{ 下限}} = 0.797M - 21.573 \quad (n=8, R^2 = 0.24) \quad (14)$$

$$Y_{EC \text{ 轻中平均}} = 3.733M + 38.470 \quad (n=5, R^2 = 0.85) \quad (15)$$

$$Y_{EC \text{ 重平均}} = 4.977M + 76.642 \quad (n=19, R^2 = 0.77) \quad (16)$$

式中,  $Y_{EC \text{ 上限}}$ 、 $Y_{EC \text{ 下限}}$ 、 $Y_{EC \text{ 轻中平均}}$  和  $Y_{EC \text{ 重平均}}$  分别为指示作物收获后与未施加脱硫石膏的土壤相比, 施加脱硫石膏处理的 EC 变化率的上限、下限以及轻中度和重度盐碱土的 EC 变化率的平均值 (%),  $M$  为脱硫石膏施加量 ( $t \cdot hm^{-2}$ ),  $n$  为样本数。

#### 2.4 灰色关联综合分析脱硫石膏改良盐碱土壤的效果

随脱硫石膏施加量增加, 土壤 pH、ESP 和 EC 均发生变化。施加脱硫石膏虽会降低土壤的 pH 和 ESP, 但可能会增加 EC。因此要综合分析脱硫石膏施加量对土壤改良效果的影响, 不能仅追求降低土壤 pH 和 ESP, 必须考虑 EC 变化。为综合分析施加脱硫石膏改良盐碱土壤的效果, 利用土壤 pH、ESP 和 EC 变化情况进行分析, 并基于灰色关联度建立了以脱硫石膏施加量为自变量的盐碱

土壤综合改良评价模型, 确定合理的脱硫石膏施加量。

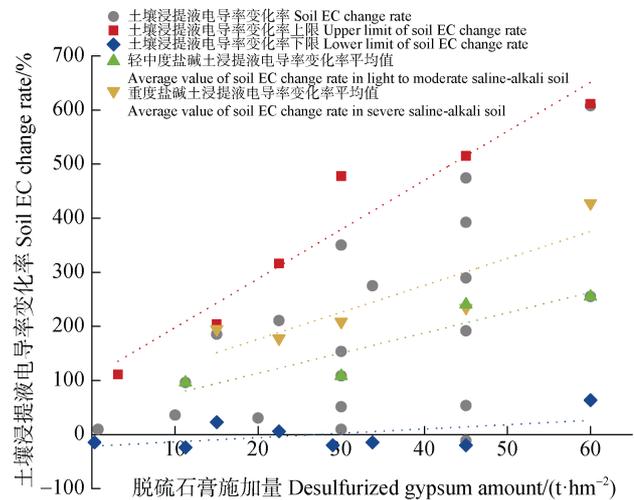


图 3 脱硫石膏施加量对土壤浸提液电导率变化率的影响  
Fig. 3 Effect of desulfurized gypsum amount on soil electrical conductivity change rate

因土壤 pH 降低率在 15、22.5、30、45、60  $t \cdot hm^{-2}$  的脱硫石膏施加量下出现频率较大; ESP 降低率在 11.25、22.5、30、33.75、45  $t \cdot hm^{-2}$  的脱硫石膏施加量下出现频率较大; EC 增加率在 11.25、15、22.5、30、45、60  $t \cdot hm^{-2}$  的脱硫石膏施加量下出现频率较大, 所以本文以 11.25、15、22.5、30、33.75、45、60  $t \cdot hm^{-2}$  的脱硫石膏施加量为代表点, 以式 (7)、式 (8)、式 (11)、式 (12)、式 (15) 和式 (16) 分别计算对应的轻中度和重度盐碱土壤的 pH 降低率、ESP 降低率和 EC 增加率, 此为比较向量。根据土壤 pH 降低率平均值的最大值、ESP 降低率平均值的最大值和 EC 增加率的最小值作为理想值构造参考向量。其中轻中度盐碱土的参考向量为  $T_{\text{轻中}} = \{8.26, 42.99, 0\}$ ; 重度盐碱土的参考向量为  $T_{\text{重}} = \{13.61, 39.09, 0\}$ 。依据式 (1) ~ 式 (3) 利用熵权法得到的各土壤指标的权重 (表 1), 然后依据式 (4) 计算比较向量与参考向量的熵权—灰色关联度 (图 4), 熵权—灰色关联度的大小表示比较向量与参考向量的接近程度, 其值越大表明土壤改良效果越理想。随脱硫石膏施加量的增加, 轻中度和重度盐碱土的熵权—灰色关联度呈先增大后减小的趋势, 其拟合方程为式 (17) 和式 (18)。分别对各拟合方程求一阶导数, 当脱硫石膏施加量为 20.00  $t \cdot hm^{-2}$  时, 轻中度盐碱土有最大的熵权—灰色关联度 0.75,

即该施加量的脱硫石膏对轻中度盐碱土改良效果较理想；当脱硫石膏施加量为 25.83 t·hm<sup>-2</sup>时，重度盐碱土有最大的熵权—灰色关联度 0.75，即该施加量的脱硫石膏对重度盐碱土改良效果较理想。

$$G_{\text{轻中}} = -9 \times 10^{-5} M^2 + 0.0036 M + 0.7130$$

$$(n=7, R^2 = 0.99, P < 0.001) \quad (17)$$

$$G_{\text{重}} = -6 \times 10^{-5} M^2 + 0.0031 M + 0.7135$$

$$(n=7, R^2 = 0.99, P < 0.001) \quad (18)$$

表 1 参评指标的信息熵冗余度和熵权权重

Table 1 Information entropy redundancy and entropy weight of evaluation index

	轻中度盐碱土			重度盐碱土		
	Light to moderate saline-alkali soil			Severe saline-alkali soil		
	pH	ESP	EC	pH	ESP	EC
信息熵冗余度	0.80	0.93	0.98	0.87	0.94	0.99
Information entropy redundancy						
熵权权重	0.30	0.34	0.36	0.31	0.34	0.35
Entropy weight						

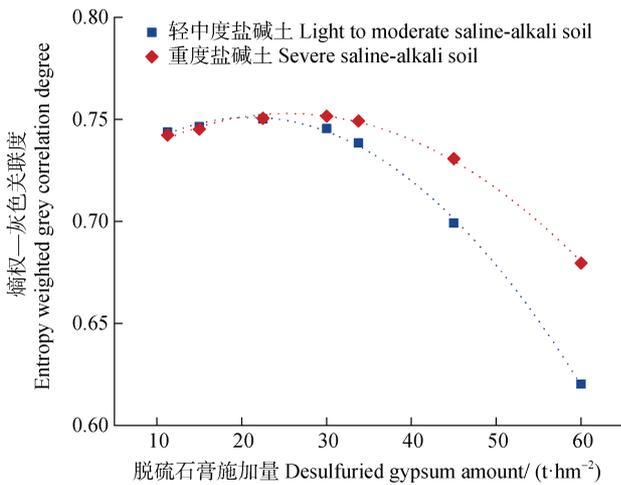


图 4 脱硫石膏施加量对熵权—灰色关联度的影响

Fig. 4 Effect of desulfurized gypsum amount on entropy-weighted grey correlation degree

式中， $G_{\text{轻中}}$ 和  $G_{\text{重}}$ 分别为轻中度和重度盐碱土情况下比较向量与参考向量的熵权—灰色关联度， $M$ 为脱硫石膏施加量 (t·hm<sup>-2</sup>)， $n$ 为样本数。

### 2.5 作物产量变化特征

合理施用脱硫石膏可降低盐碱土壤 pH 和 ESP，为作物提供了良好生长环境。因研究脱硫石膏改良轻度盐碱土对作物产量影响的相关文献较少，并且相关文献中脱硫石膏施加量梯度设置低于 3 个，故本研究分析在中度和重度盐碱土条件下，作物产量 (油葵、苜蓿、玉米、水稻、小麦、枸杞和甜高粱) 对脱硫石膏施加量的响应。通过文献中施加脱硫石

膏后的作物产量 ( $X_{\text{产量}}$ )，以未施加脱硫石膏的处理 ( $CK_{\text{产量}}$ ) 为基础，计算了施加脱硫石膏后作物产量的增加率  $Y_{\text{产量}}$  (即  $Y_{\text{产量}} = \left( \frac{X_{\text{产量}}}{CK_{\text{产量}}} - 1 \right) \times 100\%$ )，并将同一脱硫石膏施加量下相同作物的产量增加率的平均值作为待拟合点。由图 5 可知，在盐碱土壤中施加脱硫石膏可增加作物产量，作物产量增加率均随着脱硫石膏施加量的增加呈先增加后降低的趋势。利用二次函数拟合各作物产量增加率的平均值变化过程，结果如下：

$$Y_{\text{油葵}} = -0.202 M^2 + 12.238 M - 15.375$$

$$(n=12, R^2=0.91) \quad (19)$$

$$Y_{\text{苜蓿}} = -0.033 M^2 + 1.694 M + 35.853$$

$$(n=8, R^2=0.20) \quad (20)$$

$$Y_{\text{玉米}} = -0.372 M^2 + 17.741 M - 98.349$$

$$(n=8, R^2=0.87) \quad (21)$$

$$Y_{\text{水稻}} = -0.223 M^2 + 12.924 M - 98.981$$

$$(n=11, R^2=0.77) \quad (22)$$

$$Y_{\text{小麦}} = -0.018 M^2 + 1.069 M - 1.540$$

$$(n=5, R^2=0.77) \quad (23)$$

$$Y_{\text{枸杞}} = -0.038 M^2 + 1.774 M + 1.852$$

$$(n=6, R^2=0.60) \quad (24)$$

$$Y_{\text{甜高粱}} = -0.075 M^2 + 3.922 M + 9.653$$

$$(n=5, R^2=0.66) \quad (25)$$

式中,  $Y_{\text{油葵}}$ 、 $Y_{\text{苜蓿}}$ 、 $Y_{\text{玉米}}$ 、 $Y_{\text{水稻}}$ 、 $Y_{\text{小麦}}$ 、 $Y_{\text{枸杞}}$ 和  $Y_{\text{甜高粱}}$  分别为与未施加脱硫石膏的土壤相比, 油葵、苜蓿、玉米、水稻、小麦、枸杞和甜高粱的产量增加率的平均值(%),  $M$ 为脱硫石膏施加量( $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),  $n$ 为样本数。

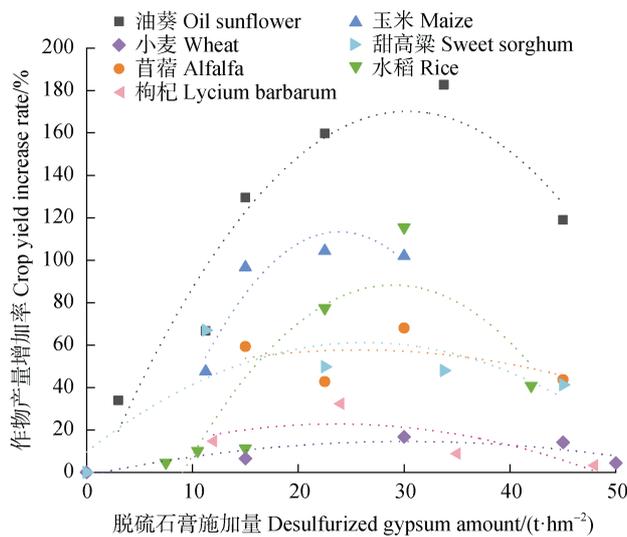


图5 脱硫石膏施加量对作物产量增加率的影响

Fig. 5 Effect of desulfurized gypsum amount on crop yield increase rate

对式(19)~式(25)求一阶导数可得: 脱硫石膏施加量为  $30.32 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 油葵产量增加率平均值的最大值为  $170.18\%$ ; 脱硫石膏施加量为  $25.78 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 苜蓿产量增加率平均值的最大值为  $57.68\%$ ; 脱硫石膏施加量为  $23.87 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 玉米产量增加率平均值的最大值为  $113.43\%$ ; 脱硫石膏施加量为  $28.99 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 水稻产量增加率平均值的最大值为  $88.33\%$ ; 脱硫石膏施加量为  $29.69 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 小麦产量增加率平均值的最大值为  $14.32\%$ ; 脱硫石膏施加量为  $23.65 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 枸杞产量增加率平均值的最大值为  $22.83\%$ ; 脱硫石膏施加量为  $26.28 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 甜高粱产量增加率平均值的最大值为  $61.19\%$ 。综上所述, 在中度或重度盐碱土条件下为获得作物高产, 脱硫石膏施加量不宜超过  $30 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

### 3 讨论

土壤 pH 在  $6.5\sim 7.5$  时的土壤养分有效性最高,

如土壤 pH 过高会导致土壤有机质含量降低、质地黏重、结构性差及板结, 通气性、透水性差, 土壤水、气、热不协调, 肥力降低, 导致植株某些元素营养失调<sup>[33-34]</sup>, 不利耕作和植物生长。土壤 pH 降低率并不与脱硫石膏施加量呈正相关关系<sup>[9, 12]</sup>。针对不同盐碱程度土壤, 大量研究认为脱硫石膏施加量为  $45 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  左右时, 可有效降低土壤 pH<sup>[14, 35-37]</sup>。此外, 从土壤 pH 降低率的上限、下限及轻中度和重度盐碱土壤 pH 降低率平均值对脱硫石膏的响应来看, 四者均随脱硫石膏施加量的增加呈先增加后减少趋势, 与前人研究结果一致。随脱硫石膏施加量增加, 轻中度盐碱土壤 pH 降低值较重度盐碱土先达到峰值, 并且轻中度盐碱土壤 pH 降低值的峰值小于重度盐碱土。这可能是由于在淋洗作用下, 轻中度盐碱土中可交换性  $\text{Na}^+$  含量少于重度盐碱土, 土壤 pH 较低, 施入等量脱硫石膏发生反应后土壤 pH 降低率达到峰值较快, 但是峰值低于重度盐碱土。在不同脱硫石膏施加量下, 土壤 pH 降低率的上限分别出现在文献[73, 75-76, 81, 89], 这可能是由于这些研究的初始土壤 pH 高于其他研究(除文献[81]外), pH 均大于 9.9, 且施加的脱硫石膏 pH 较低, 与初始土壤 pH 相差  $2\sim 4$ , 所以经改良后的土壤 pH 降低明显。同理, 本研究中土壤 pH 降低率下限的原因可能是初始土壤的碱化程度较轻(文献[55]), 或者是土壤初始 pH 较低(文献[85])(在本文所选文献中最低, 为 pH 8.3), 也可能是脱硫石膏的 pH 较高(文献[92])(pH 7.45), 导致土壤 pH 降低不明显。

从 ESP 降低率的上限、下限及轻中度和重度盐碱土 ESP 降低率平均值对脱硫石膏的响应来看, 过量施加脱硫石膏会削弱 ESP 的降低效果, 这与王金满等<sup>[10]</sup>、王笛等<sup>[13]</sup>和肖国举等<sup>[16]</sup>的研究结果一致。这可能是因为高施加量脱硫石膏也能增加离子代换速率<sup>[10]</sup>, 在土壤水分淋洗条件下,  $\text{Ca}^{2+}$  置换  $\text{Na}^+$  可能使土壤中  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  不断增多, 从而抑制了脱硫石膏的溶解<sup>[38]</sup>。针对不同盐碱程度的土壤, 有研究认为脱硫石膏合理的施加量为  $22.5\sim 33.75 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$  可有效降低 ESP<sup>[16, 39-40]</sup>。随着脱硫石膏施加量增加, 轻中度盐碱土 ESP 降低率较重度盐碱土先达到峰值, 其峰值略高于重度盐碱土, 这也可能是因为淋洗作用下土壤可交换性  $\text{Na}^+$  含量不同所导致的。在各个脱硫石膏施加量下, ESP 降低率的上限分别出现在

文献[59-61, 81], 这可能是因为与其他研究相比, 这些试验地的初始 ESP 较低(除文献[81]外), 为轻度或中度碱化, 即  $\text{Na}^+$  占阳离子交换量的百分率较低, 所以施加脱硫石膏后易得到较高的 ESP 降低率。而 ESP 降低率的下限出现在文献[60, 81-82], 这些试验地的初始 ESP 高于其他研究, 为重度碱化。施加同量的脱硫石膏后, ESP 降低不明显。文献[81]中土壤的初始 ESP 为 50.29%, 高于其他研究, 而脱硫石膏施加量较少(1.3、2、2.6、3.3 和 4  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 所以整体的 ESP 降低率均很小, 脱硫石膏施加量 1.3 和 4  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时得到的 ESP 降低率最小(5.66%和 7.54%), 2.6  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  施加量时得到的 ESP 降低率最大(15.09%)。

施加脱硫石膏对 EC 增加率的上限、下限及轻中度和重度盐碱土 EC 增加率平均值的影响均呈线性增加的趋势。李玉波等<sup>[12]</sup>、范定慷等<sup>[41]</sup>、庞喆和王启龙<sup>[42]</sup>也认为随脱硫石膏施加量的增加, EC 相应增加。在不同脱硫石膏施加量下, EC 增加率的上限分别出现在文献[54, 65, 73, 84, 86], 下限分别出现在文献[59, 63, 72, 76, 85, 92]。这可能是因为前者土壤的初始 EC (EC 值 0.25~0.65) 低于后者 (EC 值 0.66~4.36), 所以施加同量的脱硫石膏前者的 EC 增加率较大。本研究发现, EC 随着脱硫石膏施加量的增加而增加, 并且达到土壤 pH 和 ESP 降低率的峰值所需的脱硫石膏施加量不同。所以, 还需综合分析脱硫石膏对盐碱土的改良效果。

土壤 pH 和 ESP 常被用来评价盐碱土壤的碱化程度, 土壤盐分含量常被用来评价盐碱土壤的盐化程度。本研究采用熵权-灰色关联度的分析方法综合分析脱硫石膏对盐碱土壤 pH、ESP 和 EC 的改良效果, 结果发现其改良效果随着脱硫石膏施加量的增加逐渐变好。但当脱硫石膏施加量超过 20.00  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  后, 对轻中度盐碱土的改良效果逐渐变差; 超过 25.83  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  后, 对重盐碱土的改良效果逐渐变差。这可能是因为过量地施入脱硫石膏导致 EC 增加, 也可能是因为土壤 pH 和 ESP 的降低率逐渐减少造成的。在结合指示作物的生长生理情况对脱硫石膏改良盐碱土的反应来看, 轻中度盐碱土: 在西北地区(宁夏)的油葵试验中, 推荐适宜的脱硫石膏施用量为 11.25~22.5  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[16]</sup>。在华北地区(山西)以玉米和油葵为指示作物, 推荐的脱硫石膏最佳施用量为 22.5  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[17]</sup>。在东北地区(吉林)当脱硫

石膏施用量为 15  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时, 燕麦的各项生长指标达到理想状态, 土壤 pH 降低至植物生长的限制要求以内, EC 的增加幅度较小<sup>[35]</sup>。在滨海地区(浙江)施用 15  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  的脱硫石膏后土壤养分含量最高, 水稻增产效果最好<sup>[43]</sup>。重度盐碱土: 在西北地区(宁夏和新疆)的枸杞、水稻和棉花试验中, 分别施用 24、31.5 和 30  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  的脱硫石膏改良效果显著, 并且提高作物产量和品质<sup>[16, 44-45]</sup>。在华北地区(山西)考虑到油葵产量的经济效益, 在重度盐碱土上尤其是交换性钠百分率较高的碱化土上, 最佳脱硫石膏施用量为 30  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[17]</sup>。在东北地区(吉林)根据脱硫石膏施用量与葵花出苗率、产量的模拟曲线关系, 测得利用脱硫石膏改良苏打碱化土壤的最佳施用量约为 30  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ <sup>[37, 46]</sup>。沈婧丽等<sup>[47]</sup>综合脱硫石膏改良后土壤的物理性质、化学性质、生物性质和作物生长特点, 推荐脱硫石膏适宜用量为 22.5~37.5  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本研究认为, 作物产量(油葵、苜蓿、玉米、水稻、小麦、枸杞和甜高粱)随着脱硫石膏施加量的增加呈先增加后降低的趋势。在中度或重度盐碱土施加脱硫石膏超过 30  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 作物产量有减少趋势。从本研究建立的熵权-灰色关联模型来看, 在轻中度盐碱土条件下脱硫石膏施加量为 18~22  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时的熵权-灰色关联度与最大熵权-灰色关联度 0.75 相差精度不超过 1%; 重度盐碱土脱硫石膏施加量为 23~29  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  时的熵权-灰色关联度与最大熵权-灰色关联度 0.75 相差精度不超过 1%, 这两种情况下脱硫石膏施加量均未超过土壤 pH 和 ESP 降低率拐点对应的脱硫石膏施加量, 均可有效降低土壤的 pH 和 ESP, 并且 EC 增加率较低, 获得较高的作物产量。因此这两种情况下脱硫石膏的施加量可作为改良轻中度和重度盐碱土的脱硫石膏推荐施加量。

脱硫石膏作为常用的盐碱土壤改良剂, 因含有一定量的重金属元素, 其在农业应用中的环境安全性备受关注。王淑娟等<sup>[48]</sup>通过土柱淋滤试验研究探讨施加 0~37.5  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$  的脱硫石膏 60 d 后对重度碱化土壤中铅、镉、铬、砷和汞含量分布的影响, 结果表明在 0~80 cm 土层中铅、镉、铬、砷和汞含量均符合 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(铅 < 170  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 镉 < 0.6  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 铬 < 250  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 砷 < 25  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 汞 < 3.4  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 在连续多年的大田试验研究中也得

到相同结论<sup>[49-50]</sup>。在农产品质量安全方面, Wang 和 Yang<sup>[51]</sup>通过文献调研指出, 施用脱硫石膏对大豆、玉米和马铃薯等 8 种农产品中重金属含量的积累无影响。综合分析本文所收集文献中脱硫石膏的铅(0.29~15.73 mg·kg<sup>-1</sup>)、镉(0.01~0.08 mg·kg<sup>-1</sup>)、铬(0.47~23.21 mg·kg<sup>-1</sup>)、砷(0.04~6.38 mg·kg<sup>-1</sup>)和汞(0.05~2.32 mg·kg<sup>-1</sup>)含量, 均符合国家标准 GB 15618—2018 的相应要求; 对比不同施加量的脱硫石膏对土壤重金属含量的影响, 结果表明脱硫石膏的施加量介于 15~45 t·hm<sup>-2</sup>时, 土壤中铅(0.15~25.85 mg·kg<sup>-1</sup>)、镉(0.01~0.33 mg·kg<sup>-1</sup>)、铬(0.16~98.29 mg·kg<sup>-1</sup>)、砷(0.09~16.82 mg·kg<sup>-1</sup>)和汞(0.02~0.19 mg·kg<sup>-1</sup>)含量均符合国家标准 GB 15618—2018 的相应要求。已有研究表明<sup>[50-52]</sup>, 施用重金属含量低于国家标准 GB 15618—2018 相应要求的脱硫石膏改良盐碱地, 不会造成土壤重金属污染。因此, 在生产实践中应明确脱硫石膏中重金属浓度, 据此确定脱硫石膏是否可用于改良盐碱地及改良盐碱地时的施用量。

综合统计分析表明, 目前以施加脱硫石膏对土壤 pH 的变化量为定量指标, 来评价脱硫石膏改良盐碱土效果的研究居多, 并且关于脱硫石膏改良盐碱土壤的研究大多是施加脱硫石膏后 1 年内的试验结果, 仅有少量研究开展了两年及以上的试验研究。施用脱硫石膏改良盐碱土的效果及其经济效益存在年际差异, 因此建议应延长研究年限并进行连续观测, 进一步探明施用脱硫石膏对盐碱土壤的 pH、ESP、盐分和重金属元素含量等指标的影响<sup>[53]</sup>, 并综合分析其对作物产量、品质、水肥利用效率及经济效益的影响, 以更加全面地评价施用脱硫石膏对盐碱土改良的功效及重金属污染的风险, 从而科学推荐脱硫石膏施加量。

## 4 结 论

通过收集不同脱硫石膏施加量(0~60 t·hm<sup>-2</sup>)对盐碱土壤改良效果的文献资料, 经统计分析和数学建模得出以下结论: (1) 施加脱硫石膏改良轻中度和重度盐碱土, 降低了土壤 pH 和 ESP, 但可能会增加 EC。(2) 土壤 pH 降低率和 ESP 降低率及作物产量(油葵、苜蓿、玉米、水稻、小麦、枸杞和甜高粱)增加率随脱硫石膏施加量的增加呈先增加

后减少的趋势, 而 EC 的增加率随脱硫石膏施加量的增加呈增加趋势。在中度或重度盐碱土为获得作物高产, 脱硫石膏施加量不宜超过 30 t·hm<sup>-2</sup>。(3) 以土壤 pH、ESP 和 EC 为参评指标, 利用灰色关联分析法和熵权法分析脱硫石膏对盐碱土壤改良的效果, 建立了以脱硫石膏施加量为自变量的盐碱土壤改良评价模型。轻中度盐碱土推荐的脱硫石膏施加量为 18~22 t·hm<sup>-2</sup>; 重度盐碱土推荐的脱硫石膏施加量为 23~29 t·hm<sup>-2</sup>。

## 参考文献 (References)

- [1] Qu Z Y, Sun H H, Yang B, et al. Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing tomato in saline alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 311—318, 350. [屈忠义, 孙慧慧, 杨博, 等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 311—318, 350.]
- [2] Tian C Y, Mai W X, Zhao Z Y. Study on key technologies of ecological management of saline alkali land in arid area of Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7064—7068. [田长彦, 买文选, 赵振勇. 新疆干旱区盐碱地生态治理关键技术研究[J]. 生态学报, 2016, 36(22): 7064—7068.]
- [3] Liu C J, Li Q S, Li X J. Utilization of different tillage models for improvement of soda-alkaline glebe in Songnen Plain [J]. Agricultural Research in the Arid Area, 2005, 23(5): 13—16.
- [4] Suarez D L, Wood J D, Lesch S M. Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 150—164.
- [5] Mahmoud E, El-Beshbeshy T, El-Kader N A, et al. Impacts of biochar application on soil fertility, plant nutrients uptake and maize (*Zea mays* L.) yield in saline sodic soil[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(23): 1—9.
- [6] Soda N, Ephrath J E, Dag A, et al. Root growth dynamics of olive (*Olea europaea* L.) affected by irrigation induced salinity[J]. Plant and Soil, 2017, 411(1): 305—318.
- [7] Wang S J, Liu J, Li Y, et al. Research and application of key technologies for improving saline alkali land by using desulfurization gypsum from coal-fired power plants[Z]. Beijing: Tsinghua University, 2018-04-03. [王淑娟, 刘嘉, 李彦, 等. 利用燃煤电厂脱硫石膏改良盐碱地关键技术研究与应用[Z]. 北京: 清华大学, 2018-04-03.]
- [8] Wang Y G, Wang Z F, Liang F, et al. Application of flue gas desulfurization gypsum improves multiple functions of saline-sodic soils across China[J]. Chemosphere,

- 2021, 277: 130345.
- [ 9 ] Xu Q T, Li Y B. Study on the application amount of desulfurization gypsum to improve alkaline soil[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41 ( 2 ): 341—343. [许清涛, 李玉波. 脱硫石膏改良碱化土壤的施用量研究[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41 ( 2 ): 341—343.]
- [ 10 ] Wang J M, Yang P L, Zhang J G, et al. Salinity effect on sunflower at seedling stage during improving sodic soils reclaimed with by-product from flue gas desulphurization ( BFGD ) [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21 ( 9 ): 33—37. [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.]
- [ 11 ] Wei S Z, Zhang W H, Yue Y P. Study on improve effect of desulfuration gypsum on saline-alkali soil[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2017, 45 ( 2 ): 58—62. [魏淑贞, 张伟华, 岳殷萍. 脱硫石膏对盐碱土改良效果研究[J]. *北方农业学报*, 2017, 45 ( 2 ): 58—62.]
- [ 12 ] Li Y B, Xu Q T, Gao B, et al. Effects of desulfurized gypsum on the growth of alfalfa in saline-alkali soil [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43 ( 3 ): 188—190. [李玉波, 许清涛, 高标, 等. 脱硫石膏改良盐碱地对紫花苜蓿生长的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2015, 43 ( 3 ): 188—190.]
- [ 13 ] Wang D, Li D, Han D C, et al. Effect of desulfurized gypsum on planting sweet sorghum in improved saline-alkali land[J]. *Agriculture & Technology*, 2021, 41 ( 18 ): 44—48. [王笛, 李达, 韩东辰, 等. 脱硫石膏对改良盐碱地种植甜高粱的影响[J]. *农业与技术*, 2021, 41 ( 18 ): 44—48.]
- [ 14 ] Jiang T X, Chen H, Zhang Y L, et al. Safety evaluation of different application rates of desulfurization gypsum on saline-alkali land improvement[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56 ( 3 ): 438—445. [姜同轩, 陈虹, 张玉龙, 等. 脱硫石膏不同施用量对盐碱地改良安全性评价[J]. *新疆农业科学*, 2019, 56 ( 3 ): 438—445.]
- [ 15 ] Liu W Z, Wang Z Q, Hseung Y. Delimitation of salit-affected soils for reclamation and utilization in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1978, 15 ( 2 ): 101—112. [刘文政, 王遵亲, 熊毅. 我国盐渍土改良利用分区[J]. *土壤学报*, 1978, 15 ( 2 ): 101—112.]
- [ 16 ] Xiao G J, Luo C K, Zhang F J, et al. Application amount of desulfurized gypsum from coal fired power plants on improving the quality of alkalized soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23 ( 6 ): 762—767. [肖国举, 罗成科, 张峰举, 等. 燃煤电厂脱硫石膏改良碱化土壤的施用量[J]. *环境科学研究*, 2010, 23 ( 6 ): 762—767.]
- [ 17 ] Wang L Z, Chen M C, Zhang Q, et al. Effects of desulfurised gypsum form coal power station on improvement of saline-alkali soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 ( 20 ): 241—245. [王立志, 陈明昌, 张强, 等. 脱硫石膏及改良盐碱地效果研究[J]. *中国农学通报*, 2011, 27 ( 20 ): 241—245.]
- [ 18 ] Li X G, Cao J, Li F M. Influence of salinity, sodicity and organic matter on some physical properties of salt-affected soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35 ( 1 ): 64—72. [李小刚, 曹靖, 李凤民. 盐化及钠质化对土壤物理性质的影响[J]. *土壤通报*, 2004, 35 ( 1 ): 64—72.]
- [ 19 ] Li M Z, Zhang W C, Wang S J, et al. Suitable application of flue gas desulfurized gypsum to improve the sunflower yield in saline-alkali soil in the Hetao irrigation areas of Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38 ( 6 ): 89—95 [李明珠, 张文超, 王淑娟, 等. 适宜脱硫石膏施用方式改良河套灌区盐碱土提高向日葵产量[J]. *农业工程学报*, 2022, 38 ( 6 ): 89—95]
- [ 20 ] Yang J, Sun Z J, Liu J L, 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. [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.]
- [ 21 ] Ning S R, Zhou B B, Wang Q J, et al. Evaluation of irrigation water salinity and leaching fraction on the water productivity for crops[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2020, 13 ( 1 ): 170—177.
- [ 22 ] Liu S F, Fang Z G, Lin Y. Study on a new definition of degree of grey incidence[J]. *Journal of Grey System*, 2006, 9: 115—122.
- [ 23 ] Pan X F, Li J M, Shen Z Y, et al. Life cycle identification of China's regional innovation systems based on entropy weight disturbing attribute model[J]. *Habitat International*, 2023, 131: 102725.
- [ 24 ] Deng J L. Properties of relational space for grey systems [M]. Beijing: China Ocean Press, 1988: 1—13.
- [ 25 ] L ü F. Research on the identification coefficient of relational grade for grey system[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 1997 ( 6 ): 49—54. [吕锋. 灰色系统关联度之分辨系数的研究[J]. *系统工程理论与实践*, 1997 ( 6 ): 49—54.]
- [ 26 ] Wang W W, Shi S Z, Sui D Z, et al. Effects of soil improvement measures on total salt content and pH of coastal saline-alkali soil[J]. *Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology*, 2017, 44 ( 6 ): 17—20. [王伟伟, 施士争, 隋德宗, 等. 改土措施对滨海盐碱地土壤总盐含量和pH的影响[J]. *江苏林业科技*, 2017, 44 ( 6 ): 17—20.]

- [ 27 ] Tao X N, Liu D, Taorinigung, et al. Application of desulfurization gypsum in agriculture and soil improvement[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, 46 ( 3 ): 89—92. [陶晓娜, 刘丹, 桃日尼棍, 等. 脱硫石膏在农业生产和土壤改良中的应用[J]. 北方农业学报, 2018, 46 ( 3 ): 89—92.]
- [ 28 ] Cui F J, Wang Z G, Li M, et al. Effects of different fertilization methods on soil characteristics in saline-alkali land[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46 ( 26 ): 116—119. [崔凤娟, 王振国, 李默, 等. 不同施肥方式对盐碱地土壤特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46 ( 26 ): 116—119.]
- [ 29 ] Luo Y, Kang R H, Yu D X, et al. Study on short-term remediation effect of desulfurization gypsum on acidified forest soil[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2012, 33 ( 6 ): 2006—2012. [罗遥, 康荣华, 余德祥, 等. 脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究[J]. 环境科学, 2012, 33 ( 6 ): 2006—2012.]
- [ 30 ] Feng C H, Liu X L, Ji W J, et al. Research on spatio-temporal heterogeneity of soil electrical conductivity in cotton field based on electromagnetic induction technology[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 ( 4 ): 999—1011. [冯春晖, 刘新路, 纪文君, 等. 基于电磁感应技术的棉田土壤电导率时空异质性研究[J]. 土壤学报, 2022, 59 ( 4 ): 999—1011.]
- [ 31 ] Liu X L, Peng J, Feng C H, et al. Inversion model for soil conductivity in cotton field in South Xinjiang based on EM38-MK2 data[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 ( 3 ): 646—655. [刘新路, 彭杰, 冯春晖, 等. 基于电磁感应仪数据的南疆棉田土壤电导率反演模型研究[J]. 土壤学报, 2020, 57 ( 3 ): 646—655.]
- [ 32 ] Huo G W, Wu Y N, Song Y T, et al. Variation characteristics of soil water-soluble salts on different degraded gradients in the typical steppe[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2015, 17 ( 5 ): 445—448. [霍光伟, 乌云娜, 宋彦涛, 等. 典型草原退化梯度上土壤水溶性盐分的变化特征[J]. 大连民族学院学报, 2015, 17 ( 5 ): 445—448.]
- [ 33 ] Zhao J, Shen X, Li X, et al. Correlation between soil pH and the contents of available nutrients in selected soils from three pear orchards in Wendeng[J]. Northern Horticulture, 2009 ( 11 ): 5—8. [赵静, 沈向, 李欣, 等. 梨园土壤 pH 值与其有效养分相关性分析[J]. 北方园艺, 2009 ( 11 ): 5—8.]
- [ 34 ] Chen C C, Xiao B, Yu Y B, et al. Spatial variability of soil organic matter and pH and the correlation to available nutrients in the tea garden of southern Shaanxi[J]. Journal of Northwest A & F University ( Natural Science Edition ), 2009, 37 ( 1 ): 182—188. [陈婵婵, 肖斌, 余有本, 等. 陕南茶园土壤有机质和 pH 值空间变异及其与速效养分的相关性[J]. 西北农林科技大学学报 ( 自然科学版 ), 2009, 37 ( 1 ): 182—188.]
- [ 35 ] Li Y B, Xu Q T, Li G S. Research on the effect of oat growth by using desulfurized gypsum and mildly improving alkaline soil[J]. Journal of Baicheng Normal University, 2018, 32 ( 10 ): 1—5. [李玉波, 许清涛, 李广帅. 脱硫石膏改良轻度碱化土壤对燕麦生长的影响研究[J]. 白城师范学院学报, 2018, 32 ( 10 ): 1—5.]
- [ 36 ] He K, Li X P, Xu C, et al. Remediation efficiency of flue gas desulfurization gypsum on coastal saline alkali soil[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31 ( 3 ): 547—554. [贺坤, 李小平, 徐晨, 等. 烟气脱硫石膏对滨海盐渍土的改良效果[J]. 环境科学研究, 2018, 31 ( 3 ): 547—554.]
- [ 37 ] Xu Q T, Li Y B, Li X D. Optimal application rate of desulfurized gypsum in ameliorating soils moderate in sodic salinity[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32 ( 6 ): 126—130. [许清涛, 李玉波, 李晓东. 脱硫石膏改良碱化土壤试验研究——以白城市为例[J]. 中国农机化, 2011, 32 ( 6 ): 126—130.]
- [ 38 ] Cui Y, Zhang Q, Wang B, et al. Effect of desulfurized gypsum on leaching of major ions in heavy soda saline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 ( 1 ): 310—314. [崔媛, 张强, 王斌, 等. 脱硫石膏对重度苏打盐化土中主要离子淋洗的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30 ( 1 ): 310—314.]
- [ 39 ] Chen J, Wang W F. Improvement effect of desulfurization gypsum on saline-alkali land under drip irrigation condition in Gansu Province[J]. Water Saving Irrigation, 2018 ( 5 ): 35—38. [陈建, 王文芬. 滴灌条件下脱硫石膏对甘肃盐碱地的改良效果研究[J]. 节水灌溉, 2018 ( 5 ): 35—38.]
- [ 40 ] Juan W C, Zhang S L, Duan K X. Study on improvement mechanism of desulphurization gypsum for saline—alkali soil in Bianwan Farm, Jiuquan City[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58 ( 1 ): 49—52, 78. [隗伟超, 张松林, 段凯祥, 等. 酒泉市边湾农场盐碱化土壤的脱硫石膏改良机理研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58 ( 1 ): 49—52, 78.]
- [ 41 ] Fan D K, Wang Y L, Zhang Q, et al. Improvement effect of different sulfur bearing material on saline-alkali soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45 ( 5 ): 786—790. [范定慷, 王永亮, 张强, 等. 不同含硫物料对盐碱地的改良效果[J]. 山西农业科学, 2017, 45 ( 5 ): 786—790.]
- [ 42 ] Pang Z, Wang Q L. Effect of desulfurization gypsum and water retaining agent PAM on physicochemical properties and crop growth of saline-alkali soil[J]. Land Development and Engineering Research, 2018 ( 10 ): 35—40. [庞喆, 王启龙. 脱硫石膏与保水剂 PAM 对盐碱土理化性质和作物生长的影响研究[J]. 土地开发工程研究, 2018 ( 10 ): 35—40.]
- [ 43 ] Zhu Y, Fu Q L, Guo B, et al. Effects of humic acid and desulfurized gypsum on coastal saline soil and rice

- yield[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63 (6): 1139—1143. [朱芸, 傅庆林, 郭彬, 等. 腐殖酸和脱硫石膏对滨海盐土及水稻产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63 (6): 1139—1143.]
- [ 44 ] Liu D Y, Huang C, Liu J, et al. Effects of different depths of flue gas desulfurization gypsum on the improvement of saline-alkaline soil[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2017, 40 (4): 301—307. [刘东洋, 黄超, 刘娟, 等. 脱硫石膏不同施用深度对盐碱土壤改良效果的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2017, 40 (4): 301—307.]
- [ 45 ] Wang J, Xu X, Xiao G J, et al. Effect of typical takyr solonchaks reclamation with flue gas desulphurization gypsum and its security assessment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (2): 141—147. [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.]
- [ 46 ] Xing X Q, Zhang W H, Yu J J. Effects on growth of sunflower (*Helianthus annuus* L.) by application rates of desulfurized gypsum in amelioration of saline-alkali soil[J]. Journal of Anshan Normal University, 2013, 15 (2): 58—61. [邢秀芹, 张为华, 于静娟. 脱硫石膏的施用量对盐碱地葵花生长的影响[J]. 鞍山师范学院学报, 2013, 15 (2): 58—61.]
- [ 47 ] Shen J L, Wang B, Xu X. Review on research of using desulfurized gypsum to ameliorate saline-sodic soil[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2016, 37 (1): 65—69. [沈婧丽, 王彬, 许兴. 脱硫石膏改良盐碱地研究进展[J]. 农业科学研究, 2016, 37 (1): 65—69.]
- [ 48 ] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Experimental investigation on distribution profiles of heavy metals in the desulfurization gypsum amended saline and sodic soils[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22 (5): 851—856. [王淑娟, 陈群, 李彦, 等. 重金属在燃煤烟气脱硫石膏改良盐碱土壤中迁移的实验研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22 (5): 851—856.]
- [ 49 ] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Sustainable effects of gypsum from desulphurization of flue gas on the reclamation of sodic soil after 17 years[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70: 1082—1097.
- [ 50 ] Li Y, Zhang F J, Wang S J, et al. Environmental impact on alkali soil amelioration using FGD gypsum[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2010, 12 (6): 86—89. [李彦, 张峰举, 王淑娟, 等. 脱硫石膏改良碱化土壤对土壤重金属环境的影响[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12 (6): 86—89.]
- [ 51 ] Wang J M, Yang P L. Potential flue gas desulfurization gypsum utilization in agriculture: A comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 1969—1978.
- [ 52 ] Li L J, Zhang Q, Liu P, et al. Survey and analysis of heavy metals in FGD gypsum from coal-fired power plants[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (2): 209—214. [李丽君, 张强, 刘平, 等. 火电厂烟气脱硫石膏重金属含量监测与分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29 (2): 209—214.]
- [ 53 ] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, 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. [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.]
- [ 54 ] Wang Q, Men L Z, Gao L H, et al. Effect of grafting and gypsum application on cucumber (*Cucumis sativus* L.) growth under saline water irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2017, 188: 79—90.
- [ 55 ] 李玉波, 许清涛, 李广帅. 脱硫石膏改良轻度碱化土壤对燕麦生长的影响研究 [J]. 白城师范学院学报, 2018, 32 (10): 1—5.
- [ 56 ] 刘祖香, 陈效民, 李孝良, 等. 不同改良剂与石膏配施对滨海盐渍土离子组成的影响[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35 (3): 83—88.
- [ 57 ] 沈婧丽, 王彬, 田小萍, 等. 不同改良模式对盐碱地土壤理化性质及苜蓿产量的影响 [J]. 河南农业科学, 2016, 45 (6): 45—50.
- [ 58 ] Cao Y E, Gao Y M, Li J S, et al. Straw composts, gypsum and their mixtures enhance tomato yields under continuous saline water irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2019, 223: 105721.
- [ 59 ] 贺坤, 李小平, 徐晨, 等. 烟气脱硫石膏对滨海盐渍土的改良效果[J]. 环境科学研究, 2018, 31 (3): 547—554.
- [ 60 ] 肖国举, 罗成科, 张峰举, 等. 燃煤电厂脱硫石膏改良碱化土壤的施用量[J]. 环境科学研究, 2010, 23 (6): 762—767.
- [ 61 ] 陈建, 王文芬. 滴灌条件下脱硫石膏对甘肃盐碱地的改良效果研究 [J]. 节水灌溉, 2018 (5): 35—38.
- [ 62 ] 邹璐, 范秀华, 孙兆军, 等. 盐碱土施用脱硫石膏对土壤养分及油菜光合特性的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18 (4): 575—581.
- [ 63 ] 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 等. 秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质[J]. 环境科学, 2023, 44 (7): 4119—4129.
- [ 64 ] 张伶俐, 陈广锋, 田晓红, 等. 盐碱土石膏与有机物料组合对作物产量与籽粒养分含量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33 (12): 12—17.
- [ 65 ] 范定慷, 王永亮, 张强, 等. 不同含硫物料对盐碱土的改良效果 [J]. 山西农业科学, 2017, 45 (5): 786—790.
- [ 66 ] 朱芸, 傅庆林, 郭彬, 等. 腐殖酸和脱硫石膏对滨海盐土及水稻产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63 (6): 1139—1143.
- [ 67 ] 张玉勤. 脱硫废弃物对碱化土壤枸杞生长及果实品质

- 的影响研究[J]. 现代农业科技, 2010(24): 270—272, 274.
- [ 68 ] 郝登桂. 河套地区盐碱土油葵种植综合改良技术模式应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2019(15): 10, 12.
- [ 69 ] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 不同改良剂对河套灌区土壤盐碱指标及作物产量的影响研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1172—1179.
- [ 70 ] 张慧齐, 姜丽芳. 施脱硫石膏量和种植密度对玉米产量及相关性状的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(8): 1118—1122.
- [ 71 ] 隗伟超, 张松林, 段凯祥, 等. 酒泉市边湾农场盐碱化土壤的脱硫石膏改良机理研究 [J]. 湖北农业科学, 2019, 58(1): 49—52.
- [ 72 ] 许清涛, 李玉波. 脱硫石膏改良碱化土壤的施用量研究 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41(2): 341—343.
- [ 73 ] 李玉波, 许清涛, 高标, 等. 脱硫石膏改良盐碱地对紫花苜蓿生长的影响 [J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 188—190.
- [ 74 ] 王笛, 李达, 韩东辰, 等. 脱硫石膏对改良盐碱地种植甜高粱的影响 [J]. 农业与技术, 2021, 41(18): 44—48.
- [ 75 ] 邢秀芹, 张为华, 于静娟. 脱硫石膏的施用量对盐碱地葵花生长的影响 [J]. 鞍山师范学院学报, 2013, 15(2): 58—61.
- [ 76 ] 许清涛, 李玉波, 李晓东. 脱硫石膏改良碱化土壤试验研究——以白城市为例 [J]. 中国农机化, 2011(6): 126—130.
- [ 77 ] 周宾. 添加脱硫石膏对苏打盐碱土理化性质及水稻产量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(3): 386—390.
- [ 78 ] 张三粉, 妥德宝, 狄彩霞, 等. 河套灌区碱化耕地施用脱硫石膏的改土增产效果 [J]. 内蒙古农业科技, 2013(4): 60—61.
- [ 79 ] 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[J]. *Geoderma*, 2019, 352: 13—21.
- [ 80 ] Wang S J, Chen Q, Li Y, et al. Research on saline-alkali soil amelioration with FGD gypsum[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 121: 82—92.
- [ 81 ] 马玉露, 马金慧, 贾桂华, 等. 机械混匀盐碱土配施不同物料对土壤碱化特征的影响 [J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2021, 36(6): 476—483.
- [ 82 ] 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): 2315—2320.
- [ 83 ] 吕建东, 马帅国, 田蓉蓉, 等. 脱硫石膏改良盐碱土对水稻产量及其相关性状的影响 [J]. 河南农业科学, 2018, 47(12): 20—27.
- [ 84 ] 王立志, 陈明昌, 张强, 等. 脱硫石膏及改良盐碱地效果研究 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(20): 241—245.
- [ 85 ] 唐珖, 张强, 王斌, 等. 脱硫石膏改良重度苏打盐碱土的环境效应 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 317—321.
- [ 86 ] 庞喆, 王启龙. 脱硫石膏与保水剂 PAM 对盐碱土理化性质和作物生长的影响研究 [J]. 土地开发工程研究, 2018, 3(10): 35—40.
- [ 87 ] 贺坤, 李小平, 章炫耀, 等. 烟气脱硫石膏对崇明滨海盐碱地理化性质及早稻生长的影响 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(6): 1381—1386.
- [ 88 ] 房宸, 苏德荣, 端韞文, 等. 脱硫石膏与灌溉耦合对滨海盐碱土化学性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 59—63.
- [ 89 ] 姜同轩, 陈虹, 张玉龙, 等. 脱硫石膏不同施用量对盐碱地改良安全性评价 [J]. 新疆农业科学, 2019, 56(3): 438—445.
- [ 90 ] 刘东洋, 黄超, 刘娟, 等. 脱硫石膏不同施用深度对盐碱土壤改良效果的影响 [J]. 新疆农业大学学报, 2017, 40(4): 301—307.
- [ 91 ] 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.
- [ 92 ] 石婧, 黄超, 刘娟, 等. 脱硫石膏不同施用量对新疆盐碱土壤改良效果及作物产量的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(6): 1800—1807.
- [ 93 ] 李玉波, 许清涛. 脱硫石膏对苏打盐碱土旱田的改良效果研究[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1): 249—252.
- [ 94 ] 隋世江, 张海楼, 陈从斌. 脱硫石膏与硫酸亚铁配施对苏打盐碱水田的改良效果[J]. 辽宁农业科学, 2022(2): 79—81.
- [ 95 ] 杜雅仙, 黄菊莹, 康扬眉, 等. 脱硫石膏与结构改良剂配合施用对龟裂碱土理化性状和水稻生长的影响 [J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 46—51, 57.
- [ 96 ] 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.
- [ 97 ] 杜雅仙, 马凯博, 康扬眉, 等. 脱硫石膏与结构改良剂配合施用对盐碱土土壤的改良和枸杞生长的影响 [J]. 北方园艺, 2018(21): 129—135.
- [ 98 ] 秦萍, 肖国举, 罗成科, 等. 燃煤电厂脱硫石膏改良碱化土壤种植甜高粱的施用量研究[J]. 现代农业科学, 2008(12): 32—35.
- [ 99 ] 曲英杰. 不同改良材料对滨海粘质盐土水盐特性影响 [D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2021.
- [ 100 ] 郑普山, 郝保平, 冯悦晨, 等. 不同盐碱地改良剂对土壤理化性质、紫花苜蓿生长及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1216—1221.
- [ 101 ] 吴保庆, 郭洪海. 烟气脱硫石膏对盐胁迫下紫花苜蓿生理的影响[J]. 山东农业科学, 2008(2): 45—47.

(责任编辑: 檀满枝)

## 附 录

附表 1 收集的文献实测数据及其地区分布

数据类型	地区	样本数	文献序号	数据类型	地区	样本数	文献序号		
土壤 pH	北京	2	[54]	土壤浸提液电导率	北京	2	[54]		
	甘肃	10	[61, 71]		吉林	13	[72-73, 76]		
	吉林	30	[55, 72-77]		江苏	2	[56]		
	江苏	2	[56]		内蒙古	2	[79]		
	内蒙古	21	[78-81]		山东	2	[63]		
	宁夏	14	[57-58, 62, 82-83]		山西	16	[65, 84-85]		
	山东	4	[63-64]		陕西	4	[86]		
	山西	17	[65, 84-85]		上海	5	[59]		
	陕西	4	[86]		新疆	6	[90, 92]		
	上海	7	[59, 87]		作物产量	吉林	18	[73, 75, 93-94]	
	天津	3	[88]			内蒙古	11	[68-69, 76]	
	新疆	12	[89-92]			宁夏	27	[60, 67, 78, 95-98]	
	浙江	5	[66]			山东	2	[99]	
	土壤交换性钠百分率	甘肃	10			[61, 71]	山西	6	[70, 100]
		内蒙古	8			[79, 81]	新疆	4	[92]
宁夏		18	[60, 82]	浙江	5	[66]			
	上海	5	[59]						