

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.043; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.043.

陈士超, 张印, 郭富强, 等. 微藻肥对河套灌区盐渍化农田玉米生长及产量的影响[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):174-183.

Chen Shichao, Zhang Yin, Guo Fuqiang, et al. Influence of microalgae fertilizers on maize growth and yield in salinized farmland in Hetao Irrigation Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):174-183.

微藻肥对河套灌区盐渍化农田玉米生长及产量的影响

陈士超^{1,2}, 张印¹, 郭富强¹, 周彦心¹, 段鹏程³, 孟燕辉¹, 李慧欣¹

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 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, 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)

摘要: [目的] 探索利用绿色环保生物肥改良土壤, 促进作物生长发育和产量形成, 在应对农业面源污染、农业生态等问题, 维持农田土壤健康持续、保障粮食安全等方面具有重要意义。[方法] 以“先玉 3131”玉米 (*Zea mays* L.) 为试材, 在内蒙古河套灌区典型盐渍化农田开展单因素随机区组施肥试验, 通过观测不同生育时期玉米的农艺、光合及产量性状, 系统评估 3 种微藻肥 (Fa, Fb, Fc) 及不同施用量 (0 L/hm², 15 L/hm², 30 L/hm², 45 L/hm²) 对玉米生长发育及产量的影响。[结果] (1) 施用微藻肥的玉米各生育时期株高、叶面积指数均显著高于不施微藻肥 ($p < 0.05$); 随施肥水平升高, 玉米各生育时期株高、茎粗、叶面积指数均呈先升高后降低的总体变化趋势, 均在施肥水平为 30 L/hm² 时达到峰值。(2) 施用微藻肥的玉米各生育时期净光合速率、蒸腾速率、叶绿素相对含量均高于不施微藻肥; 随施肥水平升高, 3 项指标呈先升高后降低的总体变化趋势, 最大值均出现在 30 L/hm² 施肥水平。(3) 施用微藻肥提高了玉米果穗穗长、穗粗、行粒数、穗粒重、穗轴重以及百粒重和产量, 降低了果穗秃尖长。[结论] 施用 Fc 微藻肥更有利于促进增产, 最有利于增产的施肥水平为 30 L/hm²。

关键词: 微生物藻肥; 玉米; 生长; 产量; 河套灌区

中图分类号: S147.2; S513

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0174-10

Influence of microalgae fertilizers on maize growth and yield in salinized farmland in Hetao Irrigation Area

Chen Shichao^{1,2}, Zhang Yin¹, Guo Fuqiang¹, Zhou Yanxin¹, Duan Pengcheng³, Meng Yanhui¹, Li Huixing¹

(1. College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Aeolian Physics and Desertification Engineering, Hohhot 010018, China; 3. Inner Mongolia Aerge Life Science Co., Ltd., Ulanqab, Inner Mongolia 011800, China)

Abstract: [Objective] This study explores the utilization of green and environmentally friendly biofertilizers for soil amelioration to promote crop growth and yield formation, which is of great significance in addressing agricultural non-point source pollution, agricultural ecological challenges, and other issues, maintaining sustainable soil health in farmland, and ensuring food security. [Methods] Using “Xianyu 3131” maize (*Zea mays* L.) as the test material, a single-factor randomized block fertilization experiment was conducted in typical salinized farmland in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia. The agronomic, photosynthetic, and yield traits of maize at different growth stages were observed to systematically evaluate the influence of three microalgae fertilizers (Fa, Fb, Fc) and different application amounts (0 L/hm², 15 L/hm², 30 L/hm², 45 L/hm²) on the maize growth, development, and yield. [Results] (1) The plant height and leaf area index of maize treated with microalgae fertilizer were significantly higher than those without microalgae fertilizer at all growth stages ($p < 0.05$). With the increase of application levels, the plant height, stem diameter, and leaf area index of maize at

收稿日期: 2025-04-13

修回日期: 2025-05-04

接受日期: 2025-06-01

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水生态修复技术研究 (2022YFHH0088)

第一作者: 陈士超 (1977—), 男, 内蒙古赤峰市人, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化防治与资源环境方面的教学与研究工作。E-mail: chenshichao2005@126.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

different growth stages generally showed a trend of first increasing and then decreasing, all reaching peak values at an application level of 30 L/hm². (2) The net photosynthetic rate, transpiration rate, and chlorophyll index of maize treated with microalgae fertilizer were higher than those without microalgae fertilizer across all growth stages. With increasing application levels, these three indicators showed an overall trend of initial increasing and then decreasing, reaching their maximum values at the 30 L/hm² application level. (3) The application of microalgae fertilizers increased maize ear length, ear diameter, kernels per row, kernel weight per ear, cob weight, 100-kernel weight, and grain yield, while reducing the length of barren tips on ears. [Conclusion] The application of Fc microalgae fertilizer is more beneficial to yield increase, with 30 L/hm² being the optimal application level.

Keywords: microalgae fertilizer; maize; growth; yield; Hetao Irrigation Area

内蒙古河套灌区作为我国三大灌区之一,承担着重要的商品粮油生产功能^[1]。长期粗放型灌溉和盲目施肥的耕作方式诱发农田土壤次生盐渍化和农业面源污染^[2],导致养分利用效率降低、耕地质量退化、水体富营养化加剧进而造成生态系统恶化^[3],严重威胁灌区农业可持续发展。因此,消减农业面源污染,维系农田土壤健康以保障农田可持续生产,已成为学界目前高度关注的粮食安全问题 and 重要农业生态问题。

微生物藻肥(以下简称“微藻肥”)是以藻类或藻类提取物为原料,经发酵工艺或复合工艺制备而成的功能性生物肥料^[4]。藻肥在欧盟 IMO(国际海事组织)、ECOCERT(法国国际生态认证中心)、北美 OMIR(有机农业研究国际联盟)、日本 JAS(日本有机农业)标准和中国有机食品技术规范中被认定为有机农业应用产品^[5]。将海藻用作土壤肥料可追溯至公元 4 世纪,12 世纪中叶在欧洲沿海国家和地区广泛使用^[6]。通过技术加工制备的海藻肥于 1949 年诞生于英国^[7],20 世纪 80、90 年代,在欧美发达国家得到重视和发展,我国也开始有研究报道^[8]。但早期的藻肥多是海藻经发酵工艺制成的肥料,经发酵处理后,大部分成分失去生物活性。2010 年以后,我国开始有利用淡水藻活性细胞制备活性微藻生物肥并应用的研究报道,2020 年以来成为研究的热点。研究表明,微藻肥能够提高种子^[9]和根系^[10]活力、种子萌发率^[11]和植物坐果率^[12],促进种子萌发^[11,13],胚根、幼芽生长和开花^[9,14-15],提高植物光合色素含量和光合效率^[16]、叶片细胞的渗透调节能力^[14]、Vc 含量^[17]、蛋白质含量和可溶性糖含量^[17-18],进而提高干物质含量、作物产量和品质^[10,16-19]。因其养分全、功能多且绿色环保,在应对农业生态、面源污染、粮食安全等问题方面有着广阔的应用前景。

玉米是河套灌区重要的粮食和饲料作物,土壤盐渍化对玉米的生长发育有很强的抑制作用。当前对于微藻肥在农作物上的应用研究多集中于水稻(*Oryza*

sativa L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)等作物上,且多为单一藻种的藻肥,采用多种淡水微藻混配制成的微藻肥对玉米尤其是在盐渍化土壤条件下的研究尚处于空白。本研究以“先玉 3 131”玉米(*Zea mays* L.)为试材,将 3 种绿色环保型微藻活性细胞液体生物肥用于内蒙古河套灌区盐渍化农田生态修复和作物营养,筛选适配高盐环境的微藻肥种类及阈值施用量,为盐渍化农田绿色增产提供理论依据,对实现农业农田控肥培肥、面源污染减源治源、土地生产提质增效、生态环境协调健康系统目标具有现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古河套灌区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市,地处黄河“几字弯”顶部、黄河内蒙古段左岸。小麦、玉米、向日葵是本区三大农作物。试验于内蒙古巴彦淖尔市五原县新公中镇开展,坐标为 40°48′51″N, 111°42′40″E,地处河套灌区中心位置。中温带大陆性气候,年日照时数 3 263 h,年均气温 6.1 °C,年积温 3 362.5 °C,无霜期 117~136 d,年降雨量 170 mm,年蒸发量 2 068 mm^[20],由于风大雨少,蒸发强烈,冬春土壤盐分表聚现象严重,土壤盐渍化类型为硫酸盐-氯化物型^[21],0—20 cm 土层土壤 pH 值为 8.96,有机质含量为 6.65 g/kg,全盐量为 5.55 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 31.34 mg/kg、18.31 mg/kg、48.45 mg/kg。

1.2 试验材料

供试玉米品种为“先玉 3131”,购于当地农资公司。内蒙古阿尔格生命科学有限公司提供 3 种“多株蓝藻和绿藻活性细胞光合营养复合体”液体肥,肥料主要成分和性状见表 1。

1.3 试验设计

选取地势平坦、形状整齐、地力水平均匀的地块布设随机区组试验,每个小区面积为 280 m²(4 m×70 m)。3 种微藻肥各设 0 L/hm²,15 L/hm²,30 L/hm²,

45 L/hm²共4个施肥水平,分别记做Fa₀, Fa₁, Fa₂, Fa₃, Fb₀, Fb₁, Fb₂, Fb₃, Fc₀, Fc₁, Fc₂, Fc₃。Fa₀, Fb₀, Fc₀均为不施微藻肥对照(CK)处理,只设1组。试验共10个处理,每个处理3次重复,共30个试验小区。玉米种植密度为6.8万株/hm²,行距50 cm,株距30 cm,符合河套灌区玉米高产栽培标准。播种前施用底肥,施肥种类及用量分别为防渗漏长效功能肥(N-

P₂O₅-K₂O≥48%)278 kg/hm²和黄腐酸钾(腐殖酸HA≥55%;矿源黄腐酸FA≥50%)222 kg/hm²。灌溉方式统一采用滴灌,全生育期仅施用一次微藻肥,播种后随首次滴灌施入,后期不追施其他肥料。除微藻肥种类和施肥水平为可变因素外,各处理播种规格、灌水、田间管理等措施均与当地玉米生产种植保持一致。2024年5月16日播种,10月7日收获。

表1 微藻肥主要成分和性状

Table 1 Main components and traits of microalgae fertilizers

肥料编号	主要成分及配比	性状
Fa	蛋白核小球藻(<i>Chlorella pyrenoidosa</i>):鱼腥藻(<i>Anabaena</i>)=1:1	淡绿色液体
Fb	蛋白核小球藻:鱼腥藻:单歧藻(<i>Tolypothrix</i>)=5:4:1	淡绿色液体
Fc	蛋白核小球藻:鱼腥藻:单歧藻=2:1:1	淡绿色液体

1.4 指标观测

在每个试验小区非边缘位置随机标记出3个2 m×5 m观测样方。在每个观测样方内选取5株标准株,分别在玉米拔节期(6月15日)、开花期(7月10日)、灌浆期(8月29日)、乳熟期(9月20日)观测玉米农艺性状指标和光合性状指标。收获后观测玉米果穗性状和产量相关指标。每个试验小区共观测15株标准株,取平均值。各主要指标观测方法如下:

株高:用卷尺测量各标准株从根部地面至植株顶端的高度(cm);茎粗:用游标卡尺测量各标准株穗位处直径(mm);穗位3叶叶面积:用卷尺测量穗位3叶(果穗的上、中、下三叶)叶长、最大叶宽,按下式计算单片叶面积,取3片叶面积平均值。

$$A = L \times W \times 0.75 \quad (1)$$

式中:A为单片叶面积(cm²);L为叶片长度(cm);W为最大叶宽(cm);0.75为玉米叶片叶面积回归系数。

净光合速率和蒸腾速率:使用GFS-3000便携式光合仪,在晴天上午9:00—11:00测定玉米穗位3叶的净光合速率[μmol/(m²·s)]和蒸腾速率[mmol/(m²·s)]。

叶绿素相对含量(SPAD):使用LD-YA便携式叶绿素测定仪测定玉米穗位3叶叶绿素相对含量。

果穗性状和产量相关指标:玉米收获后,用直尺、游标卡尺测量果穗穗长(cm)、穗粗(cm)和秃尖长(cm);对玉米果穗进行105℃,30 min杀青,脱粒,烘干至恒重,用天平分别测量穗粒重(g)、穗轴重(g)、百粒重(g),计算理论产量(kg/hm²)。

理论产量计算公式为:

$$Q = M \cdot n \quad (2)$$

式中:Q为理论产量(kg/hm²);M为单株穗粒重(kg);n为单位面积种植玉米株数(株/hm²)。

1.5 数据分析

使用Excel 2019进行数据整理、作图;使用IBM

SPSS Statistics 27.0对数据进行方差分析、显著性检验,使用Origin 2021进行皮尔逊相关性分析、图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对玉米生长的影响

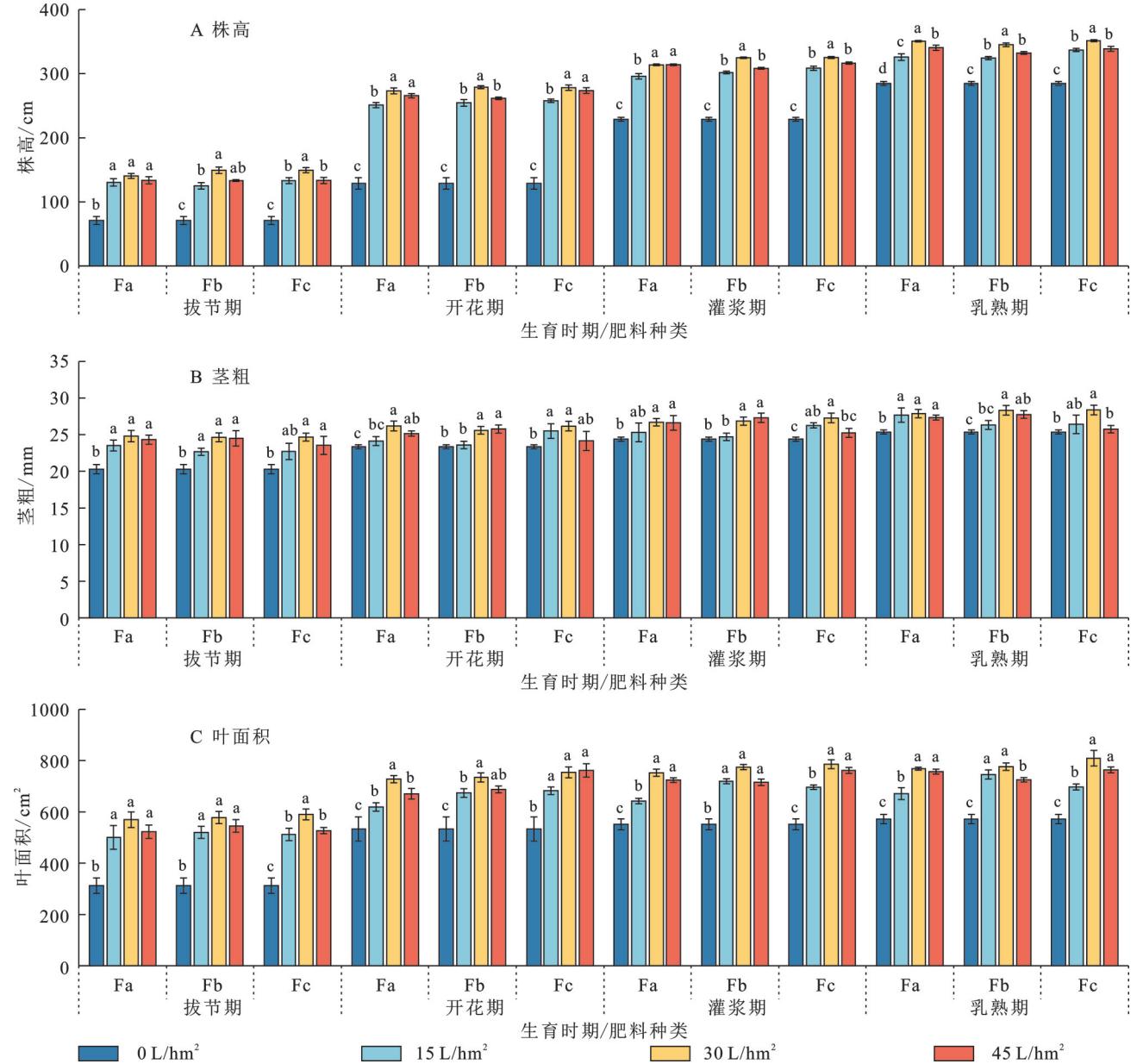
2.1.1 玉米株高 由图1A可以看出,施用微藻肥的玉米各生育时期株高均显著高于不施微藻肥,株高增幅13.88%~116.79%。3种微藻肥对玉米各生育时期株高的影响变化规律相似,表现为随施肥水平升高,玉米株高呈先升高后降低变化,株高最大值均出现在30 L/hm²施肥水平。除拔节期的Fa, Fb,开花期的Fa, Fc,灌浆期的Fa以外,同一生育时期30 L/hm²施肥水平下的玉米株高均显著高于其他施肥水平。由表2可知,施用3种微藻肥对玉米拔节期、开花期的株高影响均没有显著差异;在灌浆期,3种微藻肥处理玉米株高平均值顺序为Fc>Fb>Fa, Fb与Fa, Fc差异不显著, Fa与Fc差异显著;在乳熟期,3种微藻肥处理玉米株高平均值顺序为Fc>Fa>Fb, Fa与Fb, Fc差异不显著, Fb与Fc差异显著。

2.1.2 玉米茎粗 由图1B看出,施用微藻肥的玉米各生育时期茎粗均高于不施用微藻肥,茎粗增幅0.98%~22.17%。3种微藻肥对玉米各生育时期茎粗的影响变化规律相似,表现为随施肥水平升高,玉米茎粗呈先升高后降低的变化趋势,除开花期和灌浆期的Fb外,茎粗最大值均出现在30 L/hm²施肥水平。由表2可知,3种微藻肥处理下,玉米各生育时期茎粗平均值均无显著差异。

2.1.3 玉米穗位3叶叶面积 由图1C看出,施用微藻肥的玉米各生育时期穗位3叶叶面积均显著高于不施微藻肥,叶面积增幅16.10%~88.96%。3种微

藻肥对玉米各生育时期叶面积的影响变化规律相似,表现为随施肥水平升高,玉米叶面积呈先升高后降低变化,除开花期 Fc 外,叶面积最大值均出现在 30 L/hm² 施肥水平。由表 2 可知,施用 3 种微藻肥对玉米拔节期、乳熟期的叶面积影响均无显著差异;

在开花期,3 种微藻肥处理玉米叶面积平均值顺序为 Fc>Fb>Fa,Fb 与 Fa,Fc 差异不显著,Fa 与 Fc 差异显著;在灌浆期,3 种微藻肥处理玉米叶面积平均值顺序也为 Fc>Fb>Fa,Fa 与 Fb 差异不显著,Fc 与 Fa,Fb 差异显著。



注:同一生育时期、同种微藻肥不同小写字母表示不同施肥水平间差异显著($p < 0.05$),下同。

图 1 不同微藻肥及施用水平下的玉米株高、茎粗、叶面积

Fig. 1 Maize plant, stem diameters, Leaf area of third leaf from maize ear heights under different microalgal fertilizers and application levels

2.2 不同施肥处理对玉米光合性状的影响

2.2.1 玉米净光合速率 由图 2A 看出,在各生育时期,施用微藻肥的玉米净光合速率均高于不施微藻肥,在灌浆期和乳熟期显著高于不施微藻肥,净光合速率整体增幅 2.68%~187.32%。在各生育时期,3 种微藻肥对玉米净光合速率的影响变化规律相似,表现为随施肥水平升高,玉米净光合速率呈先升高

后降低变化,净光合速率最大值均出现在 30 L/hm² 施肥水平。在灌浆期和乳熟期,30 L/hm² 施肥水平下的玉米净光合速率均显著高于其他施肥水平。由表 3 可知,施用 3 种微藻肥对玉米开花期和乳熟期的净光合速率的影响均没有显著差异;在灌浆期,3 种微藻肥处理玉米净光合速率平均值顺序为 Fc>Fb>Fa,Fb 与 Fa,Fc 差异不显著,Fa 与 Fc 差异显著。

表 2 不同微藻肥对玉米农艺性状影响的组间差异分析

Table 2 Analysis of intergroup differences in influence of different microalgae fertilizers on maize agronomic traits

生育时期	微藻肥种类	株高/cm	茎粗/mm	叶面积指数/cm ²
拔节期	Fa	134.88±2.99A	24.21±0.41A	531.06±20.38A
	Fb	135.79±3.12A	23.93±0.45A	547.80±14.17A
	Fc	138.61±2.93A	23.65±0.58A	543.14±12.98A
开花期	Fa	263.23±2.90A	25.16±0.36A	688.44±13.60B
	Fb	264.99±2.86A	24.99±0.36A	724.50±12.43AB
	Fc	269.79±2.82A	25.28±0.59A	732.66±13.86A
灌浆期	Fa	307.81±2.33B	26.21±0.56A	707.63±8.29B
	Fb	311.61±2.21AB	26.28±0.40A	723.01±6.25B
	Fc	316.64±1.91A	26.27±0.35A	748.08±10.76A
乳熟期	Fa	338.91±3.00AB	27.63±0.38A	714.82±16.28A
	Fb	333.87±2.28B	27.47±0.37A	736.58±10.98A
	Fc	342.25±2.07A	26.85±0.54A	756.81±14.70A

注:同一生育时期不同大写字母表示不同微藻肥组间差异显著($p<0.05$),下同。

2.2.2 玉米蒸腾速率 由图 2B 看出,在各生育时期,施用微藻肥的玉米蒸腾速率均高于不施微藻肥,除开花期 Fa, Fc 及灌浆期 Fa 以外的其他处理显著高于不施用微藻肥,蒸腾速率整体增幅 1.18%~174.71%。除乳熟期的 Fb 外,3 种微藻肥对玉米各生育时期蒸腾速率的影响变化规律相似,均表现为随施肥水平升高,玉米蒸腾速率呈先升高后降低变化,蒸腾速率最大值均出现在 30 L/hm² 施肥水平。除开花期的 Fb、灌浆期的 Fb 以及乳熟期的 Fb 以外,同一生育时期 30 L/hm² 施肥水平下的玉米蒸腾速率均显著高于其他施肥水平。由表 3 可知,施用 3 种微藻肥对玉米开花期的蒸腾速率影响无显著差异;在灌浆期,3 种微藻肥处理玉米蒸腾速率平均值顺序为 Fb>Fc>Fa, Fc 与 Fa, Fb 差异不显著, Fa 与 Fb 差异显著;在乳熟期,3 种微藻肥处理玉米蒸腾速率平均值顺序为 Fc>Fb>Fa, Fb 与 Fa, Fc 差异不显著, Fa 与 Fc 差异显著。

2.2.3 玉米叶绿素相对含量 由图 2C 看出,在各生育时期,施用微藻肥的玉米叶绿素均高于不施微藻肥,叶绿素整体增幅 1.45%~19.84%。3 种微藻肥对玉米各生育时期叶绿素的影响变化规律相似,表现为随施肥水平升高,叶绿素呈先升高后降低变化,最大值均出现在 30 L/hm² 施肥水平,但只是显著高于不施肥处理(除灌浆期 Fa),与其他施肥水平差异不显著。由表 3 可知,施用 3 种微藻肥对玉米开花期、乳熟期的叶绿素影响均无显著差异;在灌浆期,3 种微藻肥处理玉米叶绿素平均值顺序为 Fc>Fb>Fa, Fb 与 Fa, Fc 差异不显著, Fa 与 Fc 差异显著。

2.3 不同施肥处理对玉米果穗性状和产量的影响

由表 4 可知,施用微藻肥的玉米果穗穗长、穗粗、

行粒数、穗粒重、穗轴重以及百粒重和理论产量均大于不施微藻肥,而果穗秃尖长均小于不施微藻肥。穗长、穗粗、行粒数、穗粒重以及百粒重和理论产量均表现为随施肥水平升高呈先升高后降低变化,最大值均出现在 30 L/hm² 施肥水平;穗轴重也表现为随施肥水平升高呈先升高后降低变化, Fa, Fc 处理最大值出现在 30 L/hm² 施肥水平, Fb 处理最大值出现在 15 L/hm² 施肥水平;而果穗秃尖长表现为随施肥水平升高呈先降低后升高变化, Fa, Fc 处理最小值出现在 30 L/hm² 施肥水平, Fb 处理最小值出现在 15 L/hm² 施肥水平。穗行数没有表现出明显变化规律。从 3 种微藻肥处理的各项指标平均值来看, Fc 处理的玉米果穗穗长、穗粗、行粒数、穗粒重、穗轴重以及百粒重和理论产量均大于 Fa 和 Fb, 而果穗秃尖长小于 Fa 和 Fb, 施用 Fc 更能促进增产, Fa 次之且与 Fb 差异不大。

2.4 微藻肥处理玉米各项性状指标相关性

由表 5 可知,叶面积与茎粗,秃尖长与茎粗、净光合速率、穗粗,穗粒重与茎粗、叶绿素,穗轴重与茎粗、光合速率、穗粗,百粒重与株高、茎粗、秃尖长、穗轴重相关性均不显著;穗行数与其他各项指标相关性均不显著。除此以外,各项指标之间均存在显著或极显著相关性,其中穗行数与穗轴重、秃尖长与其他指标均呈负相关,其他生长、光合及各产量指标间均呈正相关。这在总体上说明,施用微藻肥通过促进玉米光合作用和营养生长进而促进干物质积累,降低秃尖长,提高产量。穗行数主要由玉米叶片数量决定,而成年植株叶片数量与品种有关^[22],因此,穗行数与其他各项指标相关性均不显著。

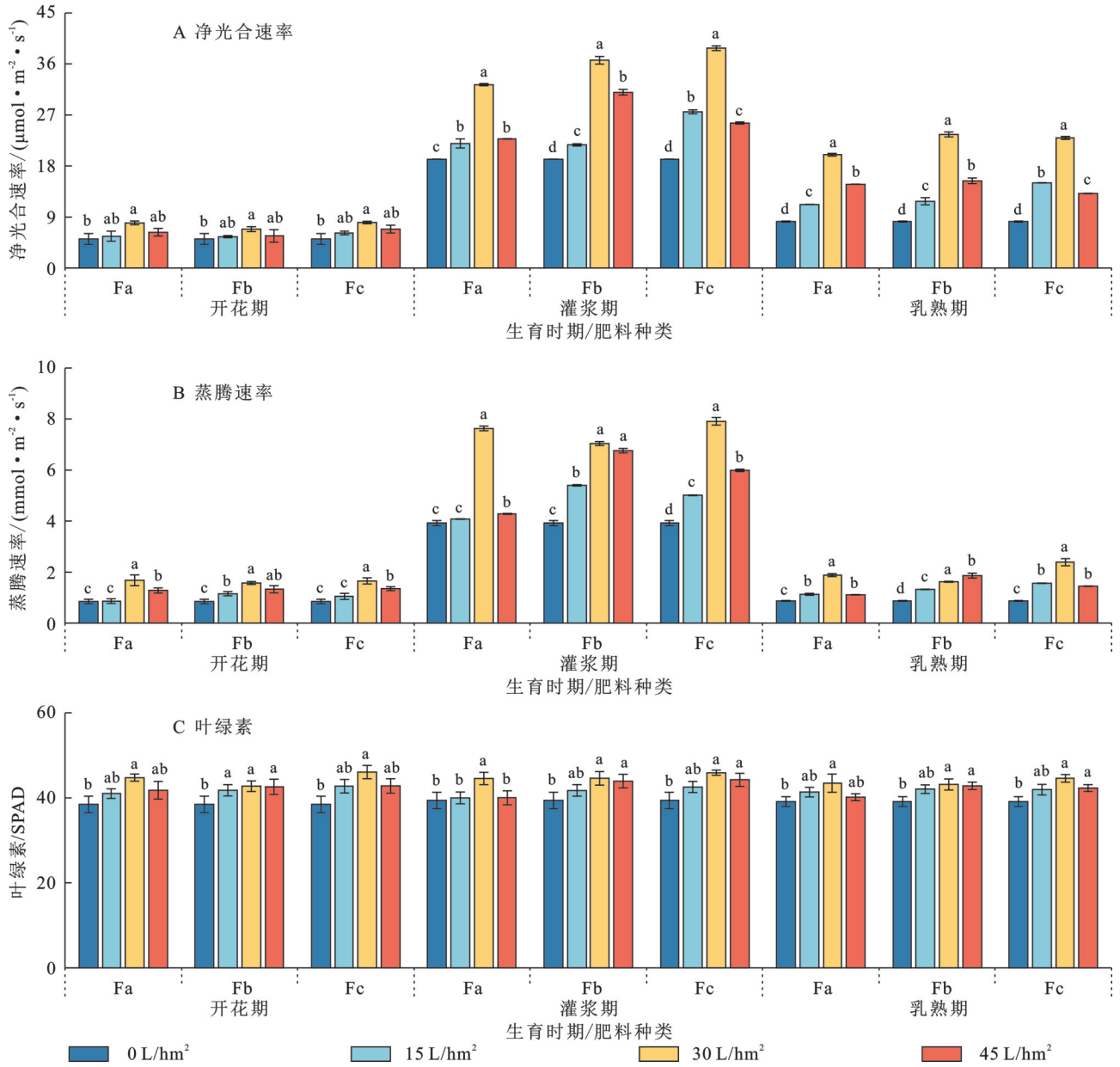


图 2 不同微藻肥及施用水平玉米净光合速率、蒸腾速率、叶绿素

Fig.2A Net photosynthetic rates、Transpiration rates、Relative chlorophyll content of maize under different microalgae fertilizers and application levels

表 3 不同微藻肥对玉米光合性状影响的组间差异分析

Table 3 Analysis of intergroup differences in influence of different microalgae fertilizers on maize photosynthetic traits

生育时期	微藻肥种类	净光合速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	蒸腾速率/ $(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	叶绿素相对含量
开花期	Fa	6.62±0.45A	1.27±0.46A	42.50±0.87A
	Fb	6.02±0.40A	1.35±0.27A	42.36±0.81A
	Fc	7.01±0.32A	1.35±0.33A	43.87±0.96A
灌浆期	Fa	25.71±1.28B	5.33±0.44B	41.51±0.94B
	Fb	29.79±1.67AB	6.40±0.20A	43.42±0.87AB
	Fc	30.63±1.56A	6.30±0.33AB	44.23±0.73A
乳熟期	Fa	15.32±0.97A	1.37±0.38B	41.65±0.86A
	Fb	16.91±1.34A	1.60±0.26AB	42.67±0.60A
	Fc	17.05±1.14A	1.80±0.46A	42.93±0.61A

表 4 不同微藻肥及施用水平玉米果穗性状和产量
Table 4 Maize ear traits and yield under different microalgae fertilizers and application levels

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数/行	行粒数/粒	秃尖长/cm	穗粒重/g	穗轴重/g	百粒重/g	理论产量/ (kg·hm ⁻²)	增产率/ %
CK	19.12±0.38c	5.37±0.06a	16.8±0.49a	39.76±1.12a	2.45±0.24a	228.93±10.61c	26.53±0.69c	35.74±0.27 e	15567.24±721.43c	—
Fa ₁	20.12±0.27bc	5.41±0.08a	16.4±0.40a	40.92±0.49a	2.11±0.28a	233.56±6.13c	28.97±1.35bc	36.71±0.14bcd	15882.08±416.51c	2.02
Fa ₂	21.18±0.48ab	5.55±0.08a	16.8±0.49a	42.76±2.58a	1.94±0.23a	274.59±3.92a	31.97±1.28ab	37.10±0.23bc	18672.12±266.86a	19.95
Fa ₃	20.84±0.41ab	5.48±0.10a	16.8±0.49a	42.32±1.52a	2.01±0.23a	264.38±8.97ab	31.82±1.61ab	36.12±0.41de	17977.84±609.77ab	15.49
Fa平均	20.71	5.48	16.67	42.00	2.02	257.51	30.92	36.64	17510.68	12.49
Fb ₁	20.16±0.46bc	5.43±0.04a	16.4±0.40a	41.04±1.08a	1.82±0.22a	245.35±14.96bc	32.11±1.85ab	36.53±0.25cd	16683.80±1016.95bc	7.17
Fb ₂	21.26±0.17ab	5.56±0.03a	16.4±0.40a	43.84±0.87a	2.01±0.27a	269.01±4.23ab	29.89±1.74bc	38.81±0.25a	18292.82±287.67ab	17.51
Fb ₃	21.10±0.49ab	5.55±0.01a	16.4±0.40a	42.60±0.93a	2.07±0.16a	255.87±5.34abc	28.93±0.79bc	37.16±0.25bc	17399.30±362.95abc	11.77
Fb平均	20.84	5.51	16.4	42.49	1.97	256.74	30.31	37.50	17458.64	12.15
Fc ₁	20.84±0.57ab	5.52±0.05a	16.8±1.02a	42.24±1.36a	1.97±0.15a	246.07±13.11bc	30.48±1.92bc	36.71±0.14bcd	16732.62±891.46bc	7.49
Fc ₂	21.82±0.36a	5.57±0.10a	16.8±0.49a	44.64±1.50a	1.73±0.20a	281.34±9.72a	36.21±1.35a	39.33±0.42a	19131.12±660.78a	22.89
Fc ₃	20.46±0.29a	5.51±0.10a	16.4±0.40a	41.88±1.13a	1.88±0.23a	263.88±8.06ab	30.40±2.27bc	37.35±0.29b	17943.84±547.98ab	15.27
Fc平均	21.04	5.53	16.67	42.92	1.86	263.76	32.36	37.80	17935.86	15.22

注:同一指标不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

表 5 微藻肥处理玉米各项性状指标相关性
Table 5 Correlation of different maize trait indicators under microalgae fertilizer treatments

指标	株高	茎粗	叶面积	叶绿素	光合速率	蒸腾速率	穗长	穗粗	穗行数	行粒数	秃尖长	穗粒重	穗轴重	百粒重	理论产量
株高	1														
茎粗	0.694*	1													
叶面积	0.862**	0.474	1												
叶绿素	0.785**	0.660*	0.720*	1											
光合速率	0.803**	0.795**	0.766**	0.812**	1										
蒸腾速率	0.719*	0.638*	0.663*	0.936**	0.805**	1									
穗长	0.917**	0.795**	0.801**	0.840**	0.905**	0.873**	1								
穗粗	0.853**	0.637*	0.763*	0.832**	0.877**	0.865**	0.939**	1							
穗行数	0.222	0.379	0.282	0.150	0.638*	0.140	0.328	0.363	1						
行粒数	0.854**	0.774**	0.804**	0.825**	0.956**	0.859**	0.969**	0.923**	0.480	1					
秃尖长	-0.805**	-0.374	-0.860**	-0.755*	-0.540	-0.668*	-0.702*	-0.603	0.112	-0.642*	1				
穗粒重	0.818**	0.579	0.902**	0.611	0.799**	0.658*	0.844**	0.799**	0.360	0.871**	-0.656*	1			
穗轴重	0.694*	0.455	0.770**	0.662*	0.550	0.720*	0.712*	0.539	-0.096	0.666*	-0.870**	0.705*	1		
百粒重	0.604	0.617	0.646*	0.653*	0.764*	0.640*	0.728*	0.653*	0.450	0.842**	-0.535	0.725*	0.519	1	
理论产量	0.832**	0.659*	0.836**	0.903**	0.883**	0.869**	0.872**	0.867**	0.306	0.913**	-0.719*	0.842**	0.673*	0.809**	1

注:**表示在 $p < 0.01$ 水平上显著,*表示在 $p < 0.05$ 水平上显著。

3 讨论与结论

3.1 讨论

土壤盐渍化会引发土壤物理、化学、生物学性状恶化,进而危害植物生长发育。在土壤物理性状上,盐渍化抑制团粒结构形成,导致土壤板结^[23],通气透水性变差^[24],从而阻碍植物对水分、养分的吸收和根系呼吸,降低肥效^[25]。在土壤化学性状上,高盐土壤

水分与植物根系之间渗透差变小,导致根系吸水困难,造成植物生理干旱^[26-27];高浓度盐分和有害盐分对植物产生毒害作用^[26,28]。在土壤生物学性状上,不良的土壤结构、盐分和酸碱环境抑制了土壤微生物生存繁衍,导致土壤生物学性状变差^[25,29]。本研究将微藻活性细胞液体肥用于盐渍化农田生态修复和作物营养,其主要作用机理为微藻活性细胞施入土壤后,在适宜的土壤水分、温度、光照等条件下繁殖生

长,通过改变土体结构、养分、气体、生物等土壤环境条件而使土壤性状发生改变,进而对植物生长发育产生影响。第一,微藻在土壤中繁殖生长,能够显著增加土壤有机质含量,降低土壤容重,提高土壤孔隙度,减少土壤板结,从而改善土壤物理性状^[16],提高土壤的持水保水性能,增强土壤抗旱能力^[30]。第二,微藻在土壤中繁殖生长,吸收部分盐分离子,降低土壤盐分浓度,对土壤酸化、碱化起到缓冲作用^[18-19]。第三,微藻在土壤中繁殖生长,通过光合作用产生氧气,增加土壤含氧量,促进好氧微生物繁殖。第四,通过藻类光合作用和固氮、固碳作用提高土壤有机质、氮磷钾养分含量^[10,15-16,18-19]。第五,微藻生长过程中会分泌多糖、氨基酸和生长激素等生物活性物质,这些物质能够提高土壤脲酶、蔗糖酶^[10,15,18]、过氧化物酶、磷酸酶^[18]的活性及微生物活性^[19],提高土壤氮磷钾养分的有效性,促进植物对养分的吸收^[15,18]。通过土壤发生一系列变化,进而改善土壤微生态,修复土壤荒漠化和酸碱化^[19],通过多途径协同调节植物光合和生理生化机制,促进植物的生长发育^[8],进而提高干物质含量和产量。

本研究所施用的3种微藻肥,是由3种淡水藻以不同配比形成,不同藻的生理生化机制不同,适宜繁殖生长的光照、温度及水分条件存在差异,对改良土壤、促进植物生长发育发挥的功能特性也有不同,这可能是导致不同藻肥及施用水平下玉米营养生长、光合等性状不同的本质原因,并进而影响产量。当前国内外学者对于微藻肥的研究主要集中于两方面:一是现有研究多关注于海藻肥的开发利用,而本研究中淡水微藻肥在盐渍化农田的应用机制还处于空缺状态;二是当前关于农田施用微藻肥的研究多为单一藻种作用效果,本研究中3种微藻肥是由蛋白核小球藻、鱼腥藻以及单歧藻复合混配而成(蓝藻与绿藻复合),探究其综合协同效应在盐渍化农田中对玉米生长发育和产量的影响。蛋白核小球藻是一种绿藻,在适宜条件下具有极强的光合效率和繁殖能力同时释放大量氧气,含有丰富的蛋白质、维生素和矿物质营养成分,生长过程中会分泌多糖、氨基酸和生长激素等生物活性物质,对土壤通气性、养分、微生物活性具有良好的改善作用。鱼腥藻属于蓝藻的一种,具有极强的固氮能力,作为肥料使用适用于需提高土壤肥力和减少氮肥使用的情况。单歧藻是一种蓝藻,其具有一定固氮能力的同时,还有极强的环境适应性,能够在盐碱、高温、高寒等各种环境中生存。本研究立足盐渍化土壤开展,且Fc肥效果最佳,这可能与Fc肥中有更高的单歧藻比例,对盐碱环境

具有更强的适应能力有关。

另外,不同作物在不同生育时期对水分、养分以及气体等资源的需求程度不同。在作物生长周期内,是光照、温度和水分等条件多变的过程,对不同微藻繁殖生长的影响不同,进而对作物水分、养分及气体等条件的供应能力也有所差异。因此,基于不同时期作物对水分、肥料和气体需求阈值与微藻种类和配比的对应研究值得深入探索。

3.2 结论

(1)施用3种微藻肥均可提高玉米株高、茎粗、叶面积。其中,施用微藻肥的玉米各生育时期株高、叶面积均显著高于不施微藻肥;随施肥水平升高,玉米各生育时期株高、茎粗、叶面积均呈先升高后降低的总体变化趋势,最大值均出现在30 L/hm²施肥水平。

(2)施用3种微藻肥均可提高玉米净光合速率、蒸腾速率、叶绿素相对含量。施用微藻肥的玉米各生育时期净光合速率、蒸腾速率、叶绿素相对含量均高于不施微藻肥;随施肥水平升高,3项指标呈先升高后降低的总体变化趋势,最大值均出现在30 L/hm²施肥水平。

(3)施用微藻肥提高了玉米果穗穗长、穗粗、行粒数、穗粒重、穗轴重以及百粒重和产量,降低了果穗秃尖长;施用Fc微藻肥更有利于促进增产,最有利于增产的施肥水平为30 L/hm²。

参考文献(References):

- [1] 张娜,张栋良,屈忠义,等.内蒙古河套灌区区域土壤质地空间变异分析:以解放闸灌域为例[J].干旱区资源与环境,2015,29(12):155-163.
Zhang N, Zhang D L, Qu Z Y, et al. The spatial variation of soil texture in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015,29(12):155-163.
- [2] 易绍荣,冯雪娇,王宗伟,等.基于SWAT的河套灌区氮磷面源污染时空变化研究[J].农业环境科学学报,2023,42(11):2550-2559.
Yi S R, Feng X J, Wang Z W, et al. Spatial-temporal changes of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in Hetao Irrigation District based on SWAT [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(11): 2550-2559.
- [3] 夏永秋,赵娣,严星,等.我国农业面源污染过程模拟的困境与展望[J].农业环境科学学报,2022,41(11):2327-2337.
Xia Y Q, Zhao D, Yan X, et al. Dilemma and prospect of modelling in agricultural non-point source pollution in China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(11):2327-2337.
- [4] 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 G Q, Wang H B, Zheng Y. 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.
- [5] 杨芳,戴津权,梁春蝉,等.农用海藻及海藻肥发展现状[J].福建农业科技,2014,45(3):72-76.
Yang F, Dai J Q, Liang C C, et al. Current developing situation of agricultural seaweed and seaweed fertilizer [J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2014, 45(3):72-76.
- [6] 李书琴,王孝举.海藻液体肥的研究[J].海洋科学,1995,19(3):4-6.
Li S Q, Wang X J. Studies on the seaweed liquid manure [J]. Marine Sciences, 1995, 19(3):4-6.
- [7] 秦益民,朱长俊,刘书英,等.海藻肥的发展历史和应用前景[J].现代农业研究,2023,29(8):120-123.
Qin Y M, Zhu C J, Liu S Y, et al. The historical development and future perspective of the applications of seaweed fertilizers [J]. Modern Agriculture Research, 2023, 29(8):120-123.
- [8] 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):46-47,49.
Qin Q, Zhang W J, Zhang T. Research progress of seaweed organic fertilizer [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2001, 17(1):46-47, 49.
- [9] 苏煜楹,任盈,李金凤,等.不同卷枝毛霉菌株和海藻肥对远志种子萌发和幼苗生长的影响[J].中国现代中药,2024,26(12):2141-2150.
Su Y Y, Ren Y, Li J F, et al. Effects of different *Mucor circinelloides* strains and microalgae on seed germination and seedling growth of *Polygala tenuifolia* [J]. Modern Chinese Medicine, 2024, 26(12):2141-2150.
- [10] 谷亦,付美琪,徐建宇,等.鱼腥藻藻肥对牛蒡幼苗生长的影响[J].现代园艺,2022(23):1-2,5.
Gu Y, Fu M Q, Xu J Y, et al. Effect of ANABAENA algae fertilizer on the growth of burdock seedlings [J]. Contemporary Horticulture, 2022(23):1-2, 5.
- [11] 丁晨曦,李永强,董智,等.不同浓度海藻肥对高羊茅生长的影响[J].草业科学,2013,30(5):674-677.
Ding C X, Li Y Q, Dong Z, et al. Effects of different seaweed fertilizer concentration treatments on growth of *Festuca arundinacea* [J]. Pratacultural Science, 2013, 30(5):674-677.
- [12] 李建聪.海藻肥对苹果坐果与产量的影响[J].河北林业科技,2014(1):30-32.
Li J C. Effect of seaweed fertilizer on fruit setting and yield of apple [J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2014(1):30-32.
- [13] 牛亚胜.海藻肥对板蓝根种子萌发和幼苗生长的影响[J].农业科技与信息,2023(5):63-66,70.
Niu Y S. Effects of microalgae fertilizer on seed germination and seedling growth of *Radix isatidis* [J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2023(5):63-66, 70.
- [14] 张宁,吴丰漫,张婷芊,等.不同种类的微藻肥对椰枣幼苗生长的影响[J].热带作物学报,2024,45(12):2563-2573.
Zhang N, Wu F M, Zhang T Q, et al. Effects of different microalgae fertilizer on growth of date palm seedlings [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(12):2563-2573.
- [15] 刘淑芳,吕俊平,冯佳,等.施用微藻对黄瓜生长及土壤质量的影响[J].山西农业科学,2016,44(9):1312-1315.
Liu S F, Lü J P, Feng J, et al. Effect of administering microalgae on growth of cucumber and quality of soil [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(9):1312-1315.
- [16] 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,2024:1-6.(2024-12-03). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1081.Q.20241202.1047.002.html>.
Luo G H, Cui Y, Liu H Y, et al. Effects of microalgae fertilizer on the growth of two types of herb crops and soil properties [J/OL]. Journal of Biology, 2024: 1-6. (2024-12-03). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1081.Q.20241202.1047.002.html>.
- [17] 李辉玲,曾卫东,叶远荣,等.微藻肥在辣椒栽培中的技术要点及推广成效[J].农村经济与科技,2024(5):57-59.
Li H L, Zeng W D, Ye Y R, et al. Technical points and popularization effect of microalgae fertilizer in pepper cultivation [J]. Rural Economy and Science-Technology, 2024(5):57-59.
- [18] 王建华,圆圆,都拉娜,等.微藻生物肥改善土壤肥力提高叶用莴苣营养品质[J].中南农业科技,2023(7):3-5.
Wang J H, Yuan Y, Du L N, et al. Microalgae biological fertilizer improves soil fertility and improves the nutritional quality of leaf lettuce [J]. South-Central Agricultural Science and Technology, 2023(7):3-5.
- [19] 徐晓钰,王涵,Khin-Khin Phyu,等.微藻生物肥施用对“土壤-作物”系统的影响及修复作用[J].中国土壤与肥料,2024(9):208-218.
Xu X Y, Wang H, Phyu K, et al. Effects and remediation of microalgal biofertilizer application on “soil-crop” system [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(9):208-218.
- [20] 王婧,逢焕成,李玉义,等.微生物菌肥对盐渍土壤微生物区系和食葵产量的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2186-2191.
Wang J, Pang H C, Li Y Y, et al. Effects of microbial fertilizer on soil microflora and sunflower yield in saline soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11):2186-2191.
- [21] 武岩,红梅,常菲,等.施肥措施对河套灌区土壤剖面 N_2O

- 的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5):130-135.
- Wu Y, Hong M, Chang F, et al. Spatial and temporal distributions of soil profile N₂O as affected by different fertilization measures in Hetao Irrigation district [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5):130-135.
- [22] 苏玉杰, 刘平丽, 宋军锋, 等. 玉米穗行数分子遗传研究进展[J]. 中国种业, 2024(10):14-19.
- Su Y J, Liu P L, Song J F, et al. Progress in molecular genetics studies of the kernel row number in maize [J]. China Seed Industry, 2024(10):14-19.
- [23] 韩江培. 设施栽培条件下土壤酸化与盐渍化耦合发生机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- Han J P. The mechanisms for the coexistence of soil acidification and salinization under greenhouse cultivation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [24] Schnurr-Pütz S, Bääth E, Guggenberger G, et al. Compaction of forest soil by logging machinery favours occurrence of prokaryotes [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2006, 58(3):503-516.
- [25] 张辉, 宋琳, 陈晓琳, 等. 土壤退化的原因与修复作用研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(8):147-161.
- Zhang H, Song L, Chen X L, et al. Study on the causes and remediation of soil degradation [J]. Marine Sciences, 2020, 44(8):147-161.
- [26] 杨文涛, 王琦, 郭二丹, 等. 土壤盐渍化对植物影响的研究进展[J]. 农业与技术, 2024, 44(18):95-99.
- Yang W T, Wang Q, Guo E D, et al. Research progress on the influence of soil salinization on plants [J]. Agriculture and Technology, 2024, 44(18):95-99.
- [27] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms [J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(6):371-379.
- [28] Bernstein L. Effects of salinity and sodicity on plant growth [J]. Annual Review of Phytopathology, 1975, 13:295-312.
- [29] Andronov E E, Petrova S N, Pinaev A G, et al. Analysis of the structure of microbial community in soils with different degrees of salinization using T-RFLP and real-time PCR techniques [J]. Eurasian Soil Science, 2012, 45(2):147-156.
- [30] 宋朝玉, 王圣健, 李振清, 等. 麦秸和磷肥、海藻肥对盐碱障碍耕地棉花产量和纤维品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2014(3):59-62, 97.
- Song C Y, Wang S J, Li Z Q, et al. Effects of wheat straw and phosphate fertilizer, seaweed fertilizer on the cotton yield and fiber quality in saline-alkali land [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2014(3):59-62, 97.

(上接第173页)

- [23] 李文政, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地不同坡位土壤的水分特征曲线及水力学性质[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3):135-142.
- Li W Z, Liu M X, Yi J, et al. Soil water retention curve and hydraulic properties at different slope positions in the Three Gorges mountainous area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3):135-142.
- [24] 田昕, 赵勇钢, 刘啟霞, 等. 黄土丘陵区长期种植柠条坡地土壤饱和导水率及其影响因素[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(4):20-27.
- Tian X, Zhao Y G, Liu Q X, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors on the slope with long-term plantation of *Caragana korshinskii* in the Loess Hilly Region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(4):20-27.
- [25] 纳磊, 张建军, 朱金兆, 等. 晋西黄土区不同土地利用类型坡面土壤饱和导水率研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3):69-73.
- Na L, Zhang J J, Zhu J Z, et al. Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity from different land use types on loess slope in west of Shanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(3):69-73.
- [26] 娄淑兰, 刘目兴, 易军, 等. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(13):4844-4854.
- Lou S L, Liu M X, Yi J, et al. Influence of vegetation coverage and topographic position on soil hydrological function in the hillslope of the Three Gorges area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13):4844-4854.
- [27] 赵春雷, 邵明安, 贾小旭. 黄土高原北部坡面尺度土壤饱和导水率分布与模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(6):806-815.
- Zhao C L, Shao M A, Jia X X. Distribution and simulation of saturated soil hydraulic conductivity at a slope of northern Loess Plateau [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6):806-815.
- [28] 毛娜, 黄来明, 邵明安. 黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J]. 土壤, 2019, 51(2):381-389.
- Mao N, Huang L M, Shao M A. Profile distribution of soil saturated hydraulic conductivity and controlling factors under different vegetations on slope in loess region [J]. Soils, 2019, 51(2):381-389.