

微藻肥对土默川平原盐渍土理化性质及玉米产量的影响

李慧欣¹, 陈士超^{1,2}, 段鹏程³, 蔺方春⁴

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2.内蒙古自治区风沙物理与防沙治沙工程重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010018; 3.内蒙古阿尔格生命科学有限公司, 内蒙古 乌兰察布 011800; 4.中国林业科学研究院沙漠林业试验中心, 内蒙古 巴彦淖尔 015200)

摘要: [目的] 探究 3 种微藻肥及其不同施用量对盐渍化土壤的改良效果和对玉米生理指标及产量的影响, 为盐渍化土壤的改良提供新的参考依据。[方法] 本研究在土默川平原盐碱地开展大田试验。试验设计了 3 种微藻肥(分别记作 W_1, W_2, W_3), 每种微藻肥设置 3 个施肥水平(15, 30, 45 L/hm², 分别记作 N_1, N_2, N_3), 以不施藻肥作为对照, 共计 10 个处理。[结果] ①在土壤理化性质方面, 与未施用微藻肥的对照处理相比, 施用微藻肥处理显著降低了土壤的容重, 降幅为 4.11%~12.34%; 提高了土壤孔隙度, 增幅为 10.82%~38.31%; 土壤 pH 值和含盐量呈现下降趋势, 分别降低了 1.82%~9.90% 和 17.12%~47.66%。②在玉米生长方面, 与未施用微藻肥的对照处理相比, 微藻肥处理下的玉米株高、茎粗以及叶面积指数分别增加了 1.12%~18.47%, 1.15%~29.02% 和 22.50%~74.14%; 百粒重和产量分别提高了 16.02%~48.31% 和 15.73%~41.31%。玉米产量与土壤容重和 pH 值呈显著负相关关系, 与叶面积指数等呈显著正相关关系。[结论] 施用 II 号微藻肥 30 L/hm² ($W_2 N_2$ 处理) 对改良盐渍土和提高玉米产量的效果最好, 在选择施用微藻肥对土默川平原盐渍化土壤改良时可优先考虑。

关键词: 微藻肥; 盐渍土改良; 玉米; 土默川平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0012-10

中图分类号: S156.4

文献参数: 李慧欣, 陈士超, 段鹏程, 等. 微藻肥对土默川平原盐渍土理化性质及玉米产量的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(2): 12-21. Li Huixing, Chen Shichao, Duan Pengcheng, et al. Effects of microalgal fertilizer on physical and chemical properties of saline soils and maize yield in Tumochuan Plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(2): 12-21. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.002; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.02.002.

Effects of microalgal fertilizer on physical and chemical properties of saline soils and maize yield in Tumochuan Plain

Li Huixing¹, Chen Shichao^{1,2}, Duan Pengcheng³, Lin Fangchun⁴

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia

Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2.Inner Mongolia

Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Control Engineering College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia

010018, China; 3.Inner Mongolia Arg Life Science Co, Ltd, Ulanqab, Inner Mongolia 011800, China;

4.Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Bayan nur, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: [Objective] The effects of three types of microalgal fertilizers and their varying application rates on soil salinity, physiological indicators, and maize yield were explored, in order to provide a new scientific basis for the enhancement of saline soil. [Methods] A field experiment was conducted using saline alkali collected from the Tumochuan Plain. Three kinds of microalgal fertilizer (designated as $W_1, W_2,$ and W_3)

收稿日期: 2024-09-10

修回日期: 2024-12-07

采用日期: 2024-12-08

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“乌梁素海流域农业面源污染防控减排及河湖生态修复技术研究”(2022YFHH0088)

第一作者: 李慧欣(2000—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区呼伦贝尔市人, 硕士, 主要研究方向为荒漠化防治。Email: lhuxing@126.com.

通信作者: 陈士超(1977—), 男(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 副教授, 主要从事资源环境与荒漠化防治方面的研究。Email: chenshichao2005@126.com.

were formulated for the experiment. Each microalgal fertilizer was established with three levels of application (15, 30, and 45 L/hm², designated as N₁, N₂, and N₃, respectively), a control without fertilizer, resulting in a total of 10 treatments. [Results] ① Regarding the physical and chemical parameters of soil, the application of microalgal fertilizer considerably decreased soil bulk density by 4.11% to 12.34% compared to the control treatment. Soil porosity increased from 10.82% to 38.31%. The soil pH value and salt concentration fell by 1.82%—9.9% and 17.12%—47.66%, respectively. ② As for maize growth, compared with the control treatment, the plant height, stem diameter, and leaf area index of maize subjected to the microalgal fertilizer treatment increased from 1.12% to 18.47%, 1.15% to 29.02%, and 22.5% to 74.14%, respectively. The 100-grain weight and yield improved by 16.02%—48.31% and 15.73%—41.31%, respectively. Maize yield had a significantly negative correlation with soil bulk density and pH value while demonstrating a significantly positive correlation with the leaf area index. [Conclusion] The effect of the W₂ microalgal fertilizer applied at a rate of 30 L/hm² (W₂ N₂ treatment) on improving saline soil and increasing maize yield was better; it should therefore be given priority when selecting microalgae to improve saline soil in the Tumochuan Plain.

Keywords: microalgal fertilizer; saline soil improvement; maize; Tumochuan Plain

土壤盐渍化是指易溶性的盐分在土壤表层积累的现象或过程,也可称为土壤盐碱化^[1]。目前,中国有盐渍化土壤约 9.90×10^7 hm²,其中现代盐渍土面积约 3.00×10^7 hm²,残余盐渍土约 4.50×10^7 hm²,并且尚存潜在盐渍土约 1.70×10^7 hm²^[2-3]。由于盐渍化土壤 pH 值较高,养分循环能力差,限制了作物生长,导致农作物产量和品质显著下降,给农民生计和农业生产带来巨大的损失,已逐步成为制约农业可持续发展的主要障碍因素,给中国粮食安全和农业可持续发展带来了巨大的挑战^[4-5]。土默川平原是黄河中上游盐碱区的重要组成部分,是内蒙古主要粮食生产基地之一,有约 1.50×10^5 hm² 的盐碱地。该地区土壤盐渍化程度较高,生态环境极为脆弱。为了改善盐渍土土壤肥力,降低其再次退化的风险,需要在盐渍化土地的开发和利用中寻求科学合理的改良方法。

微藻肥是指以藻类或藻类提取物为原料,通过发酵或肥料混配工艺生产出来的生物肥料^[6]。微藻中含有丰富的油脂、蛋白质、藻多糖、色素、药理活性物质和矿物质等高价营养物质和化工原料,可广泛应用于能源、食品、环境等各领域,具有良好的商业潜力和价值^[7]。1959 年黎尚豪院士课题组从湖北、湖南、江西等地的稻田中分离纯化了 4 株固氮蓝藻,并表明蓝藻的生长过程会不断将同化的氮素供给给其他植物利用,可以利用它作为水稻田或其他作物的生物氮肥源^[8]。1993 年刘永定院士在研究土壤微藻的过程中前瞻性地提出土壤藻类具有成为土壤调节剂、环境生物指示剂和多糖色素生产者的潜力^[9]。已有研究证实,微藻类肥料可以增加土壤有机质含量、有效改善土壤微生物群落结构,微生物活性还可以提升土壤

肥力、改善土壤理化性状,实现对作物的协同增效^[10]。

微藻活性细胞的络合—吸附和生物氧化—还原作用,可以从源头降低农药、重金属残留土壤对作物的危害,在提高土壤肥力,改善土壤结构促进作物生长等方面具有重要作用^[11]。微藻生物技术也打破了传统的改良盐碱地的方法,如物理方法、化学方法等的缺点,在很少人为投入的前提下可在短期内促进盐碱地作物生长、改良土壤的理化性质,从而达到绿色、经济、高效改良盐渍化土壤的目的。本文拟探究微藻肥对土壤改良及作物生长效应的影响。通过筛选,确定适用于该区域作物生长发育、产量提升及品质优化的微藻肥种类及其最佳施用浓度,形成兼具“环保—增产、培肥—固碳”效能于一体的微藻细胞液体生物肥,为盐渍化土壤的修复提供新的思路,对改良当地盐渍化土壤具有重要的理论价值和实践意义。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古自治区呼和浩特市托克托县古城镇(111°36′—111°47′E,40°49′—40°53′N),该试验区属于大陆性季风气候,其特点是冬季漫长而干冷,夏季短暂而温热,昼夜温差大,日照充足,雨热同期。年均日照时数 1 698 h,年平均气温 8 ℃,年均降水总量 350 mm,主要集中在 7—9 月,蒸发量 1 900 mm,无霜期年平均 126 d,玉米生育期降水量 203 mm,土壤盐分类型以苏打盐化土壤和草甸碱土为主。该区土壤的 pH 值为 8.42,全盐量为 3.76 g/kg,有机质为 8.66 g/kg。

1.2 试验设计

(1) 试验材料。玉米种子由内蒙古隆霞农业有限公司提供,微藻肥选用阿尔格生命科学有限公司提供的蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、鱼腥藻(*Anabaena*)和单歧藻(*Tolypothrix*)这 3 种藻不同配比制成的微藻肥,各种肥料主要成分见表 1。

表 1 微藻肥主要成分

Table 1 Main ingredients of microalgae fertilizer

微藻肥种类	主要成分含量/%		
	蛋白核小球藻	鱼腥藻	单歧藻
I 号	50	50	0
II 号	50	40	10
III 号	50	25	25

(2) 试验方法。试验于 5 月中旬播种玉米,于 9 月中旬收获。田间试验施肥方式采用滴灌方式。参考其施用说明,适当调整施肥量,施肥操作在播种前一次性完成,以寻求改良土默川平原盐碱地、提高玉米产量的最佳施肥方案。试验采用单因素随机区组法,设计 3 种微藻肥因素,分别记作 W_1, W_2, W_3 , 每个因素下设 3 个施肥水平(15, 30, 45 L/hm², 分别记作 N_1, N_2, N_3)。以不施微藻肥为对照组 CK, 共 10 个试验小区,每个小区面积为 667 m²(如表 2 所示)。除微藻肥的种类和施用量作为试验变量外,所有小区均遵循当地常规的田间管理和植保措施,确保在灌水、追肥、病虫害防治等管护条件上保持一致,以消除非试验因素对结果的潜在影响。

表 2 试验设计

Table 2 Design of experiment

处理	施肥量/(L · hm ⁻²)
CK	0
$W_1 N_1$	15
$W_1 N_2$	30
$W_1 N_3$	45
$W_2 N_1$	15
$W_2 N_2$	30
$W_2 N_3$	45
$W_3 N_1$	15
$W_3 N_2$	30
$W_3 N_3$	45

注: W_1, W_2, W_3 分别代表 3 种微藻肥因素; N_1, N_2, N_3 分别代表 15, 30, 40 L/hm² 3 个施肥水平;CK 为对照。下同。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 样品采集和调查 试验于 2023 年玉米成熟期采集土壤混合样品,采样深度设置两个层次:0—20 和 20—40 cm,在每个试验小区内,为确保采样的代表性和均匀性采用“S”型五点采样,采集环刀样品,测定土壤容重和孔隙度,另取土壤样品移除土样中的

植物残根、石块等杂物,混合均匀装入自封袋,带回实验室进行自然风干处理,以备后续土壤化学性质分析测试。在每个试验小区内,选取长势均匀的 5 株玉米,分别测定株高、茎粗和叶面积。

1.3.2 测定指标与方法

(1) 土壤样品测定指标包括容重、孔隙度、pH 值、含盐量,测定方法参照鲍士旦主编的土壤农化分析^[12]中的方法进行。采用环刀法测定土壤容重和孔隙度,pH 值通过 pH 仪测定(水土比为 5:1),土壤全盐含量 EC 采用电导率仪进行测定,土样与水的混合比例设定为 1:5。

$$\text{土壤容重} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (1)$$

式中: m_1 为环刀质量(g); m_2 为环刀和烘干土质量(g); V 为环刀体积(cm³)。

$$\text{孔隙度}(\%) = \frac{W_1 - W_2}{V} \times 100\% \quad (2)$$

式中: W_1 为环刀和充分浸湿土的质量(g); W_2 为环刀和烘干土的质量(g); V 为环刀体积(cm³)。

电导率(EC)与全盐(TS)的转换关系:

$$EC = 3.74 \times TS \quad (3)$$

(2) 玉米生长发育测定指标包括株高、茎粗、叶面积指数。玉米株高、叶面积用米尺进行测量,茎粗用游标卡尺进行测量,在玉米灌浆期分别测量玉米的根部、中部、上部的茎粗,取平均值。叶面积指数的计算公式为:

$$\text{叶面积指数(LAI)} = \sum_{i=1}^k 0.75 l_j b_j / f \quad (4)$$

式中: k 为单株叶片数; l_j 为单叶片长度(cm); b_j 为单叶片最大宽度(cm); f 为单株占地面积(cm²)。

(3) 玉米产量及其构成要素:玉米收获后,每个处理中选取具有代表性的 4 株,烘干至恒重后测定穗数、粒数和百粒重。

1.3.3 土壤改良与玉米增产效应综合评价 隶属度综合评价法是将各指标的隶属函数值求和后再求平均值,对最终的均值进行排序,序号越小说明其所对应的处理效果越优,反之亦然。各指标的隶属函数值 $X(U)$ 的计算公式为:

若指标与玉米生长呈正相关,则:

$$X(U) = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (5)$$

若指标与玉米生长呈负相关,则:

$$X(U) = 1 - \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (6)$$

式中: X 为指标的实测值; X_{\max}, X_{\min} 分别为测定值的最大值和最小值。

1.4 数据统计与分析

试验数据通过 Microsoft Excel 2010 进行初步整理与分析,利用 SPSS 16.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和相关性分析,验证差异的显著性采用最小显著性差异检验法(LSD)在 $p < 0.05$ 水平进行差异显著性检验,综合评价分析采用隶属度函数综合评价法。

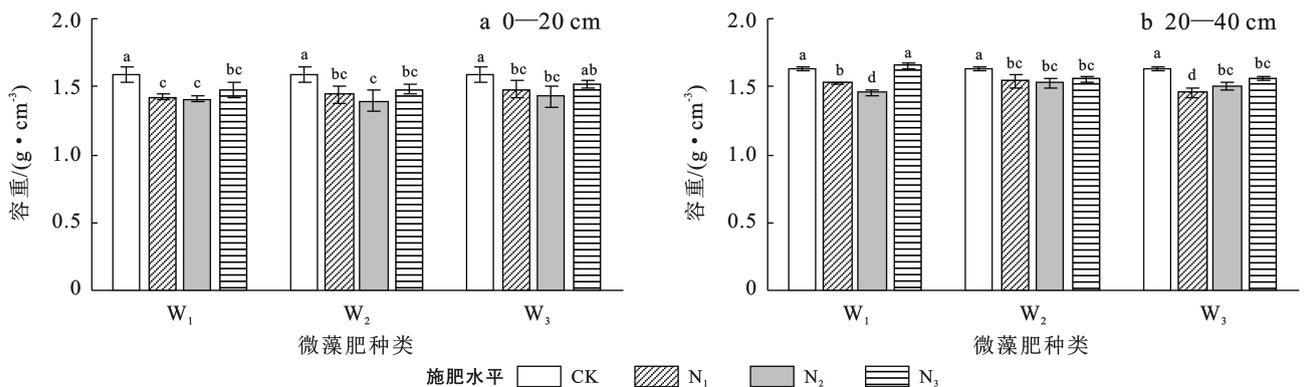
2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤容重和孔隙度的影响

如图 1 可见,不同微藻肥处理对土壤容重的影响在 0—20 和 20—40 cm 两个土层深度均表现出显著

差异,在表层土壤(0—20 cm)中,与未施肥对照(CK)相比,所有微藻肥处理的土壤容重均显著降低,施肥量对土壤容重的影响表现为:在同一微藻肥种类下,土壤容重随施肥量的变化趋势一致,且均呈现 $N_2 < N_1 < N_3$ 的趋势,其中 $W_1 N_2$ 处理较 CK 下降 11.39%, $W_2 N_2$ 处理较 CK 下降 12.34%, $W_3 N_2$ 处理较 CK 下降 10.21%,各处理差异较 CK 达到显著性水平($p < 0.05$)。

在 20—40 cm 土层中,施用 I 号和 II 号微藻肥对土壤容重的影响呈现与 0—20 cm 相似的变化趋势,而 III 号微藻肥却呈现随施肥量增加土壤容重增加的趋势。



注:图中不同小写字母表示在同一土层下不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理对土壤容重的影响

Fig.1 Effects of different treatments on soil bulk density

不同微藻肥处理对土壤孔隙度的影响见图 2。在 0—20 cm 土层,与未施肥对照(CK)相比,施用微藻肥处理显著提高了土壤孔隙度,3 种微藻肥处理分别使土壤孔隙度平均提高了 30.47%,21.22%,25.26%。施肥量影响方面,相同种类微藻肥在不同施用量下,土壤孔隙度均呈现先增加后降低的变化趋势,其中 $W_1 N_2$ 处理使土壤孔隙度增加了 38.81%, $W_2 N_2$ 处理增加了 34.69%, $W_3 N_2$ 处理增加了 32.84%,各处理

差异较 CK 达到显著性水平($p < 0.05$)。在 20—40 cm 土层,相较于 CK,3 种微藻肥分别使土壤孔隙度平均提升了 61.73%,66.42%,70.39%,相同种类微藻肥不同施用量处理间土壤孔隙度呈现与 0—20 cm 相似的变化趋势,且各处理差异较 CK 达到显著性水平($p < 0.05$)。

综上所述,施用微藻肥能够显著提升盐渍化土壤的孔隙度。

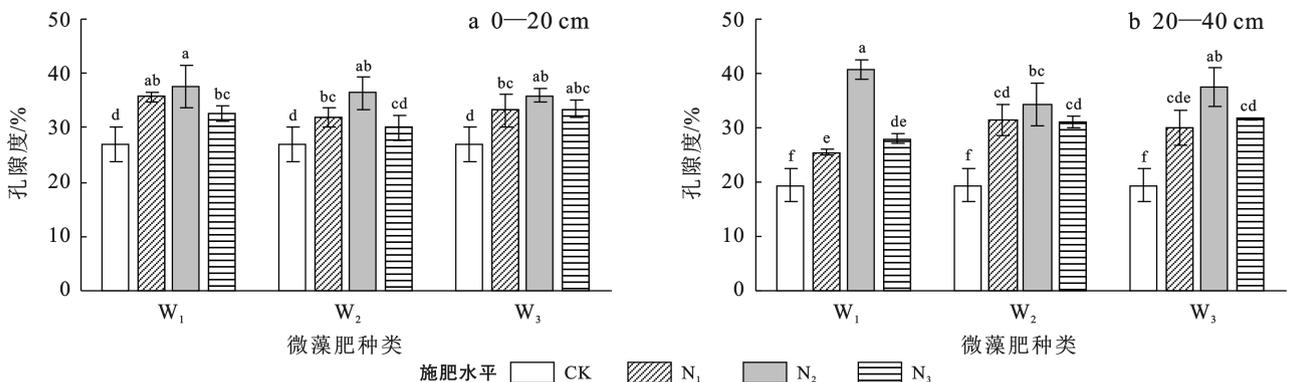


图 2 不同处理对土壤孔隙度的影响

Fig.2 Effects of different treatments on soil porosity

2.2 不同处理对土壤 pH 值和含盐量的影响

施用微藻肥对土壤 pH 值的影响见图 3。在 0—20 cm 土层相比,与未施肥对照(CK)相比,施用微藻肥处理显著降低了土壤 pH 值,3 种微藻肥土壤 pH 值的平均降幅分别为 4.01%,8.17%和 6.70%。施肥量影响方面,相同种类微藻肥在不同施用量下,土壤 pH 值的变化趋势并不一致,施用 I 号微藻肥(W_1)和 III 号微藻肥(W_3)条件下,随着施用量的增加土壤 pH 值变化趋势均为: $N_2 < N_3 < N_1$,其中 W_1N_2 处理较 CK 降低 5.36%($p < 0.05$), W_3N_2 处理较 CK 降低

7.89%($p < 0.05$);而 W_2 条件下,土壤 pH 值变化趋势为: $N_3 < N_1 < N_2$,其中 W_2N_3 处理较 CK 降低 9.9%($p < 0.05$)。在 20—40 cm 土层,与 CK 相比,3 种微藻肥土壤 pH 值的平均降幅分别为 3.00%,5.87%和 4.65%, W_1 条件下,随着施肥量的增加土壤 pH 值变化趋势为: $N_1 < N_3 < N_2$,其中 W_1N_1 处理较 CK 降低 3.60%; W_2 和 W_3 条件下,土壤 pH 值变化趋势均为: $N_3 < N_1 < N_2$,其中 W_2N_3 处理较 CK 降低 9.68%($p < 0.05$), W_3N_3 处理较 CK 降低 7.32%($p < 0.05$)。

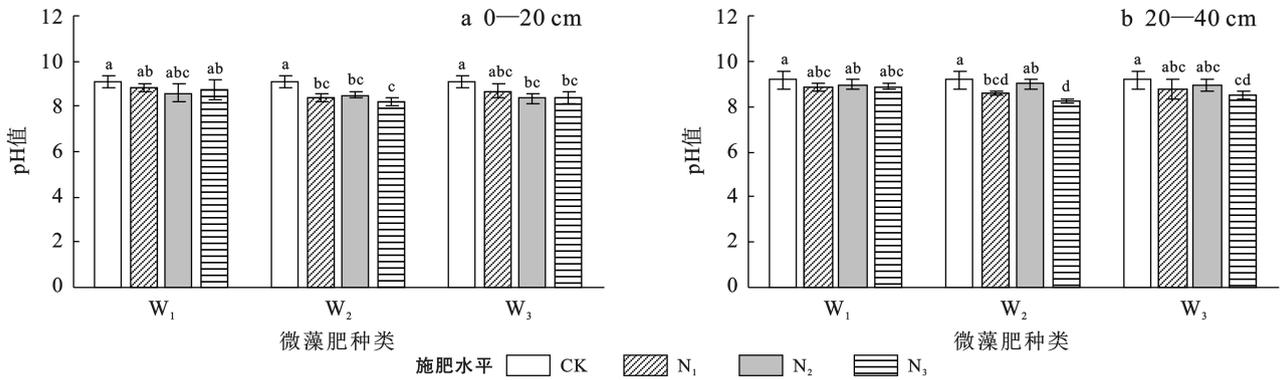


图 3 不同处理对土壤 pH 值的影响

Fig.3 Effects of different treatments on soil pH value

图 4 表明,施用微藻肥对土壤含盐量的影响。在 0—20 cm 土层深度下,与未施用微藻肥对照(CK)相比,3 种不同配比的微藻肥(分别标记为 W_1 , W_2 , W_3)均显著降低了土壤含盐量,其平均降幅分别为 19.96%,27.30%,23.08%。施肥量影响方面, W_1 和 W_3 条件下,随着施肥量的增加土壤含盐量变化趋势表现为: $N_1 < N_2 < N_3$,其中 W_1N_1 处理较 CK 降低了

21.69%($p < 0.05$), W_3N_1 处理较 CK 降低 29.09%($p < 0.05$);而 W_2 条件下,随着施肥量的增加土壤含盐量变化趋势表现为 $N_3 < N_1 < N_2$, W_2N_3 处理土壤含盐量较 CK 降低了 31.35%($p < 0.05$)。但施用微藻肥对 20—40 cm 土层土壤含盐量的影响要低于 0—20 cm 表层土壤的影响。整体而言,施用微藻肥能够显著抑制土壤盐分向上移动。

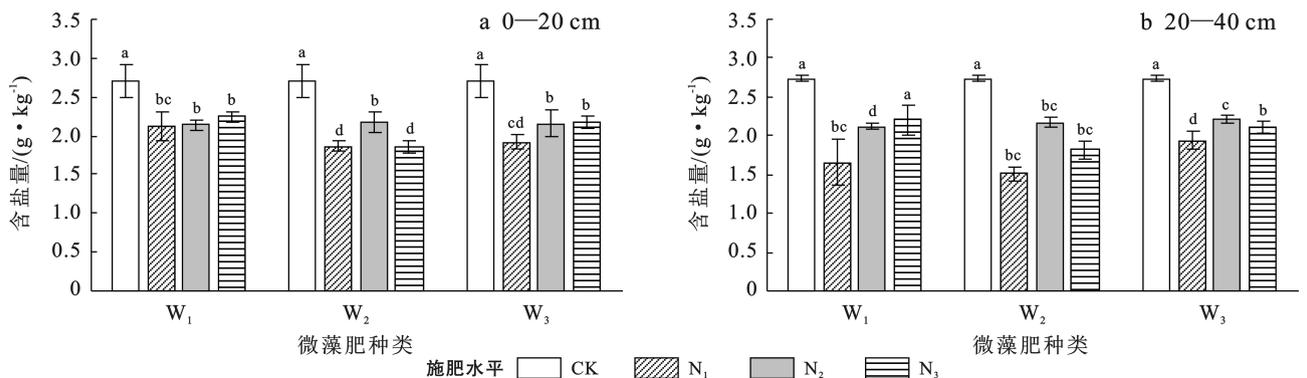


图 4 不同处理对土壤含盐量的影响

Fig.4 Effects of different treatments on soil salinity

2.3 不同处理对玉米生长发育表观指标的影响

株高是作物生长的一个重要生育指标,能够有效

地反映其生长状况。不同施肥处理下玉米株高变化见图 5。与 CK 处理相比,施用微藻肥有利于株高的

增长,3种微藻肥玉米株高平均增长分别为1.87%、14.00%、9.49%。施肥量影响方面。相同施用I号微藻肥(W_1)条件下,随着施肥量的增加玉米株高呈下降趋势, W_1N_1 处理较CK增大3.38%,较CK相比差异并不显著。 W_2 条件下,随着施肥量增加玉米株高呈上升趋势, W_2N_3 处理较CK增加18.47% ($p < 0.05$)。 W_3 条件下,玉米株高随施肥量增加表现为先降低后上升的趋势, W_3N_3 处理较CK增加13.67% ($p < 0.05$)。

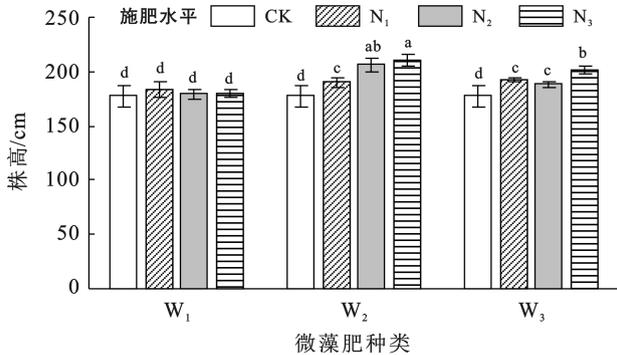


图 5 不同处理对玉米株高的影响

Fig.5 Effects of different treatments on maize plant height

不同微藻肥处理下玉米茎粗变化见图 6。与CK处理相比,不同微藻肥种类相同施用量间处理表现出增加的效果,3种微藻肥玉米茎粗平均增长分别为6.51%、15.92%、26.06%。施肥量影响方面。 W_1 条件下,随施肥量增加玉米茎粗呈增大趋势, W_1N_3 处理较CK增加10.42%,与CK相比差异并不显著。 W_2 、 W_3 条件下,随施肥量增加玉米茎粗呈先增大后减小趋势, W_2N_2 处理较CK增加21.27% ($p < 0.05$), W_3N_2 处理较CK增加29.02% ($p < 0.05$)。因此施用I号微藻肥的条件下,施肥量越大越有利于玉米茎粗的生长;而施用II号,III号微藻肥的条件下,中施肥量更有利于玉米茎粗的生长。综合来看,施用III号微藻肥 30 L/hm^2 对玉米茎粗的影响效果最大。

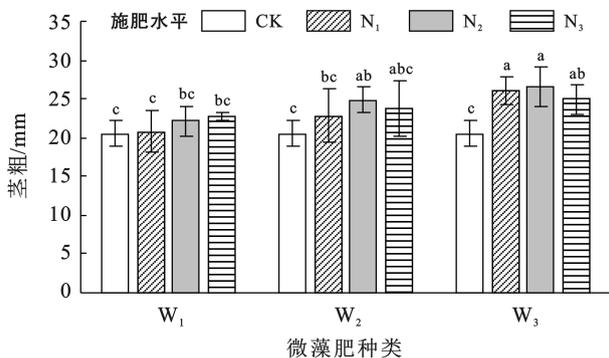


图 6 不同处理对玉米茎粗的影响

Fig.6 Effects of different treatments on maize stem thickness

不同施肥处理下玉米叶面积指数变化见图 7。与CK处理相比,不同微藻肥种类相同施用量间叶面积指数表现出增加的效果,3种微藻肥平均增长分别为27.54%、62.73%、43.16%。施肥量影响方面。其中, W_1 、 W_3 条件下,随施肥量增加玉米叶面积指数呈先增大后减小趋势, W_1N_2 处理较CK增加31.68% ($p < 0.05$), W_3N_2 处理较CK增加50% ($p < 0.05$); W_2 条件下,随施肥量增加玉米叶面积呈增大趋势, W_2N_3 处理较CK增加74.14% ($p < 0.05$)。因此,在施用I号和III号微藻肥的情况下, 30 L/hm^2 施肥量对玉米叶面积指数的提高更有效果;而在施用II号微藻肥时,较高的施肥量更有利于提高玉米叶面积指数。在低施肥量下,施用I号微藻肥对玉米叶面积指数的提高效果更显著;而在中、高施肥量下,施用II号微藻肥更有利于玉米叶面积指数的增加。

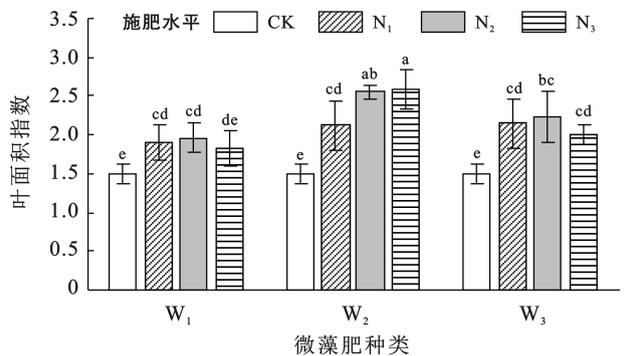


图 7 不同处理对玉米叶面积指数的影响

Fig.7 Effects of different treatments on leaf area index of maize

2.4 不同处理对玉米产量及其构成因素的影响

作物产量的高低是衡量施肥措施优劣的主要指标。由表 3 看出,施用不同种类、不同浓度微藻肥对玉米穗数和穗粒数无显著影响,各施肥处理间百粒重和产量存在差异。与CK处理相比,3种微藻肥种类玉米平均产量分别提高24.31%、37.03%和27.72%。施肥量影响方面,施用I号微藻肥(W_1)条件下,随着施肥量的提高,玉米产量逐渐降低,其中 W_1N_1 处理比CK提高39.76% ($p < 0.05$); W_2 、 W_3 条件下,随着施肥量的提高,产量呈现先升高后降低的变化规律。其中 W_2N_2 处理比CK提高41.31% ($p < 0.05$), W_3N_2 处理比CK提高36.84% ($p < 0.05$)。因此,施用I号微藻肥条件下,低施肥量增产最佳;施用II号,III号微藻肥条件下,中施肥量增产最佳,施肥量过高会导致减产,但与低施肥量间差异不显著。由此可见,施用微藻肥能提高玉米产量,且施用II号微藻肥 30 L/hm^2 是提高玉米产量的最佳施肥模式。

表 3 不同处理下玉米产量及其构成因素

Table 3 Maize yield and its components under different treatments

处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	穗数/ (10 ⁴ 个·hm ⁻²)	穗粒数/ 个	百粒重/ g
CK	3 480.56 ^b	3.88 ^a	313.0 ^a	24.21 ^f
W ₁ N ₁	4 864.45 ^a	4.20 ^a	350.7 ^a	35.91 ^a
W ₁ N ₂	4 087.08 ^{ab}	3.99 ^a	335.7 ^a	29.68 ^d
W ₁ N ₃	4 028.16 ^{ab}	3.85 ^a	320.0 ^a	32.42 ^b
W ₂ N ₁	4 807.15 ^a	4.20 ^a	401.7 ^a	31.00 ^c
W ₂ N ₂	4 918.32 ^a	3.93 ^a	405.0 ^a	29.36 ^{de}
W ₂ N ₃	4 582.51 ^{ab}	4.06 ^a	396.0 ^a	33.08 ^b
W ₃ N ₁	4 144.91 ^{ab}	4.39 ^a	317.7 ^a	29.87 ^{cd}
W ₃ N ₂	4 762.67 ^{ab}	3.93 ^a	411.0 ^a	28.09 ^e
W ₃ N ₃	4 428.93 ^{ab}	3.76 ^a	393.3 ^a	29.08 ^{de}

注:数据为平均值,同一列数据后不同小写字母表示各处理间差异显著通过 LSD 检验($p < 0.05$)。

2.5 不同处理土壤改良与玉米增产效应综合评价

通过对 0—20, 20—40 cm 土层深度下的土壤容重、孔隙度、pH 值、含盐量和玉米生长量、产量等指标进行相关性分析,结果见表 4—5 所示。玉米产量与 0—20 cm 土层的土壤容重($r = -0.72, p < 0.05$)及 pH 值($r = -0.63, p < 0.05$)存在显著负相关关系,说明表层土壤中的含盐量及土壤容重水平对作物产量具有直接的负面影响;同时玉米产量与叶面积指数($r = 0.71, p < 0.05$)等呈显著正相关关系。说明土壤容重、pH 值和全盐量等是盐碱地影响作物产量的关键限制因素。土壤容重和 pH 值($r = 0.37$)、全盐量($r = 0.53$)呈正相关关系。对于 20—40 cm 土层,其土壤理化指标之间及其与玉米产量之间的相关趋势与 0—20 cm 土层相似,但相关性略低于表层土壤,这反映了不同土层深度下土壤性质的差异及其对作物生长的影响程度不同。

表 4 玉米产量和生长量与土壤 0—20 cm 理化性状的相关性分析

Table 4 Correlation analysis of maize yield and growth with physico-chemical properties of soil 0—20 cm

项目	容重	孔隙度	pH 值	含盐量	株高	茎粗	叶面积指数	产量
容重	1							
孔隙度	-0.861**	1						
pH 值	0.374	-0.225	1					
含盐量	0.532	-0.309	0.732*	1				
株高	-0.135	0.015	-0.733*	-0.525	1			
茎粗	-0.227	0.322	-0.597	-0.435	0.564	1		
叶面积指数	-0.549	0.320	-0.799**	-0.701*	0.853**	0.620	1	
产量	-0.723*	0.536	-0.635*	-0.629	0.549	0.355	0.713*	1

注:* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

表 5 玉米产量和生长量与土壤 20—40 cm 理化性状的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of maize yield and growth with physico-chemical properties of soil 20—40 cm

项目	容重	孔隙度	pH 值	含盐量	株高	茎粗	叶面积指数	产量
容重	1							
孔隙度	-0.663*	1						
pH 值	0.033	-0.132	1					
含盐量	0.391	-0.232	0.633*	1				
株高	-0.186	0.260	-0.662*	-0.316	1			
茎粗	-0.428	0.543	-0.248	-0.071	0.564	1		
叶面积指数	-0.427	0.558	-0.509	-0.453	0.853**	0.620	1	
产量	-0.366	0.431	-0.389	-0.701*	0.549	0.355	0.713*	1

注:* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著;** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

通过上述相关性分析筛选出相互之间作用较大的指标,采用隶属函数法对其进行综合评价。不同施用微藻肥处理的指标综合评定结果见表 6。其中 W₂N₂ 处理各指标隶属函数平均值最大(0.526),即施用 II 号

微藻肥 30 L/hm² 条件下,盐渍土的改良效果与玉米的增产效果均显著优于其他处理。因此,针对土默川平原盐渍土改良并种植玉米作物时,为了促进产量的增加,建议使用 II 号微藻肥且施用量为 30 L/hm²。

表 6 不同处理隶属函数法综合评价结果

Table 6 Comprehensive evaluation results of different treatments with membership function method

处理	各指标的隶属函数值									均值	排序
	容重	孔隙度	pH 值	含盐量	株高	茎粗	叶面积指数	百粒重	产量		
CK	0.42	0.42	0.57	0.51	0.52	0.57	0.55	0.30	0.36	0.470	10
W ₁ N ₁	0.51	0.49	0.36	0.42	0.58	0.33	0.46	0.63	0.55	0.480	7
W ₁ N ₂	0.63	0.62	0.65	0.38	0.43	0.45	0.35	0.43	0.38	0.479	8
W ₁ N ₃	0.52	0.54	0.42	0.66	0.44	0.38	0.57	0.39	0.33	0.474	9
W ₂ N ₁	0.45	0.37	0.55	0.56	0.65	0.58	0.54	0.43	0.38	0.502	4
W ₂ N ₂	0.52	0.36	0.56	0.54	0.64	0.44	0.57	0.62	0.48	0.526	1
W ₂ N ₃	0.45	0.42	0.54	0.50	0.64	0.59	0.64	0.40	0.45	0.513	2
W ₃ N ₁	0.45	0.63	0.55	0.51	0.39	0.50	0.41	0.35	0.61	0.489	6
W ₃ N ₂	0.58	0.34	0.45	0.63	0.46	0.47	0.54	0.51	0.54	0.503	3
W ₃ N ₃	0.58	0.55	0.57	0.34	0.39	0.62	0.51	0.57	0.37	0.500	5

3 讨论

盐碱地是中国宝贵的耕地资源,其改良工作对于保障国家粮食安全、稳固现有耕地面积及维持粮食生产自给自足的国家战略具有重要的意义^[13]。过高的盐分含量会导致土壤表面硬化,透水性降低,进而影响植被的生长发育,降低作物产量^[14]。

3.1 微藻肥对土壤容重和孔隙度的影响

土壤容重和孔隙度可以调节土壤的紧实状况,影响养分转化,是衡量土壤结构和评价土壤质量的重要参数,适宜的土壤容重和孔隙度有利于作物根系的生长发育^[15-16]。E. Yilmaz 等^[17]对不同微藻生物肥料的施用进行了研究,发现单一添加小球藻和添加蛭石都可以改善土壤团聚体的稳定性。罗光宏等^[18]研究发现,施用微藻肥对种植一茬娃娃菜后的土壤质地影响较为明显,随着微藻肥施用量的增加,土壤容重减小,孔隙度增加,表明微藻肥改善了土壤结构,提高了疏松度。本研究也得到相似结果,与对照组相比,施用微藻肥可以显著增加土壤孔隙度,降低土壤容重,这可能是由于微藻在土壤中生长时会进行细胞分裂和膨大,从而占据一定的空间,这一过程有助于在土壤中形成微小的空隙,从而增加土壤孔隙度;微藻细胞会通过自身的生命活动放氧及代谢产物—细胞多糖,促使土壤微粒相互黏结,增加土壤孔隙度,从而降低土壤容重^[19];微藻死亡后,其细胞会逐渐降解会释放有机物,这一过程也会增加土壤孔隙度,进而降低土壤容重。

3.2 微藻肥对土壤 pH 值和含盐量的影响

土壤 pH 值和含盐量是衡量盐碱地土壤盐碱程度与改良效果的重要指标。土壤 pH 值过高会影响土壤微生物的活动,使土壤肥力下降,不利于作物的营养吸收。土壤盐分过高会导致土壤表层板结,土壤

透气和透水性差,影响作物的生长发育,造成作物缺苗或死亡,使作物产量直接减少。盐碱地通常表现为高盐度、高 pH 值、低渗透性和易于表面硬化,许多作物难以生存^[20]。边建文等^[21]的研究表明微藻中部分有机质将以胞外聚合物的形态被排放到土壤中,这些胞外聚合物有利于维护土壤适宜的 pH 值和含盐量。崔丽洋等^[22]的研究表明微藻在盐碱土表层生长时,一定程度限制土壤盐分的迁移。本研究也表明施用微藻肥可有效降低土壤 pH 值和含盐量。这可能是由于一方面微藻具有丰富的胞壁酸和二氨基庚二酸,可以调节 pH 值;微藻在进行生命活动时分泌有机酸或进行离子交换,能够调和土壤的酸碱环境。另一方面微藻具有吸收盐分的能力,可以将土壤中的盐分 and 无机盐转移到自身细胞内,从而降低土壤中的盐分含量。

3.3 微藻肥对作物产量的影响

施用微藻肥可以促进玉米增产,本研究表明施用微藻肥处理玉米产量较对照 CK 平均提高 29.69%。郝焕芳等通过田间试验,研究了藻类活性生物肥在马铃薯上的肥效。测试结果显示,随着肥料浓度的增加,马铃薯的产量呈上升趋势,施用浓度为 3 L/hm², 6 L/hm² 时分别较对照组增产 33.59% 和 36.95%^[23]。代小等^[24]对藻类活性细胞生物肥对苜蓿草产量及品质的影响进行了研究,结果表明,施用生物肥料后,两次作物产量平均增产 502.50 kg/hm²,增幅达 15.07%。宋健^[25]研究发现水稻田中的土著固氮蓝藻有效促进了水稻苗期的生长,并提高了土壤肥力,为作物生长提供了宝贵的氮素资源。R. V. Kapoore 等^[26]的研究证实了微藻在农业生产中的有益特性。Lee Sangmoo 等的研究揭示了绿色微藻可以增强谷物和蔬菜作物的生长和生物量积累^[27]。相关性分析显示玉米产量与土壤容重、pH 值、含盐量存在显著负相关,与土壤孔隙度、玉米株高、茎粗、叶面积存在显

著正相关,这可能是由于土壤容重过大、土壤 pH 值和盐分含量过高会限制玉米根系生长,降低根系吸收能力,进而影响玉米的生长和产量,而适宜的土壤孔隙度有利于玉米根系生长,增加根系吸收面积,同时良好的孔隙结构还能促进土壤中微生物活动,加速有机质的分解和养分释放,进而促进玉米的生长发育,提高产量。通过合理施肥措施改善土壤理化性质,促进作物生长,是作物获得高产的关键因素。

3.4 不足与展望

本研究主要采用传统的理化分析方法和生长指标测定,虽然这些方法在农业研究中广泛应用,但可能未能充分揭示微藻肥对土壤和作物影响的深层次机理。此外,本研究仅在土默川平原进行了试验,未能涵盖更多不同类型的盐碱地,限制了结果的普适性和推广性。未来研究可以进一步细化微藻肥的施用方式和剂量。同时,深入分析微藻肥对玉米根系生长、养分吸收及光合作用等关键生理生态过程的影响,揭示微藻肥促进玉米增产的内在机制,从而为玉米的高效种植提供新的理论支撑。在此基础上,未来研究可将微藻肥与其他土壤改良方法及作物种植技术相结合,进行综合评估与优化,以期构建更为全面且高效的盐渍土改良与作物增产技术体系。

4 结论

(1) 经过微藻肥的施用处理,盐渍化土壤的物理性质发生了显著变化。具体表现为降低土壤容重,提高土壤孔隙度。在 0—20 cm 土层范围内,各微藻肥处理下,土壤容重随着施肥量的增加均呈现先降低后升高的趋势,孔隙度则表现出先升高后降低的趋势;在 20—40 cm 土层中,土壤容重和孔隙度的变化趋势与 0—20 cm 土层相一致。

(2) 不同微藻肥处理不同程度地降低了土壤 pH 值和全盐含量。在 0—20 cm 土层,各微藻肥条件下,土壤 pH 值随施肥量的增加大致呈先降低后升高的趋势,而土壤全盐量大致呈升高的趋势;在 20—40 cm 土层,土壤 pH 值呈先升高后降低的趋势,土壤全盐量呈先降低后升高的趋势。

(3) 3 种微藻肥不同程度地提升盐碱化耕地玉米的株高、茎粗、叶面积指数及产量。其中,Ⅱ号微藻肥对玉米株高和叶面积的增长促进作用更为显著,而Ⅲ号微藻肥则更有利于玉米茎粗的生长。在Ⅰ号微藻肥条件下,玉米产量随施肥量的增加呈现下降趋势;而在Ⅱ号和Ⅲ号微藻肥条件下,玉米产量则随施肥量的增加先增加后减少。

盐碱地耕地玉米产量的主要影响因素有土壤容

重和 pH 值,且以 0—20 cm 土层结果更加显著。通过隶属度函数对土壤特性、玉米生长发育以及产量进行综合评价,在土默川平原盐渍化土壤玉米种植中,选用Ⅱ号肥施用 30 L/hm² 效果最显著。

参考文献 (References)

- [1] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
Huang Changyong. Pedology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [2] 徐晓腾.苏打盐碱地水田“淡化表层”土壤的物理、化学及生物学特征[D].吉林 长春:吉林农业大学,2011.
Xu Xiaoteng. Soil physical, chemical and biological properties of saline-alkali paddy field “surface dilution” [D]. Changchun, Jilin: Jilin Agricultural University, 2011.
- [3] 王遵亲.中国盐渍土[M].北京:科学出版社,1993.
Wang Zunqin. Chinese Saline Soil [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd. 1993.
- [4] 杨劲松,姚荣江,王相平,等.防止土壤盐渍化,提高土壤生产力[J].科学,2021,73(6):30-34.
Yang Jinsong, Yao Rongjiang, Wang Xiangping, et al. Halt soil salinization, boost soil productivity [J]. Science, 2021,73(6):30-34.
- [5] 刘耀宗,张经元.山西土壤[M].北京:科学出版社,1992.
Liu Yaorong, Zhang Jingyuan. Shanxi Soil [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd. 1992.
- [6] 刘国强,王洪斌,郑勇.盐碱地专用肥研究进展[J].新疆师范大学学报(自然科学版),2017,36(4):50-54.
Liu Guoqiang, Wang Hongbin, Zheng Yong. Research progress of the research on the special fertilizer application of saline-alkali soil [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2017, 36(4): 50-54.
- [7] Rizwan M, Mujtaba G, Memon S A, et al. Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,92:394-404.
- [8] 黎尚豪,叶清泉,刘富瑞,等.我国的几种蓝藻的固氮作用[J].水生生物学集刊,1959(4):429-439.
Li Shanghao, Ye Qingquan, Liu Furui, et al. The nitrogen fixation of some blue-green algae from Chinese rice-fields [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1959(4):429-439.
- [9] 刘永定,黎尚豪.土壤藻类及其生理生态[J].水生生物学报,1993,17(3):272-277.
Liu Yongding, Li Shanghao. On soil algae and their physiological ecology [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1993,17(3):272-277.
- [10] 秦青,张文举,张涛.海藻有机肥的研究进展[J].中国农学通报,2001,17(1):46-47.
Qin Qing, Zhang Wenju, Zhang Tao. Research progress of

- seaweed organic fertilizer [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2001,17(1):46-47.
- [11] 黄飞.蛋白核小球藻对无机砷的吸附吸收及作用机制[D].浙江 杭州:浙江大学,2018.
Huang Fei. The adsorption and uptake of inorganic arsenic by *Chlorella porenoidosa* and the interaction mechanism [D]. Hangzhou Zhejiang: Zhejiang University, 2018.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis [M]. 3th ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [13] 刘森,王志春,杨福,等.生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J].水土保持学报,2021,35(3):1-8.
Liu Miao, Wang Zhichun, Yang Fu, et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):1-8.
- [14] 闫洪,仲生柱,温晓亮,等.不同改良剂对盐碱地向日葵农艺性状及产量的影响[J].北方农业学报,2021,49(3):36-40.
Yan Hong, Zhong Shengzhu, Wen Xiaoliang, et al. Effects of different amendments on agronomic characteristics and yield of sunflower in saline-alkali soil [J]. Journal of Northern Agriculture, 2021,49(3):36-40.
- [15] 孙涛.不同耕作方式及施肥对黑土理化性质的影响[D].黑龙江 哈尔滨:东北农业大学,2009.
Sun Tao. Tillage and fertilizer effects on soil physico-chemical properties of black soil [D]. Harbin Heilongjiang: Northeast Agricultural University, 2009.
- [16] 庞喆,王启龙,李娟.不同土壤改良剂对陕北低洼盐碱地土壤理化性质及水稻产量和经济效益的影响[J].中国农业科技导报,2023,25(6):174-180.
Pang Zhe, Wang Qilong, Li Juan. Effects of different soil amendments on soil physical and chemical properties, rice yield and economic benefits in low-lying saline alkali land in Northern Shaanxi [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023,25(6):174-180.
- [17] Yilmaz E, Sönmez M. The role of organic/bio-fertilizer amendment on aggregate stability and organic carbon content in different aggregate scales [J]. Soil and Tillage Research, 2017,168:118-124.
- [18] 罗光宏,崔岩,刘海燕,等.施用微藻肥对两类草本作物生长及土壤性质的影响[J/OL].生物学杂志,1-6[2024-12-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1081.Q.20241202.1047.002.html>.
- Luo Guanghong, Cui Yan, Liu Haiyan, et al. Effects of microalgae fertilizer on the growth of two types of herb crops and soil properties [J/OL]. Journal of Biology, 1-6[2024-12-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1081.Q.20241202.1047.002.html>.
- [19] 林卫红,张英奇.活性微藻生物肥技术对盐碱土壤的改良[J].农业知识,2022(4):27-28.
Lin Weihong, Zhang Yingqi. Improvement of saline-alkali soil by active microalgae bio-fertilizer technology [J]. Agriculture Knowledge, 2022(4):27-28.
- [20] Song Jinnan, Wang Yaqi, Li Faliang, et al. Effect of saline soil and amino acids on quality and yield of field Tartary buckwheat [J]. Land Degradation & Development, 2021,32(8):2554-2562.
- [21] 边建文,王萌,刘保友,等.小球藻对小麦生长及土壤性质的影响[J].中国农学通报,2023,39(12):8-12.
Bian Jianwen, Wang Meng, Liu Baoyou, et al. Effects of chlorella on wheat growth and soil properties [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023,39(12):8-12.
- [22] 崔丽洋,谢茜,毛青,等.土壤微藻对盐胁迫的响应及其对盐渍化土壤的改良作用[J].地球科学,2023,48(11):4270-4278.
Cui Liyang, Xie Xi, Mao Qing, et al. Response of soil microalgae to salt stress and its improvement effect on salinized soil [J]. Earth Science, 2023,48(11):4270-4278.
- [23] 郗焕芳,谢文娟,陈际才.“地福来”藻类活性细胞生物肥在冬马铃薯上的同田对比试验[J].农业科技通讯,2018(11):146-148.
Xi Huanfang, Xie Wenjuan, Chen Jicai. Comparative experiment of “Difulai” algae active cell biological fertilizer on winter potato in the same field [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2018(11):146-148.
- [24] 代小,木其叶乐,敖敦,等.藻类活性细胞生物肥对苜蓿草产量及品质的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2018(22):164-167.
Dai Xiao, Dai Xiao, Ao Dun, et al. Effect of algae active cell bio-fertilizer on alfalfa yield and quality [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2018(22):164-167.
- [25] 宋健.稻田蓝藻生态多样性及固氮蓝藻对水稻促生作用的研究[D].吉林 长春:吉林农业大学,2023.
Song Jian. Study on the ecological diversity of cyanobacteria in rice fields and the nitrogen-fixing cyanobacteria promotion effect on rice [D]. Changchun Jilin: Jilin Agricultural University, 2023
- [26] Kapoore R V, Wood E E, Llewellyn C A. Algae biostimulants: A critical look at microalgal biostimulants for sustainable agricultural practices [J]. Biotechnology Advances, 2021,49:107754.
- [27] Lee Sangmoo, Ryu Choongmin. Algae as new kids in the beneficial plant microbiome [J]. Frontiers in Plant Science, 2021,12:599742.