

腐殖酸添加对土壤盐碱障碍消减与产能提升影响的 Meta 分析^①

邓鹏志¹, 张楷龙¹, 陈猛猛¹, 冯文豪¹, 杨 龙², 周 馨³, 张怀志^{1*}, 李玉义¹

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100081; 3 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100081)

摘 要: 腐殖酸作为常用的盐碱土改良材料, 其不同用量、施用方式对不同盐碱化程度的土壤改良效果差异较大。本研究通过收集国内外近 10 年(2012—2023 年)共计 43 篇相关文献研究成果, 采用 Meta 分析方法, 探究了不同腐殖酸施用量(低量、中量、高量)和施用方式(单独施用、与其他改良剂混施)对不同程度(轻度、中度、重度)盐碱土的改良效应。结果表明: 与不施用腐殖酸相比, 施用腐殖酸显著降低盐碱土的 pH, 降幅为 3.22%~3.80%, 且增加土壤 Ca²⁺ 含量, 增幅达 11.43%~50.46%。不同腐殖酸施用量下土壤 Mg²⁺ 含量总体增加 8.15%~28.52%。施用中高量腐殖酸降低了土壤 Na⁺ 和 Cl⁻ 含量, 降幅分别为 11.50%~11.59% 和 14.16%~18.73%。在腐殖酸施用方式上, 单施和混施对轻度和重度盐碱土的改良效果差异不大, 对中度盐碱土的改良效果混施优于单施, 且混施的不同改良剂之间的协同作用能进一步提升盐碱土改良效果。腐殖酸用量对盐碱土的改良效果受土壤盐碱程度的影响。在轻度盐碱土中, 为提高作用产量可以适当添加低量腐殖酸(≤600 kg/hm²); 在中度盐碱土中, 施用高量腐殖酸(≥1 800 kg/hm²)有利于调节土壤盐分的同时提高作物产量; 然而, 在重度盐碱土中, 可能存在分阶段改良的需要, 前期施用中量腐殖酸(600~1 800 kg/hm²)实现降盐目的, 降盐后施用高量腐殖酸进一步提高产能。本研究为确定腐殖酸适宜的用量范围和施用方式提供了参考依据, 对我国盐碱土壤改良与分类治理提供了重要理论支撑。

关键词: 腐殖酸; 盐碱土; 土壤盐基离子; 产量; Meta 分析

中图分类号: S156.4+9 文献标志码: A

Effects of Humic Acid on Improvement of Saline-Alkali Soil and Crop Yield: A Meta-Analysis

DENG Pengzhi¹, ZHANG Kailong¹, CHEN Mengmeng¹, FENG Wenhao¹, YANG Long², ZHOU Xin³, ZHANG Huaizhi^{1*}, LI Yuyi¹

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 College of Land Sciences and Technology, China Agricultural University, Beijing 100081, China; 3 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100081, China)

Abstract: Organic fertilizers with humic acid as the main component are widely used materials for improving saline-alkali soils. However, the improvement effects vary significantly with different application rates and methods under different degrees of salinization. In this study we collected 43 relevant research findings from the past decade (2012—2023), explored the effects of different humic acid application rates (low, medium, high) and application methods (alone, mixed with other amendments) on saline-alkali soil with different salinized degrees (low, medium, high). The results showed that, compared with not applying humic acid, applying humic acid significantly reduced pH value by 3.22%–3.80% of saline-alkali soil, increased the content of Ca²⁺ by 11.43%–50.46%. Soil Mg²⁺ content rose by 8.15%–28.52% overall at different humic acid application rates. The application of medium and high amounts of humic acid reduced soil Na⁺ and Cl⁻ contents by 11.5%–11.59% and 14.16%–18.73%, respectively. In terms of humic acid application methods, the effects of humic acid application alone and combined application were not significantly different in low and high saline-alkali soils, while the effect of humic acid application combined with other amendments was better than that of single application in middle saline-alkali soil, and the synergistic effect between different amendments further promote the improvement effect. The effect of humic acid

①基金项目: 华北平原耕地盐碱退化阻控和肥力恢复关键技术及集成示范项目 (NK2022180406, NK20221804)资助。

* 通信作者(zhanghuaizhi@caas.cn)

作者简介: 邓鹏志(2000—), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良研究。E-mail: ccleikesi@126.com

dosage on saline-alkali soil improvement was affected by saline-alkali degree. Low amount of humic acid ($\leq 600 \text{ kg/hm}^2$) could be added to improve yield in low saline-alkali soil, high amount of humic acid ($\geq 1\ 800 \text{ kg/hm}^2$) could be applied to reduce salt ions and increase yield in middle saline-alkali soil. However, for the high saline-alkali soil, the improvement should be divided into two stages, in the early stage, the application of medium amount of humic acid ($600\text{--}1\ 800 \text{ kg/hm}^2$) has the best salt ion reduction effect, and the application of high amount of humic acid after salinization control in the later stage can further improve the productivity. This study provides a theoretical basis for determining the appropriate dosage range and application mode of humic acid and provides important theoretical support for the improvement and comprehensive utilization of saline-alkali soil.

Key words: Humic acid; Saline-alkali soil; Soil salt ion; Yield; Meta analysis

据估计,全球有 25% 的灌溉土壤由于盐分过多而降低了作物产量^[1]。我国盐碱土面积广大,约 34 万 km^2 ,是我国重要的后备耕地资源^[2]。盐碱土对农业生产的负效应主要是由于电导率、钠吸附比和交换性钠含量较高^[3],对土壤生物活性和理化性质产生负面影响^[4]。大量研究表明,过量的盐离子和碱性环境易造成氮肥挥发损失^[5],同时由于竞争性吸附机制,过多的 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 K^+ 也会降低其他元素的有效性^[6-7],并降低作物对氮磷的吸收效率^[7],导致作物养分失调。土壤电导率过高还会导致土壤板结、通气透水性降低等结构性障碍,不利于作物根系发育^[7-8]。此外,高盐度和高 pH 环境会降低土壤微生物丰度以及多种酶活性;交换性钠过高导致土壤胶体分散、团聚结构破坏、渗透性降低,抑制微生物活性,加剧植物逆境胁迫^[7,9]。通过适宜措施科学改良盐碱地,推进盐碱地治理利用,有利于保障我国的后备耕地资源,促进农业可持续发展。

针对盐碱土的理化性质,前人已经提出了包括化学措施、水利措施、物理措施和生物措施在内的多种改良方法,主要通过降低土壤胶体中交换性 Na^+ 的含量和土壤表层累积的可溶性盐,促进盐分淋洗排出以及抑制土壤返盐等机制,达到排盐降碱的目的^[10-11]。现有的许多改良措施中,施用改良剂得益于见效速度较快、经济效益较高的优势得到了较为广泛的应用^[12]。常用的化学改良剂较多,主要包括含钙物质(脱硫石膏等)、酸性物质(硫酸、硫磺等)和有机改良剂(腐殖质类物质、工业合成物质等)^[13]。各种改良材料的改良机理也略有不同。其中,腐殖酸作为重要的有机改良剂在许多领域得到了广泛应用^[14-15]。腐殖酸作为一类具有复杂芳香结构的有机大分子,其理化性质由羧基、酚羟基等活性官能团主导。腐殖酸独特的胶体特性与高阳离子交换能力可有效螯合盐碱土中的 Na^+ ,同时能够改善土壤孔隙结构,调节土壤渗透性^[16-17]。近年来,大量研究表明,增施腐殖酸可以促进作物生

长,提高作物产量和品质^[18]。在盐碱土改良方面,适当施用腐殖酸有利于改善土壤肥力^[19],增加大团聚体数量,改善土壤结构,从而促进盐分淋洗,降低土壤 pH 和总盐度^[20]。此外,腐殖酸具有良好的吸附和络合作用,是理想的肥料增效材料^[21]。尽管国内外诸多研究证实腐殖酸对消减土壤盐碱障碍、提高作物适生性具有积极作用,但是由于盐碱土的类型丰富多样,不同的腐殖酸添加量和添加方式在改良盐碱土化学性质方面存在较大差异。因此,明确腐殖酸在不同盐碱环境下的改良效果对于科学施用腐殖酸具有重要意义。基于此,本研究通过收集国内外已发表的研究成果,利用 Meta 分析方法定量分析了腐殖酸施用量和施用方式对盐碱土化学性质的影响,以期土壤盐碱障碍消减以及地力提升提供理论依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源及筛选

本研究收集整理了近 10 年(2012—2023 年)的文献数据,外文文献来源于 Web of Science 数据库(<https://www.webofscience.com/wos/>),中文文献来自中国知网数据库(<https://www.cnki.net/>)。文献检索的英文关键词包括“humic acid”“humus”“sodium huminate”“alkali soil”“saline”“agriculture”“agronomy”“farming”等及其不同组合,中文关键词包括“腐殖酸”“盐碱”“土壤改良”等及其组合,共检索到英文文献 49 篇,中文文献 49 篇,总计 98 篇文献。在此基础上,设置数据筛选条件:①同一试验需要包含配对的盐碱障碍下不施用腐殖酸和施用腐殖酸处理(单独施用或配合其他调理剂混合施用);②试验处理至少有 3 个重复;③试验需测定土壤理化性质等指标。最终,筛选得到 43 篇文献,其中英文文献 16 篇,中文文献 27 篇,数据库样本分布如表 1 所示。

表 1 施用腐殖酸对盐碱土改良效果数据库样本分布
Table 1 Sample distributions of database on effect of humic acid application on saline soil

| 指标 | 总样本量 | 腐殖酸施用方式 | | 腐殖酸施用量 | | | 盐碱化程度 | | |
|------------------|------|---------|----|--------|----|----|-------|----|----|
| | | 单施 | 混施 | 低量 | 中量 | 高量 | 轻度 | 中度 | 重度 |
| 产量 | 261 | 45 | 42 | 32 | 20 | 35 | 12 | 34 | 41 |
| pH | 306 | 23 | 79 | 20 | 18 | 64 | 7 | 53 | 42 |
| Ca ²⁺ | 150 | 12 | 38 | 15 | 14 | 21 | 7 | 19 | 24 |
| Mg ²⁺ | 147 | 11 | 38 | 15 | 14 | 20 | 7 | 18 | 24 |
| Na ⁺ | 255 | 23 | 62 | 18 | 20 | 47 | 7 | 43 | 35 |
| Cl ⁻ | 192 | 19 | 45 | 8 | 19 | 37 | 3 | 32 | 29 |
| EC | 240 | 27 | 53 | 17 | 10 | 53 | 12 | 51 | 17 |

1.2 数据分类及分组

本研究收集的文献选择的试验区域、作物类型以及研究方法不同,腐殖酸在不同环境条件下对盐碱土的改良效果有所差异。为探究腐殖酸施用量和施用方式对盐碱土改良效果的影响及其作用机理,本研究对已收集的数据进行分组,结果如表 2 所示。按腐殖酸施用量分为:低量($\leq 600 \text{ kg/hm}^2$)、中量($600\sim 1\ 800 \text{ kg/hm}^2$)和高量($\geq 1\ 800 \text{ kg/hm}^2$);按施用方式分为:单施和混施(多种外源添加剂混合施用)。

由于许多研究缺乏碱化度等数据,本研究根据 Stavi 等^[22]、Metternicht 等^[23]以及文献[24-26]的方法,利用土壤盐碱程度对作物生长的影响,按照 EC 和 pH,将试验区域土壤的盐碱程度分为轻度(pH 7~8, EC 2~4 dS/m)、中度(pH 8~8.5, EC 4~8 dS/m)和重度(pH >8.5, EC >8 dS/m)。此外,在 pH 和 EC 的基础上,分析水溶性盐含量(Na⁺、Cl⁻、Ca²⁺、Mg²⁺)和作物产量的变化,以评估添加腐殖酸对土壤盐碱障碍的改良效果。

表 2 数据分类依据
Table 2 Basis of data classification

| 分类依据 | 亚组 | 指标 |
|---------|----|----------------------------------|
| 腐殖酸施用量 | 低量 | $\leq 600 \text{ kg/hm}^2$ |
| | 中量 | $600\sim 1\ 800 \text{ kg/hm}^2$ |
| | 高量 | $\geq 1\ 800 \text{ kg/hm}^2$ |
| 腐殖酸施用方式 | 单施 | |
| | 混施 | |
| 土壤盐碱程度 | 轻度 | pH 7~8, EC 2~4 dS/m |
| | 中度 | pH 8~8.5, EC 4~8 dS/m |
| | 重度 | pH>8.5, EC>8 dS/m |

注:土壤盐碱程度参考《盐碱地土壤专题调查实施方案》(国土壤普查办发〔2023〕31号)中第三次全国土壤普查土壤盐渍度分类分级标准。若试验地 pH 和 EC 划分的盐碱程度不同,主要依据 EC 进行盐碱程度划分。

1.3 数据处理及分析

对筛选后的文献资料进行整理,提取文献中施用和未施用腐殖酸处理下盐碱土的相关化学性质指标,包括 pH、EC 以及盐基离子含量,如各指标的平均值、样本数和标准差(SD)。若文献中未提供 SD 时,采用平均值除以样本量的平方根的方法近似估计 SD^[27](式(1));若文献中仅提供标准误(SE)时,则根据公式(2)将其转换为 SD^[28]。文献中以表格和文字描述形式出现的试验数据直接获取,其他图形数据通过 GetData Graph Digitizer 2.24 软件来获取。获取的数据导入 MetaWin 2.1 平台进行分析。

$$SE = X / n^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$SD = SE \times n^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中:SD 为标准差;X 为未提供标准差的平均值;n 为样本数;SE 为标准误。

本研究采用合并计数资料的响应比(response ratios, RR)来反映腐殖酸用量和施用方式对盐碱土改良效果的影响程度。RR 通过式(3)计算获得。利用随机效应模型计算效应值(lnRR)、效应值平均值的变异系数 V 和加权综合效应值 lnRR₊₊。具体计算公式如下:

$$RR = X_t / X_c \quad (3)$$

$$\ln RR = \frac{\ln X_t}{\ln X_c} \quad (4)$$

$$V = \frac{SD_t^2}{n_t X_t^2} + \frac{SD_c^2}{n_c X_c^2} \quad (5)$$

$$w_i = 1/V \quad (6)$$

$$\ln RR_{++} = \frac{\sum(\ln RR_i \cdot w_i)}{\sum w_i} \quad (7)$$

式中:RR 为响应比;lnRR 为效应值;SD_t、n_t、X_t 分别为处理组(施用腐殖酸)的标准差、样本数和均值;

SD_c 、 n_c 、 X_c 分别为对照组(不施用腐殖酸)的标准差、样本数和均值; $\ln RR_{++}$ 为加权后的综合效应值; $\ln RR_i$ 和 w_i 分别为第 i 对数据对的效应值和权重。

加权综合效应值 $\ln RR_{++}$ 的标准差($S_{\ln RR_{++}}$)和 95% 置信区间(95%CI)计算公式如下:

$$S_{\ln RR_{++}} = \left(\frac{1}{\sum w_i^2} \right) \quad (8)$$

$$95\%CI = \ln RR_{++} \pm 1.96 \cdot S_{\ln RR_{++}} \quad (9)$$

为直观地反映施用腐殖酸对盐碱障碍的改良效果, 按如下公式计算各指标的变化率, 并采用 GraphPad Prism 9 软件进行绘图。

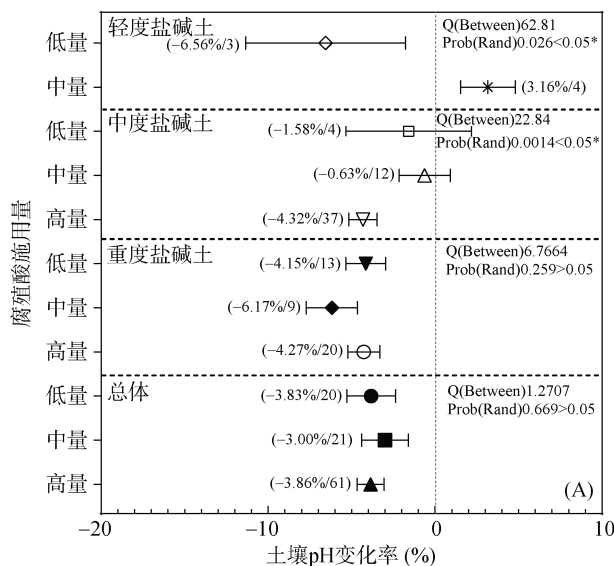
$$S = [e^{\ln RR_{++}} - 1] \times 100\% \quad (10)$$

式中: S 为施用腐殖酸处理相对于未施用腐殖酸处理各指标的变化率。在结果分析中, 以横坐标零点为界, 若 S 的 95% 置信区间包含 0, 则认为施用腐殖酸对盐碱土该指标无显著影响; 若 S 的 95% 置信区间均位于 0 的右侧, 即 95% 的 S 均大于 0 ($P < 0.05$), 则施用腐殖酸对该指标呈现明显的促进作用; 若 S 的 95% 置信区间均位于 0 的左侧, 即 95% 的 S 均小于 0 ($P < 0.05$), 则施用腐殖酸对该指标呈现明显的抑制作用。

2 结果与分析

2.1 腐殖酸改良剂对不同程度盐碱土 pH 的影响

不同盐碱程度下, 腐殖酸施用量对土壤 pH 的影

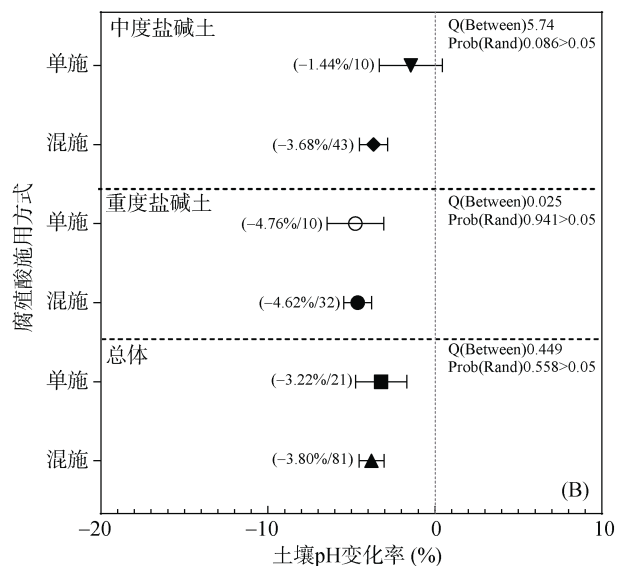


响如图 1A 所示。结果表明, 在不同盐碱程度土壤中, 不同腐殖酸施用量的效果存在差异。其中, 在轻度盐碱土中, 施用低量腐殖酸土壤 pH 平均降低 6.56%; 在中度盐碱土中, 施用低量、中量和高量腐殖酸土壤 pH 分别降低 1.58%、0.63% 和 4.32%; 在重度盐碱土中, 施用低量、中量和高量腐殖酸土壤 pH 分别降低 4.15%、6.17% 和 4.27%。值得注意的是, 在轻度盐碱土中施用高量腐殖酸土壤 pH 增加 3.16%; 而在中度盐碱土中施用高量腐殖酸、在重度盐碱土中施用中量腐殖酸对土壤 pH 的降低效果更显著。总体来看, 施用低量、中量和高量腐殖酸可使土壤 pH 平均分别降低 3.83%、3.00% 和 3.86%。

不同盐碱程度下, 腐殖酸施用方式对土壤 pH 的影响如图 1B 所示。在轻度盐碱土中, 由于有效数据不足, 不满足统计分析样本量最低要求, 因此不做分析。在中度、重度盐碱土中, 腐殖酸单施、混施均能降低土壤 pH, 单施时 pH 降幅为 1.44%~4.76%, 混施时 pH 降幅为 3.68%~4.62%。总体来看, 在盐碱土中, 单施腐殖酸土壤 pH 降低 3.22%, 混施腐殖酸土壤 pH 降低 3.80%。

2.2 腐殖酸改良剂对不同程度盐碱土离子含量的影响

如图 2A 所示, 施用腐殖酸对土壤 EC 有显著影响。在轻度盐碱土中, 施用低量和高量腐殖酸, 土壤 EC 分别增加 28.8% 和降低 75.99%; 在中度盐碱土中, 施用低量、中量和高量腐殖酸土壤 EC 变化率分别为 -20.44%、6.87% 和 5.41%; 在重度盐碱土中,



(图中误差线表示 95% 置信区间; Q(Between)表示组间异质性; Prob(Rand)表示组间异质性检验的显著程度; 括号内数据为指标变化率 (%) / 样本量; 下同)

图 1 腐殖酸施用量及施用方式对不同程度盐碱土 pH 的影响

Fig. 1 Effects of humic acid application amount and method on pH values of different saline degree soils

施用低量、中量和高量腐殖酸土壤 EC 均有所降低, 降幅分别为 7.64%、34.18% 和 69.27%。总体来看, 施用低量、中量和高量腐殖酸土壤 EC 的变化率分别为 6.15%、-6.55% 和 -10.64%。

不同盐碱程度下, 腐殖酸施用方式对土壤 EC 的影响如图 2B 所示。总体来看, 单施腐殖酸土壤 EC

平均降低 17.45%, 其中, 在中度和重度盐碱土中土壤 EC 分别降低 20.41% 和 30.57%, 在轻度盐碱土中土壤 EC 增加 18.61%。腐殖酸混施对土壤 EC 的改良效果因盐碱程度而异, 其中, 在轻度、重度盐碱土中 EC 分别降低 23.70% 和 57.60%, 在中度盐碱土中 EC 升高 11.55%, 整体上平均降低 0.82%。

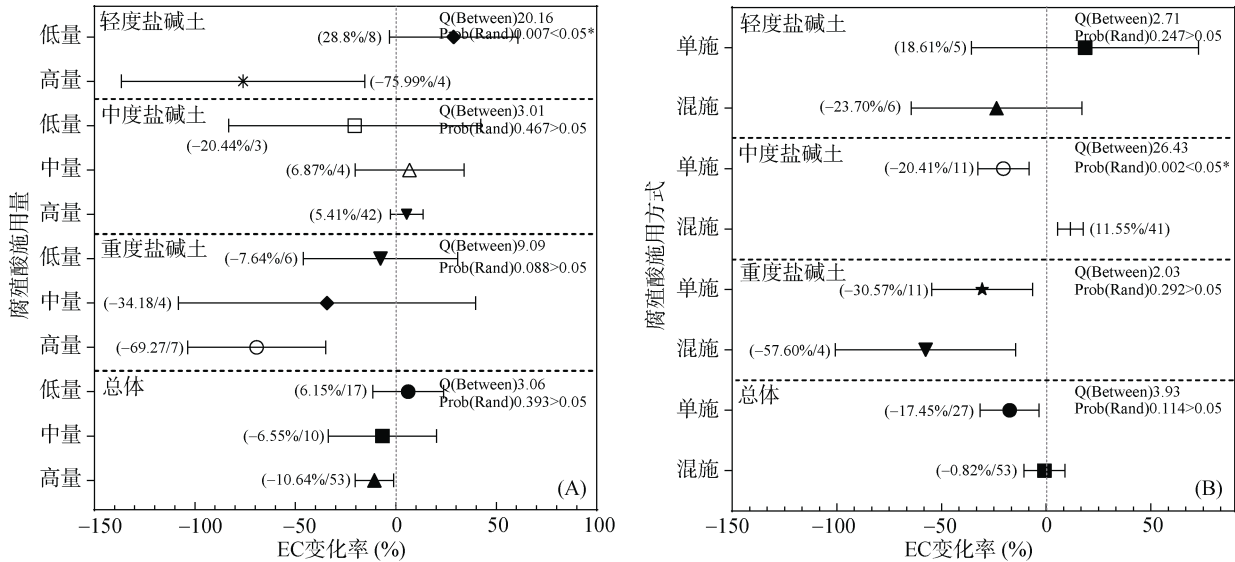


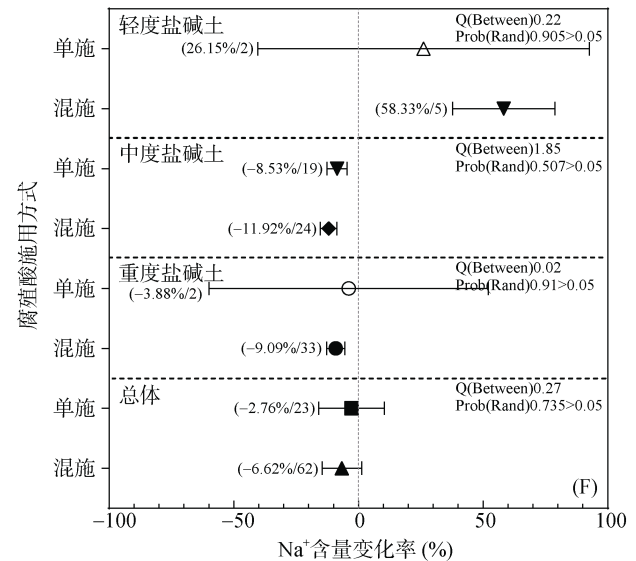
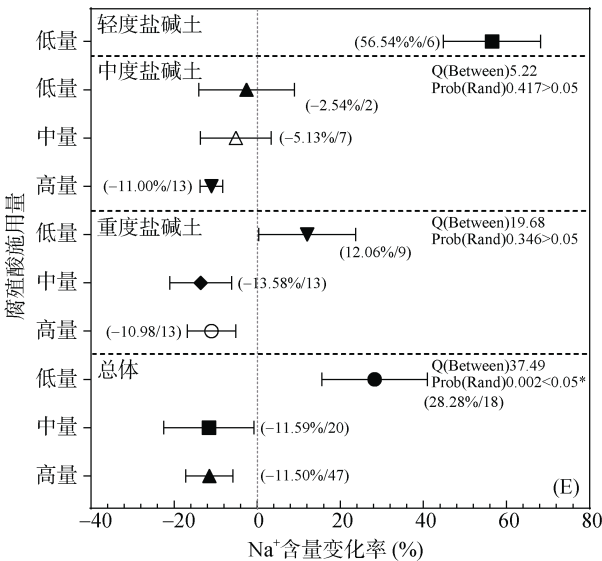
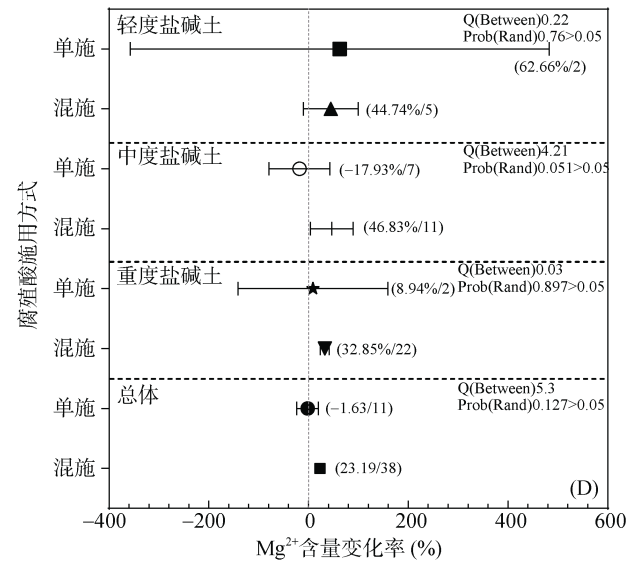
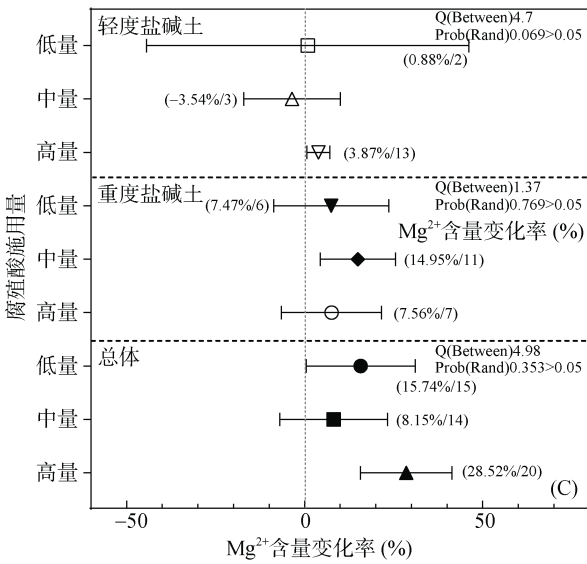
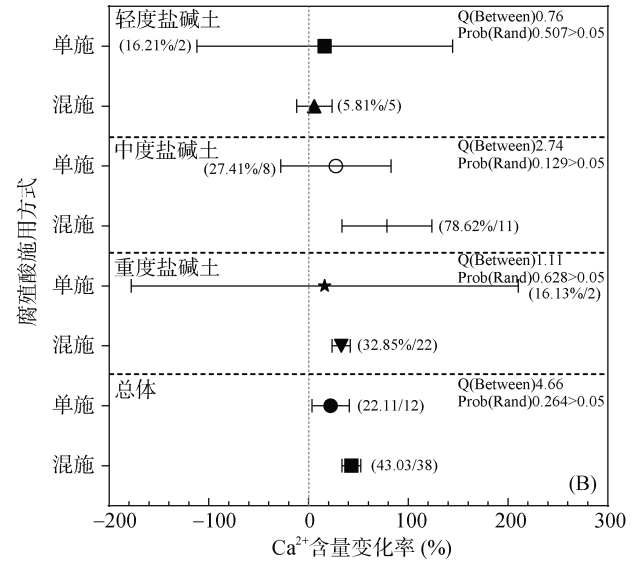
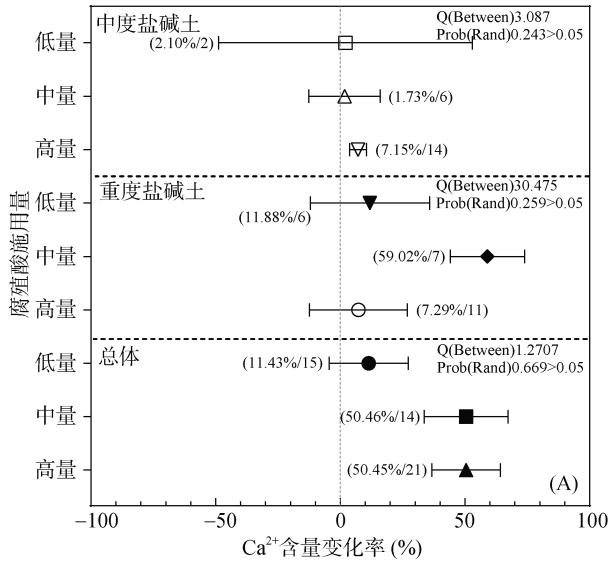
图 2 腐殖酸施用量及施用方式对不同程度盐碱土 EC 的影响
Fig. 2 Effects of humic acid application amount and method on ECs of different saline degree soils

在轻度盐碱土中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 在不同腐殖酸用量下的有效数据不足, 不满足统计分析样本量最低要求, 故未做分析。如图 3A 所示, 施用腐殖酸盐碱土 Ca^{2+} 含量总体上有所增加。其中, 施用低、中、高量腐殖酸土壤 Ca^{2+} 含量分别增加 11.43%、50.46% 和 50.45%。在中度和重度盐碱土中, 施用低、中、高量腐殖酸土壤 Ca^{2+} 含量变化率分别为 1.73%~7.15% 和 7.29%~59.02%。在施用方式方面, 如图 3B 所示, 混施腐殖酸总体上比单施腐殖酸的 Ca^{2+} 含量增幅更高, 分别增加 43.03% 和 22.11%, 其中在中度和重度盐碱土中混施腐殖酸 Ca^{2+} 含量分别增加 78.62% 和 32.85%, 单施腐殖酸 Ca^{2+} 含量分别增加 27.41% 和 16.13%。在轻度盐碱土中, 单施和混施腐殖酸 Ca^{2+} 含量分别增加 16.21% 和 5.81%。

总体上, 在盐碱土中施用腐殖酸后 Mg^{2+} 含量增加, 施用低、中、高量腐殖酸土壤 Mg^{2+} 含量分别增加 15.74%、8.15% 和 28.52%(图 3C)。但重度盐碱中土壤 Mg^{2+} 含量增幅高于中度盐碱土中, 施用低、中、高量腐殖酸重度盐碱中 Mg^{2+} 含量分别增加 7.47%、14.95% 和 7.56%, 中度盐碱土中分别增加 0.88%、-3.54% 和 3.87%。这表明, 重度盐碱土中施用中量腐殖酸和重度盐碱土中施用高量腐殖酸 Mg^{2+} 含量增

加更显著。在施用方式方面, 如图 3D 所示, 除了轻度盐碱土中单施腐殖酸土壤 Mg^{2+} 含量增幅略高于混施腐殖酸, 分别为 62.66% 和 44.74%, 总体上, 混施腐殖酸土壤 Mg^{2+} 含量增幅高于单施腐殖酸, 分别为 23.19% 和 -1.63%, 其中, 在中度盐碱土中单施和混施腐殖酸后土壤 Mg^{2+} 含量变化率为 -17.93% 和 46.83%, 在重度盐碱土中相应的变化率为 8.94% 和 32.85%。

施用腐殖酸后土壤 Na^+ 含量变化与腐殖酸用量有显著相关性(图 3E)。总体上, 施用中量和高量腐殖酸后, 土壤 Na^+ 含量均有一定程度降低, 其变化率分别为 -11.59% 和 11.50%。在中度盐碱土中, 施用中量和高量腐殖酸后土壤 Na^+ 含量分别降低 5.13% 和 11.00%; 在重度盐碱土中, 则分别降低 13.58% 和 10.98%。在轻度、中度和重度盐碱土中施用低量腐殖酸土壤 Na^+ 含量变化率分别为 56.54%、-2.54% 和 12.06%。如图 3F 所示, 除在轻度盐碱土外, 单施和混施腐殖酸后土壤 Na^+ 含量均有所降低, 总体上分别降低 2.76% 和 6.62%, 其中在中度盐碱土中分别降低 8.53% 和 11.92%, 在重度盐碱土中分别降低 3.88% 和 9.09%。在轻度盐碱土中, 单施和混施腐殖酸后土壤 Na^+ 含量分别增加 26.15% 和 58.33%。



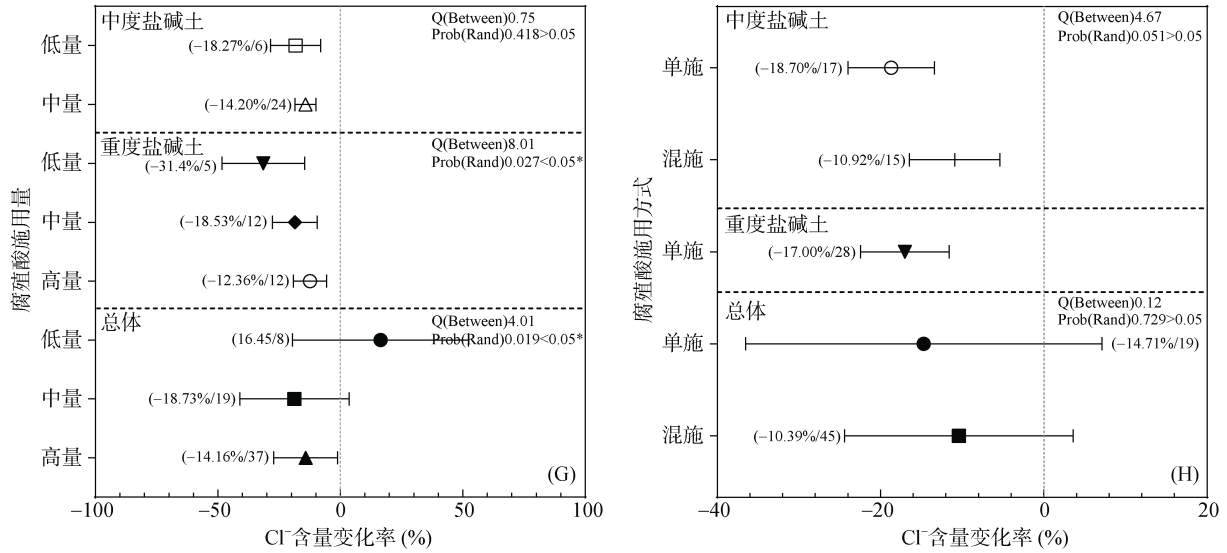


图 3 腐殖酸施用量及施用方式对不同程度盐碱土离子的影响

Fig. 3 Effects of humic acid application amount and method on ion contents of different saline degree soils

如图 3G 所示, 总体上, 施用中、高量腐殖酸后, 土壤 Cl⁻ 含量均有所降低, 分别降低 18.73% 和 14.16%。其中, 中度和重度盐碱土中 Cl⁻ 含量降幅分别为 14.20%~18.27% 和 12.36%~31.4%。在施用方式方面, 如图 3H 所示, 单施腐殖酸和混施腐殖酸均降低土壤 Cl⁻ 含量。总体上, 单施和混施腐殖酸 Cl⁻ 含量分别降低 14.71% 和 10.39%。其中, 中度盐碱土中单施和混施腐殖酸土壤 Cl⁻ 含量分别降低 18.70% 和 10.92%, 重度盐碱土中混施腐殖酸土壤 Cl⁻ 含量降低 17.00%。

2.3 腐殖酸改良剂对不同程度盐碱土作物产量的影响

如图 4A 所示, 施用腐殖酸后盐碱土中作物产量

有所增加。总体上, 施用低量、中量和高量腐殖酸后作物产量分别增加 19.27%、20.53% 和 30.80%。其中, 轻度盐碱土中施用低量腐殖酸后产量增加 17.30%; 中度盐碱土中腐殖酸施用量与产量呈正相关, 施用低量、中量和高量腐殖酸后产量分别增加 16.99%、28.81% 和 40.71%; 重度盐碱土中施用低量、中量和高量腐殖酸后产量分别增加 19.41%、4.37% 和 32.79%。

在施用方式方面, 如图 4B 所示, 总体上, 单施腐殖酸作物产量增幅略高于混施腐殖酸, 分别增加 26.09% 和 22.29%。其中, 中度盐碱土中单施和混施腐殖酸产量分别增加 32.57% 和 15.60%; 轻度、重度盐碱土中腐殖酸混施的增产效果优于单施, 单施产

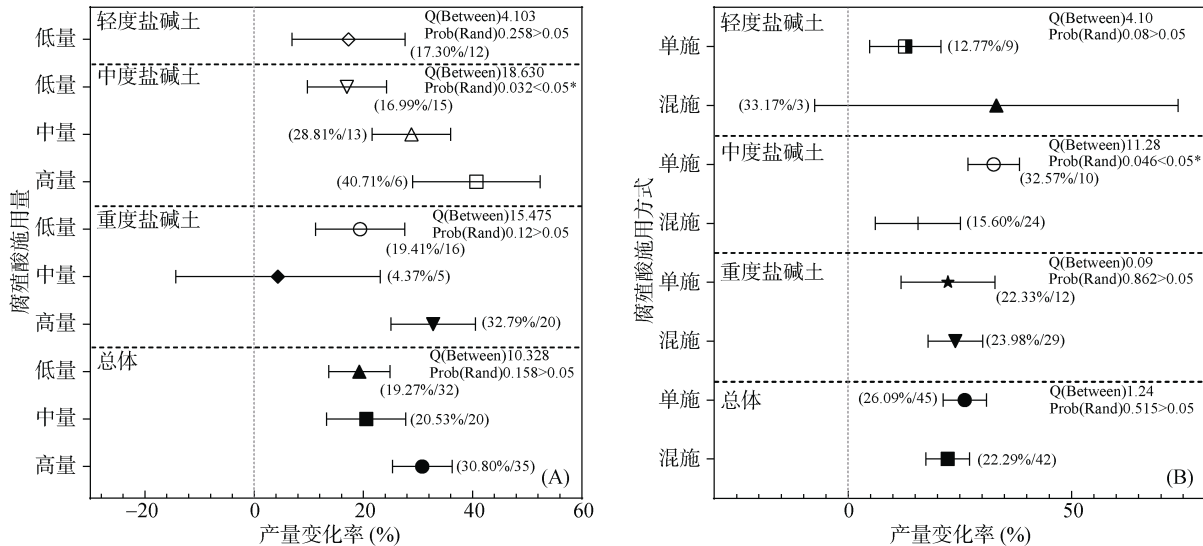


图 4 腐殖酸施用量及施用方式对不同程度盐碱土作物产量的影响

Fig. 4 Effects of humic acid application amount and method on yields of different saline degree soils

量分别增加 12.77%和 22.33%，混施产量分别增加 33.17% 和 23.98%。

3 讨论

3.1 添加腐殖酸对盐碱土碱性障碍的改良效果

盐碱障碍是制约作物高产的重要因素。一般而言，土壤盐分和 pH 过高会加重植物细胞渗透压和离子浓度，从而导致土壤养分失衡，并进一步影响植物正常的生理过程。通过脱盐降碱，可促进盐碱土产能提升^[29-31]。本研究发现，总体上，施用腐殖酸可以降低盐碱土 pH 3.00%~3.86%。这主要得益于腐殖酸中含有丰富的官能团，具有较大的缓冲容量，其中的酸性功能团可以释放出 H^+ 与盐碱土中的金属离子进行交换，同时 H^+ 与 OH^- 结合使 pH 降低^[32]。刘国辉等^[33]研究其他有机物料对盐碱土的改良效果也得出了类似的结论。此外，施用腐殖酸可以增加土壤中有机酸和磷酸根等酸性离子含量^[34]，酸性离子可以进一步缓解土壤碱度过高的障碍。腐殖酸还可通过提供微生物所需物质和能量促进微生物的生长和代谢^[35]。微生物生长繁殖可以分泌有机酸，进一步降低根际土壤 pH，缓解碱胁迫^[36-37]。

腐殖酸施用方式对盐碱土碱性障碍的改良效果也有一定影响。本研究发现，总体上，腐殖酸单施和混施均能显著降低土壤 pH 且差异不大。然而，在中度盐碱土中，混施腐殖酸降低土壤 pH 明显优于单施，其分别降低 3.68% 和 1.44%，这与郭亮亮^[38]的试验结果相似。这可能是因为轻度和重度盐碱土盐碱程度较为极端，对不同腐殖酸施用方式的响应差异不大。而中度盐碱土受不同灌溉方式、调理剂掩埋深度等因素的影响极大，因此配施其他复合钙源调理剂，在充分灌溉的条件下 Ca^{2+} 对 Na^+ 的置换反应可以显著提高腐殖酸对碱性障碍的改良效果^[39]。

3.2 添加腐殖酸对盐碱土水溶性盐含量的影响

本研究发现，添加腐殖酸对土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的增加作用尤为显著。在不同盐碱化程度的土壤中，施用腐殖酸后， Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量普遍呈上升趋势，尤其是在中度和重度盐碱土中，添加高、中量腐殖酸土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量分别提升了 1.73%~59.02% 和 -3.54%~14.95%，而且混合其他物料施用腐殖酸时效果更为明显，这与 Qadir 等^[40]的研究结果一致。这可能得益于腐殖酸的添加改善了盐碱土中的微生物群落结构。盐碱土中细菌多样性与土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量呈显著正相关，与土壤 pH、 Na^+ 含量呈显著负相关^[38]。微生物生境的改善，促进了土壤 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}

含量增加。本研究结果显示，施用中、高量腐殖酸后，多数盐碱土的 Cl^- 和 Na^+ 含量显著降低，降幅分别为 14.16%~18.73% 和 11.50%~11.59%。这可能是由于 Ca^{2+} 高效置换 Na^+ ，短期内快速缓解了盐胁迫，并且 Ca^{2+} 具有极强的离子桥作用，能够和腐殖质形成复合物，促进黏粒和有机质结合^[41-42]，增加大团聚体含量，改善土壤渗透性能，从而促进多余盐离子淋洗和排出^[43-44]。

总体上，腐殖酸单施和混施均增加了土壤 Ca^{2+} 含量，但混施增幅更高，二者分别增加 22.11%、43.04%。混施腐殖酸显著提高了土壤 Mg^{2+} 含量，单施腐殖酸土壤 Mg^{2+} 含量略有降低，其变化率分别为 23.19% 和 -1.63%。这可能是因为脱硫石膏和生物炭等改良材料含有丰富的官能团和具有较强的阳离子交换能力所致^[45]。腐殖酸混合其他改良材料施用可以增加土壤有机酸含量，促进土壤矿物的分解，释放出 Ca^{2+} ^[37, 40]。而脱硫石膏等无机改良剂，一方面直接向土壤补充大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，另一方面也能改善土壤孔隙结构，显著增加土壤中的水分运动，促进排盐^[46-47]。总体上，腐殖酸混施降低土壤 Na^+ 含量的效果优于单施，分别降低 6.62% 和 2.76%。这是因为单施腐殖酸直接促进 Na^+ 溶解的能力有限，配合脱硫石膏等改良剂施用能增加土壤中竞争性离子 Ca^{2+} 的溶解度，从而与土壤中的碱性离子反应，生成沉淀物质^[37, 41, 48]。脱硫石膏溶解所产生的 Ca^{2+} ，能够置换出土壤胶体上的 Mg^{2+} ，造成 Mg^{2+} 在土壤溶液中积累，从而进一步置换出 Na^+ ^[40]。

3.3 添加腐殖酸对盐碱土产能的影响

腐殖酸施用对不同盐碱程度盐碱土的产能提升效果表现出显著差异，且其效果受到腐殖酸施用量和施用方式的共同影响。本研究通过综合分析腐殖酸对不同盐碱化程度土壤的改良效果，发现不同盐碱程度土壤改良所需腐殖酸用量的供需规律不同。轻度盐碱土本身具有一定的农业生产潜力，但其盐分水平略高，可能影响作物的生长和产量。本研究发现，在轻度盐碱土中低量腐殖酸($\leq 600 \text{ kg/hm}^2$)综合改良效果最佳。低量腐殖酸的施用能够通过改善土壤的团聚体结构，促进 Na^+ 的淋洗排出，从而降低盐分对植物根系的抑制作用^[49]。这一过程同时能增强土壤的保水保肥能力，还能促进植物根系的生长^[50]，最终促进产量提升。值得注意的是，在轻度盐碱土上施用高量腐殖酸($\geq 1800 \text{ kg/hm}^2$)，土壤 pH 平均升高 3.16%，EC 降低 75.99%，改良效果较差，这与 Shaaban 等^[51]和李晓菊等^[52]的研究结果类似。pH 升高的原因可能

是游离阳离子减少,使得 CaCO_3 部分溶解,导致弱碱性的 HCO_3^- 增加,从而使 pH 增高。因此,在轻度盐碱土中,施用高量腐殖酸进行改良可能有潜在的负效应。

本研究发现,在中度盐碱土上,腐殖酸的施用量与产量的提升呈正相关,尤其在施用高量腐殖酸($\geq 1\ 800\ \text{kg}/\text{hm}^2$)后,产量提升效应尤为明显,平均增加 28.81%,这一结果与 Qadir 等^[40]的研究结果相一致。孙慧等^[53]研究发现,盐碱程度与表层土壤真菌群落物种组成的均匀程度呈负相关,盐碱土中菌根真菌有利于与植物形成共生体进而抵抗盐碱逆境^[54-55]。施用高量腐殖酸有利于增加土壤酶活性,丛枝菌根真菌(AMF)可通过增加土壤酶(硝酸盐还原酶、脲酶和纤维素酶)活性来促进凋落物矿化^[56]。同时,其他腐生菌也能增加 AMF 的定殖率以及酶活性的热点区域,这些热点区域反过来又可扩大根周围的养分活化区即根际范围,从而进一步促进作物生长^[57]。因此,适宜在中度盐碱土上施用较高量的腐殖酸来实现增产和降盐的目标。

相比于轻、中度盐碱土,重度盐碱土含盐量更高,土壤肥力水平更低,结构更差,难以开展正常农业生产。本研究发现,中量腐殖酸($600\sim 1\ 800\ \text{kg}/\text{hm}^2$)添加对改良重度盐碱土效果优于其他添加量。土壤 pH 平均降低 6.17%,土壤中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量平均增加 59.02% 和 14.95%, Na^+ 含量平均降低 13.58%。该结果与中度盐碱土条件下的结果相反,可能是因为重度盐碱土中微生物群落多样性低,其活性受高盐碱胁迫限制^[58]。添加高量腐殖酸可能超过了重度盐碱土中微生物的饱和碳利用能力^[59-60],但是中量腐殖酸能够为微生物提供适量的有机碳来源,促进关键微生物(如放线菌和氨化细菌)的恢复和活性^[61]。此外,重度盐碱土由于其极低的产能,直接以增产为目标的改良措施往往效果有限。本研究发现,尽管施用较大量有机物料后,产量表现出较大幅度的提升,但这种提升幅度实际上主要源于改良前土壤的极低产能,因此即使是轻微的增量变化,也会在指标效应值上体现为较大的提升,但实际绝对产量提升幅度远低于轻、中度盐碱土。基于此,本研究推测,重度盐碱土可能需要分阶段改良,前期施用中量腐殖酸进行初步降盐以及激活微生物群落,待土壤盐分得到有效控制后,施用高量腐殖酸进一步提供碳源和养分,逐步改善土壤生态系统,提升土壤肥力和作物产量。

综上所述,腐殖酸推荐用量应依据盐碱土的具体条件进行精准施用,以达到最佳改良效果。

4 结论

1) 施加腐殖酸能够显著缓解土壤盐碱障碍,但在不同盐碱程度的土壤上,腐殖酸单施和混施的效果存在差异。总体上,腐殖酸单施和混施均能有效降低盐碱土 pH。但在中度盐碱土中,腐殖酸混施改良效果更为显著。

2) 腐殖酸推荐用量应依据盐碱土的具体条件进行精准施用。对于轻度盐碱土,可适当施用低量腐殖酸提高耕地产能;对于中度盐碱土,可施用高量腐殖酸实现降盐增产;对于重度盐碱土,可能需要分两个阶段改良,先施加中量腐殖酸控制盐碱化,再施加高量腐殖酸提高产能。

3) 腐殖酸结构与成分复杂,其对土壤生态系统的调控机制具有多样性。未来需进一步研究“植物-土壤-微生物”的互动机制和调控原理,以进一步解释腐殖酸改良盐碱障碍的作用机制。

参考文献:

- [1] Mao W B, Kang S Z, Wan Y S, et al. Yellow River sediment as a soil amendment for amelioration of saline land in the Yellow River Delta[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(6): 1595-1602.
- [2] 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.
- [3] Sadegh-Zadeh F, Parichehreh M, Jalili B, et al. Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3262-3271.
- [4] Haj-Amor Z, Araya T, Kim D G, et al. Soil salinity and its associated effects on soil microorganisms, greenhouse gas emissions, crop yield, biodiversity and desertification: A review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 843: 156946.
- [5] He K, He G, Wang C P, et al. Biochar amendment ameliorates soil properties and promotes *Miscanthus* growth in a coastal saline-alkali soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103674.
- [6] Zhao Y G, Li Y Y, Wang J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 363-370.
- [7] Rietz D N, Haynes R J. Effects of irrigation-induced salinity and sodicity on soil microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 845-854.
- [8] Tejada M, Garcia C, Gonzalez J L, et al. Use of organic amendment as a strategy for saline soil remediation: Influence on the physical, chemical and biological properties of soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1413-1421.

- [9] Rengasamy P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils[J]. *Functional Plant Biology*, 2010, 37(7): 613–620.
- [10] 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.
- [11] 徐鹏程, 冷翔鹏, 刘更森, 等. 盐碱土改良利用研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(5): 293–298.
- [12] 王悦, 陈爽, 曹锐, 等. 耐盐菌联合化学复合改良剂协同改良黄河三角洲盐碱土壤的效果[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 354–360.
- [13] 苗月, 杨帆, 王志春, 等. 酸性物质对苏打盐碱土改良的研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(3): 373–384.
- [14] Liu M L, Wang C, Wang F Y, et al. Maize (*Zea mays*) growth and nutrient uptake following integrated improvement of vermicompost and humic acid fertilizer on coastal saline soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 142: 147–154.
- [15] Hu Y W, Li Q K, Song C J, et al. Effect of humic acid combined with fertilizer on the improvement of saline-alkali land and cotton growth[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2021, 19(2): 1279–1294.
- [16] 赵军跃, 王维玲, 王佳辉, 等. 不同类型改良剂配施肥料对盐碱土盐分和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(17): 80–88.
- [17] 才金玲, 谢玉洁, 刘兰军, 等. 腐殖酸的性质及应用进展[J]. *应用化工*, 2023, 52(12): 3418–3422, 3427.
- [18] Shan Y Y, Li G, Bai Y G, et al. Effects of gypsum combined with different amounts of biochemical humic acid on soil improvement and cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield on saline-alkali land[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2022, 20(1): 841–854.
- [19] 王倩姿, 王玉, 孙志梅, 等. 腐植酸类物质的施用对盐碱地的改良效果[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1227–1234.
- [20] Zhao S X, Chen Z L, Shen J M, et al. Leaching mechanisms of constituents from fly ash under the influence of humic acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 321: 647–660.
- [21] Blanco-Canqui H, Wortmann C S. Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104534.
- [22] Stavi I, Thevs N, Priori S. Soil salinity and sodicity in drylands: A review of causes, effects, monitoring, and restoration measures[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 712831.
- [23] Metternicht G I, Zinck J A. Modelling salinity-alkalinity classes for mapping salt-affected top soils in the semi-arid valleys of Cochabamba (Bolivia)[J]. *ITC-Journal*, 1996, 2: 125–135.
- [24] Di Cyan E. Handbook of chemistry and physics[J]. *Archives of Internal Medicine*, 1970, 126(2): 335.
- [25] Ghassemi F, Jakeman A J, Nix H A. Salinisation of land and water resources[J]. *Human causes, extent, management and case studies*. Canberra, Australia, 1995: 1–3.
- [26] Rusydi A F. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 118(1): 012019.
- [27] Worchel E R, Giaque H E, Kivlin S N. Fungal symbionts alter plant drought response[J]. *Microbial Ecology*, 2013, 65(3): 671–678.
- [28] 张彦军, 党水纳, 任媛媛, 等. 基于 Meta 分析的土壤呼吸对凋落物输入响应[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 447–456.
- [29] Zhu H, Yang J S, Yao R J, et al. Interactive effects of soil amendments (biochar and gypsum) and salinity on ammonia volatilization in coastal saline soil[J]. *Catena*, 2020, 190: 104527.
- [30] Huang L H, Liu Y, Ferreira J F S, et al. Long-term combined effects of tillage and rice cultivation with phosphogypsum or farmyard manure on the concentration of salts, minerals, and heavy metals of saline-sodic paddy fields in Northeast China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105222.
- [31] Van Horn D J, Okie J G, Buelow H N, et al. Soil microbial responses to increased moisture and organic resources along a salinity gradient in a polar desert[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(10): 3034–3043.
- [32] 孙在金. 脱硫石膏与腐植酸改良滨海盐碱土的效应及机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- [33] 刘国辉, 买文选, 田长彦. 施用有机肥对盐碱土的改良效果: Meta 分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(1): 86–96.
- [34] 郭晓博. 脱硫石膏对堆肥中氮素转化和腐殖化特征影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [35] Rengasamy P. World salinization with emphasis on Australia[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(5): 1017–1023.
- [36] Ou Y, Rousseau A N, Wang L X, et al. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors—a case study of the Black Soil Region of Northeastern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 245: 22–31.
- [37] Wang S N, Tang J, Li Z Y, et al. Carbon mineralization under different saline—Alkali stress conditions in paddy fields of Northeast China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(7): 2921.
- [38] 郭亮亮. 有机物料与脱硫石膏配施对苏打盐碱土有机质的作用机制[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2023.
- [39] 项娜. 脱硫废弃物改良碱土施用量影响因素和改良速度的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [40] Qadir M, Steffens D, Yan F, et al. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation[J]. *Land Degradation & Development*, 2003, 14(3): 301–307.
- [41] Gu W L, Huang S B, Lei S, et al. Quantity and quality variations of dissolved organic matter (DOM) in column leaching process from agricultural soil: Hydrochemical

- effects and DOM fractionation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 691: 407–416.
- [42] Leogrande R, Vittori C. Use of organic amendments to reclaim saline and sodic soils: A review[J]. *Arid Land Research and Management*, 2019, 33(1): 1–21.
- [43] Zhou P, Pan G X, Spaccini R, et al. Molecular changes in particulate organic matter (POM) in a typical Chinese paddy soil under different long-term fertilizer treatments[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(2): 231–242.
- [44] Yin Z X, Zhang L, Li R N. Effects of additives on physical, chemical, and microbiological properties during green waste composting[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 340: 125719.
- [45] Luo W C, Qian L, Liu W W, et al. A potential Mg-enriched biochar fertilizer: Excellent slow-release performance and release mechanism of nutrients[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144454.
- [46] Akhtar S S, Andersen M N, Liu F L. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 158: 61–68.
- [47] Chaganti V N, Crohn D M. Evaluating the relative contribution of physiochemical and biological factors in ameliorating a saline-sodic soil amended with composts and biochar and leached with reclaimed water[J]. *Geoderma*, 2015, 259/260: 45–55.
- [48] 罗淋丹.不同改良材料对滨海盐土的改良效果研究[D].北京: 中国农业科学院,2024.
- [49] Yang F, Tang C Y, Antonietti M. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(10): 6221–6239.
- [50] Thapa G B, Paudel G S. Farmland degradation in the mountains of Nepal: A study of watersheds ‘with’ and ‘without’ external intervention[J]. *Land Degradation & Development*, 2002, 13(6): 479–493.
- [51] Shaaban M, Abid M, Abou-Shanab R A I. Amelioration of salt affected soils in rice paddy system by application of organic and inorganic amendments[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2013, 59(5): 227–233.
- [52] 李晓菊, 单鱼洋, 王全九, 等. 腐殖酸对滨海盐碱土水盐运移特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 288–293.
- [53] 孙慧, 张建锋, 许华森, 等. 余姚滨海不同盐碱度土壤微生物群落组成及土壤酶活性的变化[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3361–3370.
- [54] 张义飞, 王平, 毕琪, 等. 不同强度盐胁迫下 AM 真菌对羊草生长的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(17): 5467–5476.
- [55] 唐明, 黄艳辉, 盛敏, 等. 内蒙古盐碱土中 AM 真菌的多样性与分布[J]. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1104–1110.
- [56] 汪顺义, 冯浩杰, 王克英, 等. 盐碱地土壤微生物生态特性研究进展[J]. *土壤通报*, 2019, 50(1): 233–239.
- [57] Cao T T, Fang Y, Chen Y R, et al. Synergy of saprotrophs with mycorrhiza for litter decomposition and hotspot formation depends on nutrient availability in the rhizosphere[J]. *Geoderma*, 2022, 410: 115662.
- [58] 梁洪榜, 赵丽, 周云鹏, 等. 盐碱地应用根际促生菌对土壤改良、作物产量与品质的影响——基于 Meta 分析[J]. *土壤*, 2022, 54(6): 1257–1264.
- [59] Paterson E, Sim A. Soil-specific response functions of organic matter mineralization to the availability of labile carbon[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(5): 1562–1571.
- [60] 魏圆云, 崔丽娟, 张曼胤, 等. 土壤有机碳矿化激发效应的微生物机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1202–1211.
- [61] 叶协锋, 凌爱芬, 张斌, 等. 腐殖酸对烤烟土壤性状及烟叶品质的影响[J]. *华北农学报*, 2009, 24(5): 170–173.

(责任编辑: 于 飞)