



菌藻肥与脱硫石膏复配对盐碱土壤质量及高丹草产量的影响

刘霞, 张欢, 胡宇, 王丽萍, 乔天

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 为探讨菌藻肥与脱硫石膏复配对盐碱地土壤的改良效果, 在内蒙古黄河南岸灌区开展田间试验, 探究空白对照 (CK), 光合细菌和小球藻 7:3 比例、脱硫石膏 22.5 t/hm² (FM1), 光合细菌和小球藻 3:7 比例、脱硫石膏 22.5 t/hm² (FM2) 和脱硫石膏 22.5 t/hm² (F) 处理对高丹草生育期土壤水、盐、肥及产量的影响。结果表明: 施用改良剂的处理较 CK 显著降低了土壤含盐量, 增加了土壤有机质和速效养分。与 CK 相比, FM2 处理使 0 ~ 40 cm 土壤含盐量降低 20.58%; 有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别增加 19.22%、25.60%、27.29%、19.26%; 高丹草产量随菌藻混合液中小球藻比例的增加而增加, FM2 较 CK 处理提高 21.05%。土壤质量指数值 FM2 处理改良效果最佳, 说明施加以 3:7 比例混合的光合细菌和小球藻微生物肥料与脱硫石膏配施能降低盐碱障碍, 增加土壤肥力, 促进植株生长, 从而达到增产的目的。

关键词: 小球藻; 光合细菌; 烟气脱硫石膏; 盐碱地改良

土壤是农业生产发展的基石, 城市化进程加快导致人地供需失衡, 我国粮食安全面临巨大挑战^[1], 盐碱地等后备耕地资源的开发问题备受关注。中国西北黄河南岸灌区的达拉特旗盐碱地面积已达 2.95×10^4 hm²^[2]。由于该地区气候干旱、长期使用化肥、不合理耕灌制度等因素, 导致土壤盐渍化问题逐年加重, 严重制约当地农业持续发展。因此, 科学改良盐渍化土壤对提高土壤资源利用率, 促进现代农业可持续性发展, 保障国家粮食安全具有重要的现实意义。

为缓解土壤盐渍化带来的不利影响, 国内外学者进行了大量的研究。脱硫石膏改良盐碱地具有见效快、操作简单、易推广等优点, 被广泛应用。张辉等^[3]研究表明, 脱硫石膏中的 Ca²⁺ 能促进胶体絮凝形成团聚体, 降低黏粒比例增加水力传导度, 改善土壤物理结构和水热环境^[4]。Xu 等^[5]研究表明脱硫石膏通过降低盐碱土壤的电导率 (EC) 和碱化度, 促进

植株生长, 增加作物产量。但盐渍化土壤肥力低仍是植物生长发育的重要障碍因子。研究发现脱硫石膏和玉米秸秆配施有效降低可溶性 Na⁺、Cl⁻ 含量, 不同程度提高微生物量碳、有机碳、土壤有效磷和速效钾的含量, 但秸秆腐化用时长、肥效低^[6]。因此, 改良盐碱地在考虑盐碱土壤障碍特征的基础上, 还需要考虑改良物料的特性。

微生物肥料因其有机物质含量高、绿色环保、微量高效等特点, 也被广泛应用于盐碱地的改良, 常用的微生物肥料含有小球藻和光合细菌。Ma 等^[7]研究表明, 小球藻生长快、易于培养, 能有效缓解盐碱胁迫, 调控土壤微生物群落结构, 改善土壤肥力, 促进作物萌发和生长^[8]。Lee 等^[9]研究表明, 光合细菌含有多种促生长因子, 能提高作物的产量和品质。此外, 光合细菌通过呼吸作用为小球藻提供底物和生长激素等物质, 小球藻又通过光合作用固碳, 为异养光合细菌提供碳源及氧气^[10], 基于此菌藻之间建立了密切的关系。张慧洁等^[11]研究也表明巨大芽孢杆菌和小球藻处理较单施巨大芽孢杆菌或小球藻处理显著提高土壤养分含量, 增强土壤微生物代谢活性。

微生物肥料能提供养分, 弥补脱硫石膏肥力不足的缺点, 将脱硫石膏与菌藻肥复配可为盐碱地

收稿日期: 2023-12-19; 录用日期: 2024-03-29

基金项目: 内蒙古自治区科技计划 (财政资金 2021GG0369); 国家自然科学基金项目 (52369009); 内蒙古自然科学基金 (2023MS05024, YLXKZX-NN052)。

作者简介: 刘霞 (1971-), 副教授, 博士研究生, 主要从事农业水土环境及水文水资源研究。E-mail: ilukasumi@126.com。

改良提供一条有效途径。Van 等^[12]研究表明微生物之间存在竞争关系，需保证一定比例才能达到改良的目的，但不同比例的菌藻肥与脱硫石膏配施改良盐碱地的研究较少，适宜比例及效果有待验证。因此，本文以黄河南岸灌区的盐碱地为对象，分析以光合细菌、小球藻和脱硫石膏为复合改良剂，通过相关分析及土壤质量指数评价，进一步探究复合改良剂改良盐碱土壤的效果，以期为黄河南岸灌区盐碱地土壤改良提供技术支撑与理论依据。

表 1 土壤理化性质

土层深度 (cm)	容重 (g/cm ³)	田间持水率 (%)	钠吸附比	含盐量 (g/kg)	有机质 (g/kg)	速效钾 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	碱解氮 (mg/kg)
0 ~ 20	1.34	28.65	20.86	8.64	9.47	98.45	33.35	43.25
20 ~ 40	1.38	33.56	14.58	6.93	7.61	77.40	25.33	30.87

1.2 供试材料

高丹草品种为杰宝，从当地购买。化学改良剂烟气脱硫石膏来自内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗发电厂，主要成分二水硫酸钙的含量为 89.54%，pH 为 7.26，含水量 9.33%。微生物肥料（光合细菌菌种为荚膜红假单胞菌，pH 为 7.30，有效活菌数 $\geq 2 \times 10^8$ CFU/mL；蛋白核小球藻，pH 为 7.21，藻密度 2×10^7 个/mL）在当地公司购买。

1.3 试验设计

本试验采用随机区组设计，设脱硫石膏与菌藻肥两个因素。根据文献 [13] 结合当地实际情况，综合计算设定脱硫石膏施用量为 0 和 22.5 t/hm² 两个水平。依据文献研究成果得出菌藻肥最佳施用量 135 kg/hm² [14]，设光合细菌：小球藻混合施用比例为 0：0、7：3 及 3：7 [15] 3 个水平。4 个处理分别为空白对照（CK）；光合细菌：小球藻 7：3 处理，施加脱硫石膏 22.5 t/hm²（FM1）；光合细菌：小球藻 3：7 处理（FM2）；脱硫石膏，施加脱硫石膏 22.5 t/hm²（F）。见表 2。每个处理重复 3 次，共 12 个小区，面积为 54 m²（9 m×6 m）。

脱硫石膏于 2022 年 6 月 3 日均匀撒施于地表，用旋耕机将其与 0 ~ 20 cm 土壤充分混合。2022 年 6 月 25 日人工播种，高丹草株行距 40 cm×50 cm，播种深度 1.5 ~ 3.5 cm，复合肥（N-P₂O₅-K₂O 为 12-15-18）施加量为 487.5 kg/hm²。在苗期、拔节期、抽穗开花期各灌水 1 次，灌溉定额

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2022 年 6—10 月在内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗树林召镇东海心村（109°52′ E，40°29′ N）进行，属典型的温带大陆性气候。年平均气温 6.9℃，年均降水量 304.2 mm，年均蒸发量 2153.7 mm。降水年内分配不均，主要集中在 7—9 月。试验区属于重度盐碱地，土壤为粉壤土，地下水位埋深 1.2 m，其理化性质如表 1 所示。

表 2 试验处理

序号	处理名称	处理代称
1	空白对照	CK
2	光合细菌：小球藻比例 7：3，施 加脱硫石膏 22.5 t/hm ²	FM1
3	光合细菌：小球藻比例 3：7，施 加脱硫石膏 22.5 t/hm ²	FM2
4	脱硫石膏 22.5 t/hm ²	F

3600 m³/hm²。菌藻肥均匀混合后，用蒸馏水稀释 100 倍，按生育期采用沾叶灌根的方式施加 4 次，每次施用量为 135 kg/hm²，不施加菌藻肥的处理施等量蒸馏水，试验区其他管理措施与当地常规管理方式一致。

1.4 土壤样品和植株的采集与测定

在成熟期取植株样品，每个处理平均选取 9 株高丹草，测得株高、茎粗后，将植株按茎、叶、穗分成三部分称得鲜重，放置在烘箱 105℃杀青后再调至 65℃烘干至恒重称得生物产量。在高丹草生育期（苗期、拔节期、抽穗开花期、成熟期）取土壤样品，使用直径 5 cm 的原状取土钻采集，采样深度为 0 ~ 20、20 ~ 40 cm。在实验室将土壤样品分为两部分，一部分测定土壤含水率，一部分放在通风避光的房间风干，除去石子草根等杂质，磨细过 1 mm 筛，按《土壤农化分析》^[16]的方法测定 EC、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾及离子



含量。土壤含盐量 (TS)^[17] 及土壤钠吸附比^[18] (SAR) 用式 (1) (2) 计算:

$$TS=3.74 \times EC \quad (1)$$

式中, EC 为电导率值 (dS/m)。

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Mg^{2+} + Ca^{2+}}{2}}} \quad (2)$$

式中, Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 单位为 $mmol/L$ 。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 对试验数据进行整理, 对不同处理的显著性采用单因素方差分析、多重比较 ($P \leq 0.05$)。利用相关分析判断土壤指标与产量的相关显著性, 筛选出土壤有效指标。根据各指标与土壤质量之间的正负关系判断采用升型或降型隶属函数, 计算各指标隶属度值。通过主成分分析得到各个有效指标在各主成分的权重, 基于全数据集计算各处理的土壤质量指数 (SQI)^[19], 以上均使用 SPSS 26.0 完成, Origin 2022 绘制相关图表。按式 (3) - (5) 计算隶属函数值、指标权重及 SQI。

$$\text{升型函数公式: } F(x_i) = \frac{(x_{ij} - x_{imin})}{(x_{imax} - x_{imin})} \quad (3)$$

$$\text{降型函数公式: } F(x_i) = \frac{(x_{imax} - x_{ij})}{(x_{imax} - x_{imin})}$$

式中, $F(x)$ 为土壤质量评价指标的隶属度值, x_{ij} 为某一实测指标值, x_{imin} 、 x_{imax} 分别为实测值中的最小值、最大值。

$$\text{指标权重: } W_i = \frac{C_i}{\sum_{i=1}^n C_i} \quad (4)$$

式中, W_i 为评价指标的权重, C_i 是某一主成分因子载荷量的绝对值。

$$SQI = \sum_{j=1}^m K_j [\sum_{i=1}^n W_i \times F(x_i)] \quad (5)$$

式中, SQI 为土壤质量指数, m 表示主成分的数目, K_j 为第 j 个主成分的方差贡献率, n 表示评价指标的数目。

2 结果与分析

2.1 菌藻肥与脱硫石膏复配对土壤水、盐、肥的影响

土壤盐碱程度是影响土壤肥力和植株生长的障碍因子, 不同改良措施对高丹草生育期 0 ~ 40

cm 土壤水、盐变化的影响如图 1 所示。通过分析表明, FM2、FM1、F 处理较 CK 高丹草生育期土壤含水率提高了 14.44%、11.75%、8.78%; 土壤 TS 降低了 20.58%、17.68%、15.30%; SAR 减小了 35.92%、31.71%、28.40%。因而与 CK 相比, 施用菌藻肥与脱硫石膏复配改良剂均能提高土壤的持水能力, 降低土壤 TS 及有害盐分离子, 其中 FM2 处理保水及盐分含量降低效果最佳。

土壤养分是衡量土壤肥力的重要参考依据, 不同改良处理较 CK 均提高生育期 0 ~ 40 cm 土壤的有机质和速效养分含量, 如图 2 所示。FM2 处理较 CK 增加有机质和碱解氮的含量分别为 19.22% 和 25.60%。FM2 较 FM1 处理增加有机质和碱解氮的含量分别为 15.67% 和 24.03%。FM2、FM1、F 处理较 CK 增加土壤有效磷分别为 27.29%、21.77%、18.83%。FM2、FM1、F 处理较 CK 增加速效钾含量分别为 19.26%、13.17%、11.69%, 这表明单施脱硫石膏和菌藻肥配施脱硫石膏对土壤养分均产生了积极的影响。

2.2 菌藻肥与脱硫石膏复配对高丹草生长指标及产量的影响

由表 3 可知, 施加改良剂能促进高丹草生长, 提高高丹草产量。FM1、FM2、F 处理较 CK 茎粗分别增加 12.12%、16.13%、11.04%, 其中拔节期 FM2 处理较 CK 显著增加 32.72%。高丹草株高、茎叶比较 CK 有提高, 但各处理之间差异不显著。与 CK 相比, FM1、FM2、F 处理产量显著增加 15.81%、21.05%、10.56%。

2.3 土壤质量评价

如表 4 所示, 相关性分析表明, 有机质对高丹草产量影响显著, 土壤 TS 和 SAR 与高丹草产量呈反比关系, 这表明改良剂降低了盐碱程度, 增加土壤肥效, 进而改善土壤理化性质。根据显著性选取土壤含水率、TS、SAR、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾为有效指标做主成分分析。表 5 中可以看出, 两个主成分解释了 78.25% 的变化。PC1 轴解释率 52.567%, 主要与有机质有较大正向关系, 与 TS 和 SAR 有着较大负向关系。基于全数据集计算 SQI 值, 大小顺序表现为 FM2>FM1>F>CK。为进一步明确各处理对高丹草产量的影响, 拟合了 SQI 与高丹草产量之间的关系 (图 3)。产量与 SQI 呈正向关系, 拟合决定系数大于 0.9, 说明产量的增加与土壤改良有着密切关系。

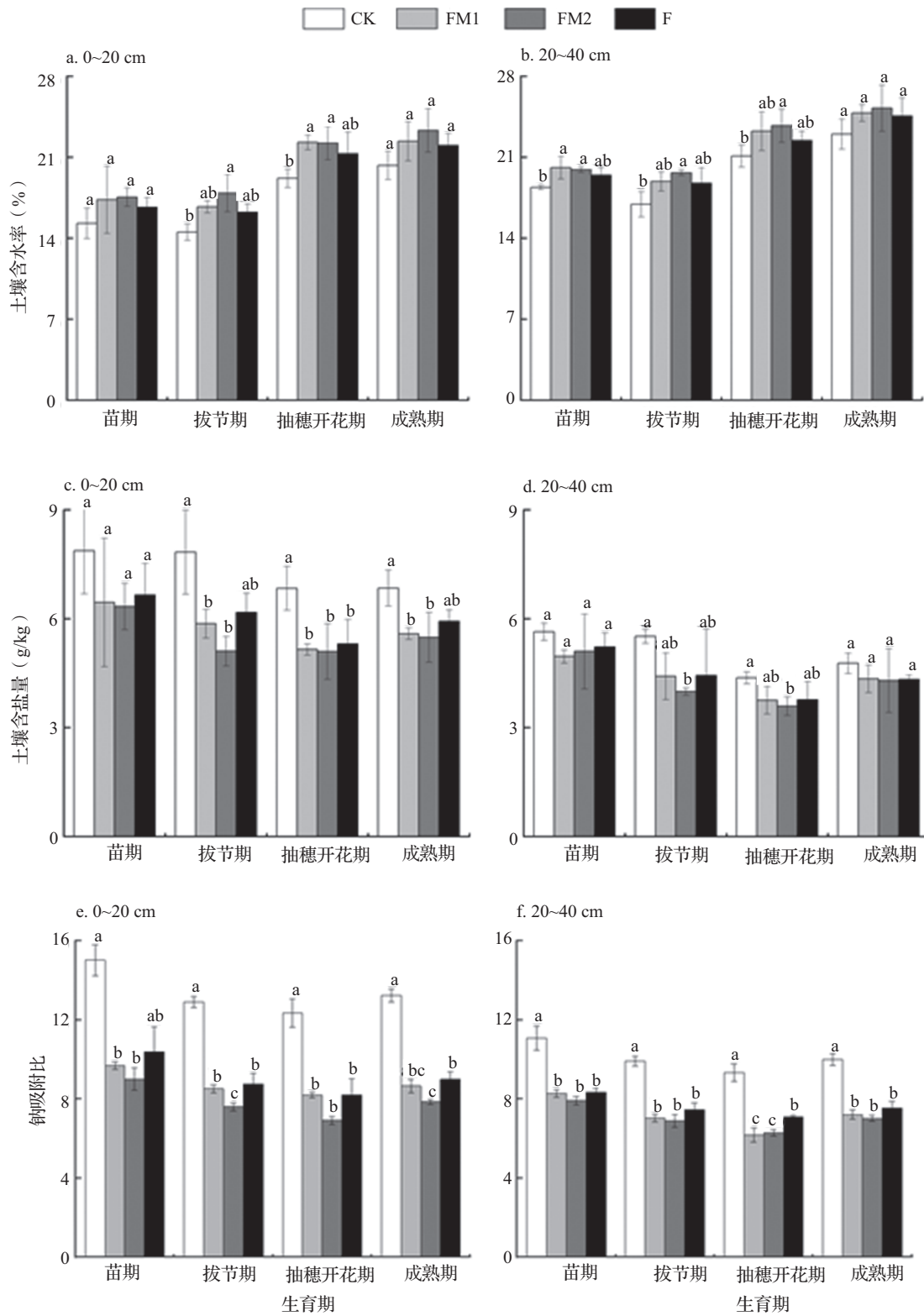


图1 菌藻肥与脱硫石膏配施对土壤水、盐的影响

注：图柱上不同字母表示同一生育期不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

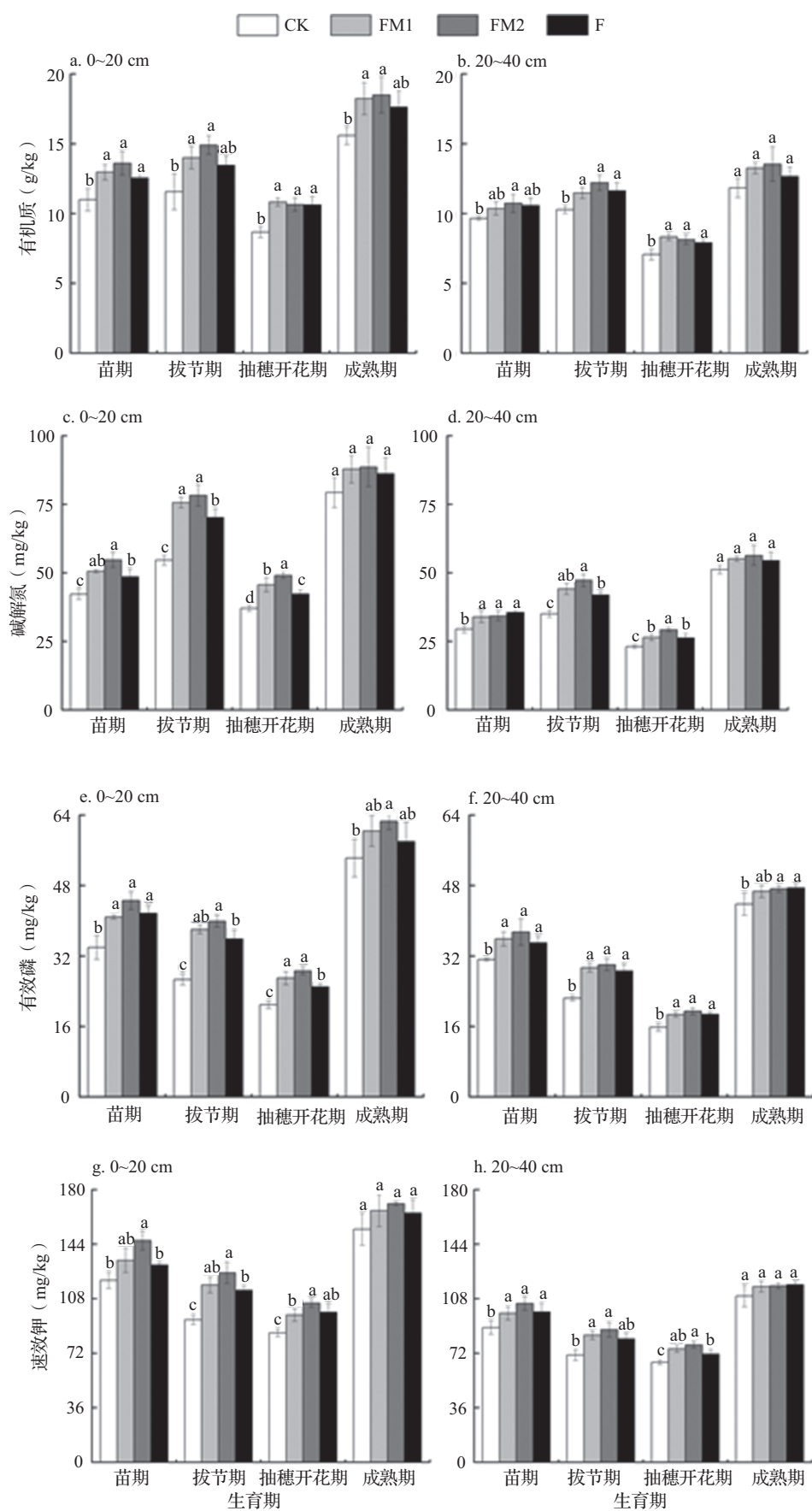


图2 菌藻肥与脱硫石膏配施对土壤养分的影响



表 3 高丹草生长指标及产量

生育期	处理	茎粗 (mm)	株高 (cm)	茎叶比	产量 (t/hm ²)
苗期	CK	4.34 ± 1.30a	28.52 ± 0.65a	0.62 ± 0.05a	—
	FM1	4.74 ± 0.94a	31.23 ± 1.71a	0.69 ± 0.11a	—
	FM2	4.89 ± 1.19a	32.56 ± 1.39a	0.71 ± 0.05a	—
	F	4.79 ± 1.56a	30.89 ± 2.29a	0.71 ± 0.14a	—
拔节期	CK	8.26 ± 0.62c	70.20 ± 1.69b	1.79 ± 0.09b	—
	FM1	9.88 ± 0.64ab	86.35 ± 6.27a	2.20 ± 0.02a	—
	FM2	10.97 ± 0.27a	88.67 ± 5.64a	2.21 ± 0.23a	—
	F	9.73 ± 0.73b	83.79 ± 4.17a	2.06 ± 0.10a	—
抽穗开花期	CK	12.41 ± 0.13b	165.93 ± 6.86b	2.47 ± 0.10b	—
	FM1	13.91 ± 0.92ab	192.72 ± 2.00a	2.84 ± 0.03a	—
	FM2	14.41 ± 0.34a	191.90 ± 2.41a	2.82 ± 0.10a	—
	F	13.71 ± 0.45ab	185.14 ± 11.95a	2.81 ± 0.24a	—
成熟期	CK	12.67 ± 0.81a	168.83 ± 4.53a	2.62 ± 0.21a	1.88 ± 0.07c
	FM1	13.63 ± 0.77a	183.68 ± 11.77a	2.83 ± 0.02a	2.17 ± 0.08ab
	FM2	13.79 ± 0.39a	187.56 ± 10.60a	2.86 ± 0.25a	2.27 ± 0.02a
	F	13.37 ± 1.09a	182.14 ± 10.30a	2.83 ± 0.04a	2.08 ± 0.14b

注：数据后不同小写字母表示同一生育期处理间的差异显著 ($P<0.05$)。

表 4 土壤指标与高丹草生长指标及产量的相关性

指标	茎粗	株高	茎叶比	产量
SOM	0.313	0.366	0.554	0.813**
AN	0.466	0.323	0.372	0.608*
AP	0.537	0.474	0.348	0.865**
AK	0.504	0.412	0.412	0.657*
SWS	0.813**	0.575	0.167	0.767**
TS	-0.306	-0.298	-0.463	-0.710**
SAR	-0.606*	-0.566	-0.654*	-0.844**

注：SOM 为有机质，AN 为碱解氮，AP 为有效磷，AK 为速效钾，SWS 为含水率，TS 为含盐量，SAR 为钠吸附比。下同。*、** 分别表示 0.05、0.01 水平显著相关。

表 5 主成分荷载、权重、特征值及贡献率

指标	PC1	权重	PC2	权重
SOM	0.894	0.190	0.200	0.065
AN	0.076	0.016	0.966	0.316
AP	0.782	0.166	0.420	0.137
AK	0.581	0.124	0.484	0.158
SWS	0.606	0.129	0.463	0.152
TS	-0.947	0.202	0.084	0.028
SAR	-0.814	0.173	-0.440	0.144
特征值	4.442		1.035	
贡献率 (%)	52.567		25.683	
累计贡献率 (%)	52.567		78.250	

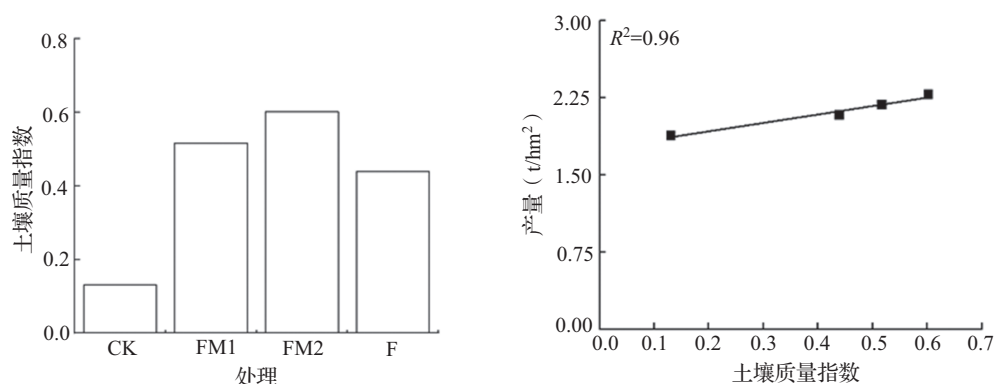


图3 不同处理的土壤质量指数与土壤质量指数-产量拟合线

3 讨论

3.1 菌藻肥与脱硫石膏复配对土壤水、盐的影响

本研究得出,与CK相比,不同处理提高了土壤保水能力,降低生育期0~40 cm土壤TS和SAR。其中,F、FM1和FM2处理0~40 cm土壤保水效果呈增加趋势,这表明施加脱硫石膏可改善土壤的团粒结构,从而增加土壤水分,这与屈忠义等^[20]的研究结果类似。FM2处理保水效果显著,原因是菌藻肥的比例有利于促进团聚体的形成^[21],提高了土壤孔隙度,减少水分蒸发,提高土壤持水能力。但FM1、FM2、F处理较CK的土壤TS和SAR明显降低。脱硫石膏中Ca⁺置换土壤中的Na⁺,利用灌水将Na⁺淋洗至下层土壤且Na⁺的迁移速度快于Mg⁺^[22],使表层的Mg⁺减少量低于Na⁺的减少量^[23],致使表层土壤的降低效果更明显^[24]。FM2较FM1处理降低土壤TS和SAR,一方面是在盐分胁迫下,藻类产生更多的胞外聚合物与土壤中的盐离子发生反应^[25],低浓度的菌促进小球藻的生长,使植物产生脯氨酸、铁载体等其他物质,加速Na⁺的排出;另一方面是脱硫石膏为微生物生长提供了良好的生存环境^[4],促进菌藻的生长。菌藻也提高了脱硫石膏溶解度^[26],增强置换Na⁺的能力,减少Na⁺的含量,降低了SAR和土壤TS。但苗期各处理之间土壤TS差异不显著,原因可能是盐胁迫导致部分菌藻死亡,但菌藻死亡后可被土壤中的细菌分解转为有机肥,改善土壤结构促进植株生长。

本研究得出不同处理均增加土壤含水率、降低TS和SAR,说明菌藻肥配施脱硫石膏有效提高土壤水分含量,降低土壤盐碱程度。其中,FM2

处理的降低作用显著,更有利于盐碱地土壤的改良。

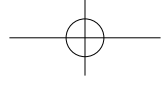
3.2 菌藻肥与脱硫石膏复配对土壤养分的影响

土壤养分含量是影响植物生长发育的关键因素,在不同生育时期对养分的吸收利用存在差异。本研究发现,土壤养分含量的最大值和最小值分别出现在成熟期和抽穗开花期,这可能是由于高丹草拔节期到抽穗开花期是生长旺盛期需养分量。与CK相比,不同处理生育期0~40 cm土壤有机质和速效养分呈现增加趋势。其中FM2、FM1、F处理较CK的有机质和速效养分显著增加,这是由于脱硫石膏中含有微量元素可为微生物提供良好的生活环境,增加土壤微生物群落数量^[4]。而FM2较FM1处理增加土壤养分,一方面是由于藻类能逐步释放氮、磷、钾来防止养分流失^[27],少量光合细菌可有效促进小球藻的生长^[15],从而产生更多养分供植物生长。小球藻产生更多具有粘附性的胞外多糖,聚集土壤颗粒,改善土壤团粒结构,提高团聚体稳定性^[28]。另一方面是脱硫石膏中的锰等微量元素^[29],可以促进小球藻的生长和光合作用,从而产生更多有机碳^[10]。但朱芸^[30]的研究表明施加脱硫石膏有效增加土壤有机质、碱解氮和有效磷的含量,但降低了速效钾的含量,可能是由于种植的植物和田间管理方式不同所产生的差异。

本研究表明菌藻肥配施脱硫石膏可有效缓解盐碱对植物根系的胁迫,增强土壤团聚体稳定性,增加植物所需的速效养分等^[31],提升盐碱地土壤的肥力和整体活性。

3.3 菌藻肥与脱硫石膏复配对高丹草生理指标及产量的影响

土壤盐渍化严重限制植株生长,造成作物减



产、甚至死亡的不良后果。本研究发现不同配比的菌藻肥与脱硫石膏配施能降盐增肥,提高土壤的水肥利用效率。高丹草产量与有机质呈现显著正相关关系,但与 SAR、土壤 TS 呈显著负相关关系,这说明菌藻肥与脱硫石膏联合施用有效降低土壤中盐碱对高丹草的负面影响,缓解根系盐碱迫害,同时改良剂能提供高丹草生长所需的养分,进而增加了高丹草产量,吕轲彦等^[32]也得到了类似结果。FM2 处理的产量高于 FM1 产量,产量与菌藻肥中光合细菌的含量呈反比关系,一方面是光合细菌促进放线菌的生长,但放线菌产生抗生素裂解小球藻^[33],没有体现出应有的改良效果。此外,也可能是单位面积的光合细菌含量过多,导致两者由互利共生关系转变为竞争关系^[12],从而影响了改良效果。另一方面是脱硫石膏可提供硫等矿物营养^[29],促进菌藻生长,调节植物的生理生化过程,刺激作物产生盐胁迫反应,增强了作物的耐盐性^[34],从而改善土壤理化性质,增加高丹草产量。SQI 与高丹草产量呈显著正相关关系,表明施加改良剂改善了高丹草的生长环境,促进植株生长,增加产量。综合考虑改良剂对土壤和高丹草农艺性状的影响,建议光合细菌:小球藻比例为 3:7 配施 22.5 t/hm² 的脱硫石膏改良盐碱地。但本文仅研究了菌藻肥复配脱硫石膏对盐碱地土壤养分的短期影响,还需要通过长期试验做进一步的研究。

4 结论

通过分析 4 个处理对盐碱地土壤水、盐、肥的影响及高丹草生长指标及产量的变化规律,得出以下结论:

(1) 施加改良剂改善了土壤理化性质,与 CK 相比,FM2 处理有效降低 0 ~ 40 cm 土壤的 TS,提高生育期土壤保水能力和养分含量,对有效磷含量影响较为显著。

(2) 各处理指标对土壤改良效果的贡献存在差异,FM2 处理的 SQI 最高, SQI 与高丹草的产量呈显著正相关关系。

(3) 菌藻肥配施脱硫石膏能有效降低盐碱地土壤盐分,改善土壤微环境,提升土壤肥力,促进作物生长。因此,是适宜于黄河灌区盐碱地的有效改良剂,光合细菌:小球藻的最佳施用比例为 3:7,脱硫石膏施用量为 22.5 t/hm²。

参考文献:

- [1] 刘小京,郭凯,封晓辉,等. 农业高效利用盐碱地资源探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 345-353.
- [2] 李争争,屈忠义,杨威,等. 暗管排水对鄂尔多斯地区重度盐碱地盐分迁移规律的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 122-129.
- [3] 张辉,陈小华,付融冰,等. 脱硫石膏对不同质地滨海盐碱土性质的改良效果[J]. 环境工程学报, 2017, 11(7): 4397-4403.
- [4] 孙慧慧. 盐碱地改良措施对土壤微生物及加工番茄生长特性的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2020.
- [5] Xu W, Zhao J S, Fang W, et al. Change in soil chemical properties and the growth of oil sunflower in saline-alkali soil amelioration with desulfurization gypsum and biogas slurry in Ningxia, China [J]. Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association, 2018, 30(6): 590-600.
- [6] 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.
- [7] Ma C, Cui H L, Ren C G, et al. The seed primer and biofertilizer performances of living *Chlorella pyrenoidosa* on *Chenopodium quinoa* under saline-alkali condition [J]. Journal of Applied Phycology, 2022, 34(3): 1-14.
- [8] 张靖洁. 微藻生物肥改善土壤肥力及根际菌群和提高小油菜产量品质效应的研究[D]. 晋中:山西农业大学, 2020.
- [9] Lee K H, Koh R H, Song H G. Enhancement of growth and yield of tomato by *Rhodospseudomonas* sp. under greenhouse conditions [J]. Journal of Microbiology, 2008, 46(6): 641-646.
- [10] Perera I, Subashchandrabose S R, Venkateswarlu K, et al. Consortia of cyanobacteria/micro-algae and bacteria in desert soils: an underexplored microbiota [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(17): 7351-7363.
- [11] 张慧洁,刘俊琢,吴永红. 藻、菌配合施用对水稻土磷有效性及微生物群落的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(5): 1369-1377.
- [12] Van Den Hende S, Vervaeren H, Desmet S, et al. Bioflocculation of microalgae and bacteria combined with flue gas to improve sewage treatment [J]. New Biotechnology, 2011, 29(1): 23-31.
- [13] 王彬,肖国举,毛桂莲,等. 燃煤烟气脱硫废弃物对盐碱土的改良效应及对向日葵生长的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1227-1235.
- [14] 赵丹丹. 不同浓度菌藻肥对番茄土壤理化性质及生长的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2020.
- [15] 樊杰,陈越,季斌,等. 黑暗条件下不同接种比菌藻共生处理污水性能[J]. 水处理技术, 2020, 46(9): 81-85.



- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 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.
- [18] 张天举, 陈永金, 刘加珍. 基于典范对应分析的滨海湿地土壤季节性盐渍化特征 [J]. 生态学报, 2019, 39 (9): 3322–3332.
- [19] 胡琴, 陈为峰, 宋希亮, 等. 开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 824–833.
- [20] 屈忠义, 胡敏, 王丽萍, 等. 不同改良措施对盐渍化土壤水热碳与葵花产量的影响 [J]. 农业机械学报, 2020, 51 (3): 268–275.
- [21] 刘月, 杨树青, 张万锋, 等. 微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土理化性质和细菌群落的影响 [J]. 环境科学, 2023, 44 (8): 4585–4598.
- [22] 李平, 王兴祥. 模拟酸雨和几种低分子量有机酸淋溶对土壤交换性盐基的影响 [J]. 土壤, 2006, 38 (3): 322–327.
- [23] Zhao Y G, Wang S J, Li Y, et al. Extensive reclamation of saline-sodic soils with flue gas desulfurization gypsum on the Songnen Plain, Northeast China [J]. Geoderma, 2018, 321: 52–60.
- [24] 刘娟, 张凤华, 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.
- [25] 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.
- [26] Sahin U, Eroğlu S, Fikretin S. Microbial application with gypsum increases the saturated hydraulic conductivity of saline-sodic soils [J]. Applied Soil Ecology, 2011, 48 (2): 247–250.
- [27] Cai T, Park Y S, Li Y B. Nutrient recovery from wastewater streams by microalgae: status and prospects [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 19: 360–369.
- [28] Weiss L T, Roth R, Goodson C, et al. Colony organization in the green alga *Botryococcus braunii* (Race B) is specified by a complex extracellular matrix [J]. Eukaryotic Cell, 2012, 11 (12): 1424–1440.
- [29] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 脱硫石膏与有机物料配施对河套灌区土壤改良及向日葵生长的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2020, 39 (8): 85–92.
- [30] 朱芸. 土壤质地和土壤调理剂对滨海盐土土壤肥力和微生物多样性的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- [31] 黄铨程. 复合微生物菌肥对盐碱地燕麦与箭筈豌豆生理特性及土壤速效养分的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [32] 吕轲彦, 陈志君, 李越, 等. 褐煤有机肥与脱硫石膏联合施用对盐碱土改良和向日葵产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2023, 39 (11): 77–86.
- [33] 喻融. 溶藻微生物的分离及溶藻特性的初步研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2006.
- [34] Riffat A, Ahmad S A M. Alleviation of adverse effects of salt stress on growth of maize (*Zea mays* L.) by sulfur supplementation [J]. Pakistan Journal of Botany, 2020, 52 (3): 763–773.

The effect of fungal fertilizer and desulfurization gypsum combined application on the quality of saline-alkali soil and the yield of pacesetter

LIU Xia, ZHANG Huan, HU Yu, WANG Li-ping, QIAO Tian (College of Water Conservation and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia 010018)

Abstract: In order to explore the improvement effect of fungal fertilizer and desulfurization gypsum combined application on saline-alkali soil, field experiments were carried out in the irrigation area on the south bank of the Yellow River in Inner Mongolia. The effects of blank control (CK), 7 : 3 ratio of photosynthetic bacteria and chlorella, 22.5 t/hm² of desulfurization gypsum (FM1), 3 : 7 ratio of photosynthetic bacteria and chlorella, 22.5 t/hm² of desulfurization gypsum (FM2) and desulfurization gypsum 22.5 t/hm² (F) on soil water, salt, fertility and yield of pacesetter during the growth period were investigated. The results showed that, compared with CK, the treatment with amendment significantly reduced the soil salt content and increased the soil organic matter and available nutrients. Compared with CK, FM2 treatment reduced the salt content of 0–40 cm soil by 20.58%. The contents of organic matter, available nitrogen, available phosphorus and available potassium increased by 19.22%, 25.60%, 27.20% and 19.26%, respectively. The yield of pacesetter increased with the increase of the proportion of chlorella in the mixture, and FM2 treatment increased by 21.05% compared with CK treatment. The soil mass index of FM2 treatment had the best improvement effect, indicating that the combined application of photosynthetic bacteria and chlorella microbial fertilizer mixed with desulfurization gypsum in a ratio of 3 : 7 could reduce the saline-alkali barrier, increase soil fertility, and promote plant growth, so as to achieve the purpose of increasing yield.

Key words: chlorella; photosynthetic bacteria; desulfurization gypsum; saline land improvement