

曹巍,高惠嫣,王鑫鑫,等. 不同配施肥措施对滨海盐碱地大豆生长和产量的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(22):53-60.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.22.008

# 不同配施肥措施对滨海盐碱地大豆生长和产量的影响

曹巍<sup>1</sup>,高惠嫣<sup>1</sup>,王鑫鑫<sup>2,3,4</sup>,陈任强<sup>1</sup>,柴春岭<sup>1</sup>,刘震<sup>5</sup>,赵秀梅<sup>6</sup>,刘宏权<sup>1,7</sup>

(1. 河北农业大学城乡建设学院,河北保定 071001; 2. 河北省山区农业技术创新中心,河北保定 071001;  
3. 国家北方山区农业工程技术研究中心,河北保定 071001; 4. 河北农业大学河北省山区研究所,河北保定 071001;  
5. 沧州市农林科学院,河北沧州 061000; 6. 石家庄市鹿泉区源泉灌区服务中心,河北石家庄 050000;  
7. 农业农村部华北节水农业重点实验室,河北保定 071001)

**摘要:**针对滨海盐碱地土地肥力不足和盐碱胁迫的问题,探究不同肥料配施对盐碱地种植大豆群体动态、产量及产量构成要素的影响。2022 年以大豆品种东营 1 为供试材料,分别设置 5 个施肥处理(CK,不施任何肥料;F,仅施加复合肥;FM,复合肥配施有机肥;FB,复合肥配施微生物菌剂;FMB,复合肥配施有机肥和微生物菌剂)。结果表明:(1)FM、FB、FMB 处理均显著提高大豆的株高、茎粗、叶面积指数、干物质量,FM、FMB 处理对大豆群体动态的影响显著高于 F、CK 处理,但 FM、FMB 处理之间无显著差异。与 F 处理相比,FB 处理除了株高,其他群体动态指标无显著差异。(2)所有配施肥料处理中,产量构成因素无显著差异,但 FM、FMB 处理产量达到 2 896.59、3 091.95 kg/hm<sup>2</sup>,与其他处理差异显著。(3)大豆产量构成因素间关联度大小表现为单株荚数>株高>单株粒质量>百粒质量,其中单株荚数、株高是影响大豆产量的关键因素。(4)FM、FB、FMB 处理对大豆产量的贡献分别达 18%、9%、24%,对大豆荚数的贡献率为 13%、6%、15%。(5)利用主成分分析方法探究大豆产量的构成因素,配施微生物菌剂的 FB、FMB 处理聚集性较好,组间相似性较高,CK、F 处理与其他处理间相对分散对立,与其他处理差异明显。本研究结果表明,配施有机肥和微生物菌剂的施肥模式可以为大豆带来高产和稳产,并减少盐碱地分布不均匀带来的危害。

**关键词:**盐碱地;大豆;有机肥;微生物菌剂;产量;群体动态

**中图分类号:**S565.106.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)22-0053-08

土壤盐渍化是制约部分农田生产的关键因素。由于盐分过多,全球 25% 的灌溉土地的作物生产力下降<sup>[1]</sup>。对盐碱地进行整治,使闲置土地用于农业生产是十分必要的。随着土地利用强度的急剧增加,大量的森林、草地、湿地被开垦为耕地,使得原有植被和土壤结构遭到破坏,水土流失、土地荒漠化、盐碱化等问题日益严重<sup>[2]</sup>。我国的盐碱地分布在 23 个省(市、区)的平原、盆地和沿海地区,面积约 3 600 万 hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。土壤盐碱化造成的直接经济损失高达 25 亿元/年,严重影响国家的经济繁荣<sup>[4-5]</sup>。

大豆是我国重要的粮食作物和经济作物,常用来榨取豆油、酿制酱油和提取蛋白质等<sup>[6]</sup>。栽培大豆属于中度耐盐植物,在盐碱地种植大豆需要满足其正常生长所需的营养,当生长土壤中盐含量超过 5 dS/m 时,大豆生长就会受到严重损害<sup>[7]</sup>。施肥会增加土壤的盐分浓度,在制定盐碱农田的施肥率时应考虑这一点。合理施肥以挖掘盐碱地大豆的产量潜力,对于稳定粮食生产至关重要。

盐碱地的盐分可以通过种植耐盐植物的方式吸收。研究表明,将耐盐植物分别种在轻度和重度盐碱地上,1 年后耕层土壤的含盐量下降幅度为 10%~20%<sup>[8]</sup>。大豆耐受高盐碱性土壤、水涝、干旱等逆境,在土地肥力管理、氮素固定、土壤改良方面具有重要作用。在滨海盐碱地高效生态农业的可持续发展中,大豆被认为是一种良好的选择<sup>[9]</sup>。野生大豆不仅能够在盐碱土壤中生长,还能够通过与多种土壤微生物的共生作用来固定大气中的氮<sup>[10-11]</sup>,减少氮肥的投入,从而防止土地进一步盐碱化。随着研究的不断发展,更多的耐盐碱大豆品

收稿日期:2023-04-12

基金项目:河北省重点研发计划(编号:2327001D);国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-08-G-22);河北省节水灌溉装备产业技术研究院基金(编号:SC2018005);河北省省属高等学校基本科研业务费项目(编号:KY2022103)。

作者简介:曹巍(1997—),男,云南曲靖人,硕士研究生,主要从事大田水肥调控方面研究。E-mail:cc18831237761@163.com。

通信作者:刘宏权,教授,硕士生导师,主要从事农业水土资源高效利用、水肥调控方面的教学科研工作。E-mail:lhq@hebua.cn。

种被选育出,大豆产量得以提高<sup>[12]</sup>。

有机肥、微生物菌剂与化肥的平衡施用,可提升盐碱地的地力和作物产量。大量研究表明,施用有机肥料对盐碱土壤的改善效果显著,通过促进形成大粒径土壤团聚体的方式,提高土壤的结构和质量,促进土壤空气流通,降低土壤 pH 值,优化根际微生物群落结构,使盐碱、板结土壤恢复活力,最终提高作物生产力<sup>[13-15]</sup>。微生物菌剂中的有利菌群可缓解盐碱条件对大豆的不利影响,例如蜡状芽孢杆菌可以抑制盐碱地对根瘤菌结瘤的影响<sup>[16]</sup>。内生根真菌能在盐和干旱胁迫下改善不同种类植物的生长,有利于盐碱地大豆的生长和耐盐性;耐盐植物根际促生菌的应用可有效提高植物对盐碱胁迫的耐受性,在提高大豆耐盐碱性和促进碱性土壤作物健康成长方面具有重要作用<sup>[17]</sup>。本试验在河北省滨海区盐碱地设置有机肥、微生物菌剂配施复合肥与习惯施肥、不施肥措施,研究不同施肥处理对耐盐碱大豆生长情况、干物质积累量、土壤含水率动态变化及产量的影响,以期为开发利用滨海盐碱地提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 6—9 月在河北省黄骅市常郭镇李子扎村的滨海盐碱地试验田进行,地理位置为 117°15'E、38°16'N,海拔 7 m。年均风速 4.2 m/s,年均日照时数 2 755 h,年均无霜期 194 d,年均气温 12.1 ℃;年均降水量 627 mm,夏季约占 75%,易出现“春旱夏涝秋吊”的现象。试验土壤的基础性质见表 1。2022 年大豆生育期内的主要气象要素变化见图 1。

表 1 土壤基础性质

土层 (cm)	田间持水率 (%)	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	pH 值	全盐含量 (%)
0~20	12.26	1.49	7.9	0.52
20~40	14.90	1.57	8.1	0.45
40~60	15.52	1.63	8.1	0.38
60~80	16.08	1.48	8.9	0.34
80~100	13.00	1.51	8.4	0.41

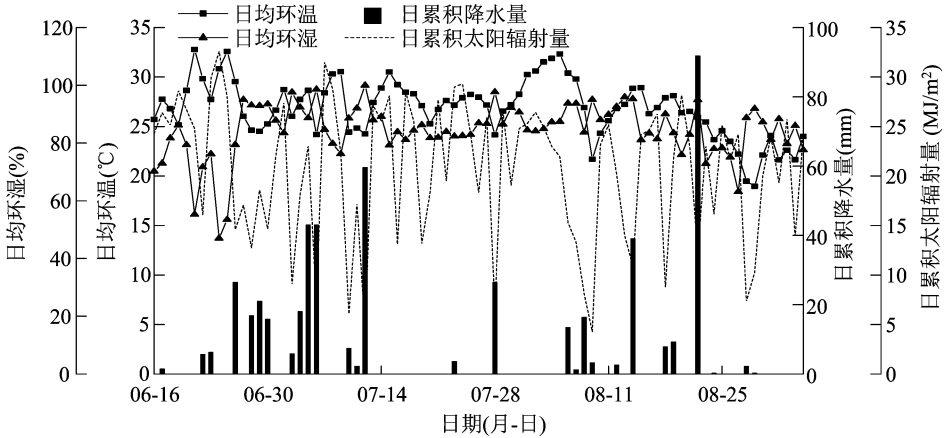


图1 2022 年大豆生育期内主要气象要素变化图

1.2 供试材料

供试大豆品种为东营 1。供试肥料:复合肥(N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别含 15%、30%、8%)、氨基酸型有机肥、复合微生物菌剂。

1.3 试验设计

于 2022 年 6 月 16 日播种,共分为 4 个生育期:盛花期、盛荚期、鼓粒期、成熟期,总生育周期为 112 d。采用随机区组设计,以点播方式进行播种,行距 50 cm,株距 9 cm。播种前,底肥施复合肥 375 kg/hm<sup>2</sup>,旱作雨养,只在过度干旱或者盛荚期进

行适当灌水。

试验设置:对照 CK,不施加任何肥料;F 处理,只施加复合肥,为当地常规施肥;FM 处理,施加氨基酸型有机肥 1 万 kg/hm<sup>2</sup>,和复合肥一起底施;FB 处理,施加微生物有机菌肥 20 kg/hm<sup>2</sup>,兑水喷施于试验地,和复合肥一起作为基肥使用;FMB 处理,将微生物有机菌肥 20 kg/hm<sup>2</sup> 和氨基酸型有机肥 1 万 kg/hm<sup>2</sup> 一起施入试验地,和复合肥一起作为基肥使用。试验共 5 个处理,每个处理重复 3 次,随机布置 15 个试验小区,小区面积为 9 m<sup>2</sup>(3 m×3 m),

小区之间留出 1 m 保护带。

#### 1.4 测定内容及方法

1.4.1 大豆生长指标的测定 (1)株高测定。在大豆生育期间,随机选择 5 株代表性大豆作为测量株高的样本,每株编号,在不同生育期标记株高的变化,用精度为 1 mm 钢卷尺测量大豆从地面至大豆标记生长点的距离。

(2)茎粗测定。在大豆不同生育期选取标记植株主茎,用精度为 0.01 mm 的游标卡尺测量地面以上 2 cm 的主茎直径,每次测量位置固定。

(3)叶面积指数测定。在大豆不同生育期,用叶面积仪(Yaxin-1241)测定叶片面积。叶面积指数(LAI)采用下式计算:

$$LAI = \frac{LA \times NPPA}{PFA}$$

式中: $NPPA$  为单位面积株数,本试验  $NPPA = 13$  株; $PFA$  为单位土地面积,本试验  $PFA = 1 \text{ m}^2$ ;  $LA$  为单株所有绿色叶片累加得到的面积,  $\text{m}^2$ 。

1.4.2 大豆干物质量和产量的测定 (1)干物质量测定。在大豆 4 个生育期采集大豆植株样品,盛荚期植株样品分为叶片、茎、豆荚 3 个部分,鼓粒期和成熟期分为叶片、茎、荚壳、籽粒 4 个部分。将植物样品置于烘箱中,  $105 \text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下杀青 30 min,并在  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下持续烘干直至质量稳定。用精度为 0.01 g 的电子天平称量各部分干物质量。

(2)大豆产量。大豆成熟后每个小区随机选取 2 个面积为  $1 \text{ m}^2$  的样方进行测产,每个处理取平均值后折算成  $1 \text{ hm}^2$  的产量,并选取标记的 5 株样本测定单株荚数、单荚粒质量和百粒质量。

1.4.3 肥料贡献率 CK 没有使用化肥、有机肥和微生物菌剂,其大豆产量主要依赖于土壤自身肥力,因此将 CK 的产量设为固定值。肥料对大豆产量的贡献率为:

$$\text{化肥贡献率} = \frac{Y_1 - Y_0}{Y_1} \times 100\% ;$$

$$\text{有机肥贡献率} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2} \times 100\% ;$$

$$\text{微生物菌剂贡献率} = \frac{Y_3 - Y_1}{Y_3} \times 100\% ;$$

$$\text{有机肥和微生物菌剂贡献率} = \frac{Y_4 - Y_1}{Y_4} \times 100\% .$$

式中; $Y_0$  表示 CK 的大豆产量; $Y_1$  表示 F 处理的大豆产量; $Y_2$  表示 FM 处理的大豆产量; $Y_3$  表示 FB 处

理的大豆产量; $Y_4$  表示 FMB 处理的大豆产量。

#### 1.5 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2022 进行表格数据整理,使用 Origin 2023 进行生理指标柱状图、肥料贡献率图和主效应分析图的绘制,使用 SPSS 27.0 软件进行图表单因素显著性分析和关联度分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同肥料对大豆群体动态的影响

2.1.1 株高 由图 2-a 可知,不同肥料条件下,大豆的株高随着生育进程的推进逐渐增长。在各个生育期内 FMB 处理的株高均最高,其增长率在盛花期至盛荚期可达到 238.3%,且在盛荚期与其他 4 个处理存在明显差异。随后 FMB 处理大豆株高增长速度变缓,在盛荚期至鼓粒期、鼓粒期至成熟期的增长率分别为 18.7%、8.8%,与 FM 处理无显著差异。FB 处理在盛花期对大豆株高起促进作用;在生育后期,FM、FMB 处理对大豆株高影响更加明显,二者之间无显著差异,但与其他处理差异显著。以上结果说明,有机肥和微生物菌剂的施用有效提高了大豆株高。在成熟期,FMB 处理株高最高达 90 cm,同 FM 处理无显著差异。

2.1.2 茎粗 由图 2-b 可知,随着生育进程的推进,不同处理的大豆茎粗增长速度差异明显。在盛花期,FMB 处理茎粗最大,与其余各处理间差异显著。在盛花期至盛荚期,大豆茎粗显著增长,盛荚期大豆的茎粗约为盛花期的 1.56~1.82 倍。随后大豆茎粗长势变缓。在成熟期,FM、FMB 处理之间无显著差别,但与 CK、F 处理差异显著。由此可知,有机肥是提高茎粗的主要因素,微生物菌剂则起到加快茎粗增长的效果。

2.1.3 叶面积指数 由图 2-c 可知,在大豆整个生育期内,叶面积指数呈先增后降的变化趋势,在盛荚期和鼓粒期大豆叶面积指数达到顶峰,为之后豆荚的生长提供了有利条件。增速最快的时期同样发生在盛花期到盛荚期之间,不同处理的叶面积指数增长率可达 160.3%~282.4%;盛荚期 FMB 处理的叶面积指数最大,为 5.20,而 CK 的叶面积指数最小,为 3.18,各处理之间存在显著差异。在鼓粒期,除 FMB 处理的叶面积指数比盛荚期有轻微增长外,其他各处理的叶面积指数均减少,FMB 处理与 FM 处理之间无显著差异,但和其余处理存在显著性差异。成熟期各处理的叶面积指数相较于鼓粒

期均下降,FB、FM、FMB 处理之间差异不显著。各处理在成熟期相较于鼓粒期叶面积指数所呈现的下降幅度为 16.1%、24.8%、22.5%、25.0%、29.2%,

FMB 处理的叶面积指数下降幅度最大。施加有机肥可以有效增加和保持叶面积指数,微生物菌剂在成熟期保持叶面积指数的能力无法体现。

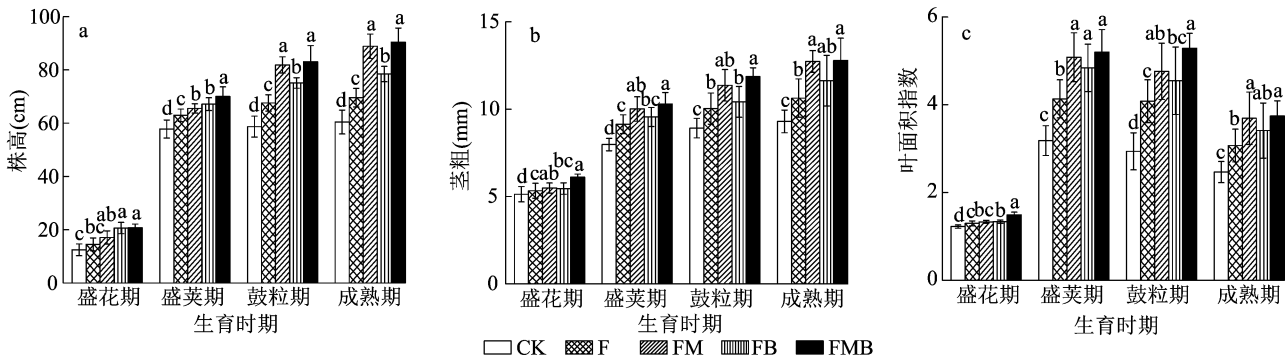


图2 不同施肥处理对大豆生长指标的影响

2.1.4 干物质积累 干物质积累和籽粒中的干物质分配对产量具有显著影响。大豆生育期间,干物质积累量呈先增后减的趋势,在鼓粒期达到峰值,此后,由于叶片黄化、脱落和荚果脱落等因素,干物质积累量逐渐降低,这与前人的研究结果<sup>[18]</sup>相似。由表 2 可知,不同处理对大豆生长各时期干物质积累总量及速度均产生较大影响。在盛花期,FM 处理的干物质积累总量最高水平,CK 的该指标最低,并且二者之间差异显著。在盛荚期,FMB 处理的干物质积累量快速增加。在鼓粒期,所有处理达到干物质积累量的最大值。FM、FMB 处理的干物质积累量均超过了 12 000 kg/hm<sup>2</sup>,FMB 处理较 FB 处理高 21.01%,较 CK、F 处理高 63.75%、33.24%。成熟期,FM 处理的干物质积累量达到最大值,与 FMB 处理之间无显著性差异,但与 CK、F、FB 处理存在显著差异。在盛花期,FM、FB、FMB 处理之间差异并不明显;然而在盛荚期以后,含有有机肥的处理(FM、FMB)具有较高的干物质积累速率,因此干物质总量也相对较大。

表 2 不同处理对大豆干物质积累的影响

处理	干物质积累量 (kg/hm <sup>2</sup> )			
	盛花期	盛荚期	鼓粒期	成熟期
CK	1 415.0c	4 686.7c	7 433.3d	5 188.3c
F	1 515.0bc	4 846.5c	9 135.0c	5 893.3b
FM	1 830.0a	6 267.0a	12 008.3a	7 448.3a
FB	1 780.0ab	5 256.7b	10 058.3b	6 158.3b
FMB	1 580.0abc	6 260.0a	12 171.7a	7 286.7a

注:同列数据后不同小写字母表示在不同处理下差异显著(P<0.05)。表 3 同。

2.2 不同施肥处理对大豆产量及其构成因素的影响和相关性分析

2.2.1 不同施肥处理对大豆产量和产量构成因素的影响 通过对大豆产量及其产量构成因素进行方差分析(表 3)可知,不同处理对大豆产量和产量构成因素的影响不同。单株荚数和单株粒质量在不同处理下显著性表现一致,FM、FB、FMB 处理和 CK 之间差异显著,F 处理与其余处理无显著性差异;FMB 处理的单株荚数、单株粒质量比 CK 增加 36.52%、55.93%。百粒质量受施肥处理的影响明显,各施肥处理的百粒质量均显著高于 CK,FMB 处理的百粒质量显著高于 F 处理,FM、FB 处理与 F、FMB 处理之间差异均不显著。施加有机肥和微生物菌剂可以进一步提高大豆的百粒质量。不同处理之间的产量差异显著,FMB 处理的产量显著高于 CK、F、FB 处理,但与 FM 处理无显著差异。FMB 处理的大豆产量比 CK、F 处理分别增加 56.00%、30.89%,FB 处理的产量比 CK、F 处理分别增加 31.56%、10.38%。有机肥和微生物菌剂对大豆在盐碱地的生长均起到促进作用。

2.2.2 大豆产量与其构成因素的相关性 对原始

表 3 不同处理对大豆产量和产量构成要素的影响

处理	单株荚数 (个)	单株粒质量 (g)	百粒质量 (g)	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
CK	44.50b	15.25b	14.22c	1 981.96d
F	51.25ab	18.17ab	16.07b	2 362.32c
FM	59.00a	22.28a	16.54ab	2 896.59a
FB	54.50a	20.06a	16.19ab	2 607.52b
FMB	60.75a	23.78a	17.13a	3 091.95a

数据进行标准化处理,计算出对应的关联度(表 4),关联度反映不同施肥处理下各产量构成因素对大豆产量的贡献。不同施肥处理下,株高、单株荚数、单株粒质量、百粒质量、产量的关联度分别为 0.850、0.853、0.843、0.842,相互的关联大小表示为单株荚数>株高>单株粒质量>百粒质量,其中单株荚数、株高都是影响大豆产量的关键因素。

表 4 大豆产量与产量构成因素的关联度分析				
处理	株高	单株荚数	单株粒质量	百粒质量
CK	0.995	0.997	0.987	0.987
F	0.899	0.903	0.891	0.891
FM	0.791	0.796	0.784	0.783
FB	0.806	0.811	0.800	0.799
FMB	0.757	0.762	0.751	0.750
关联度	0.850	0.853	0.843	0.842
关联序	2	1	3	4

2.3 不同处理对大豆产量及其构成因素的影响

由图 3 - a 可看出,施用复合肥、复合肥配施有

机肥和微生物菌剂的处理方法对大豆产量的影响存在差异。在 CK 中,大豆产量完全依赖于土壤自身的养分含量。若将 CK 的产量设为基准值,与 CK 相比,F 处理对大豆产量的提高贡献为 20%。FM 处理的大豆产量增加 534.27 kg/hm<sup>2</sup>,对大豆产量的贡献为 18%;FB 处理的大豆产量增加 245.20 kg/hm<sup>2</sup>,对大豆产量的贡献为 9%;FMB 处理增产量为 729.63 kg/hm<sup>2</sup>,对大豆产量的贡献为 24%。整体上,FMB 处理对大豆产量的贡献率占主导地位,比 FM、FB 处理多 6、15 百分点。

由图 3 - b 可看出,F、FM 处理对大豆荚数的贡献为 13%;FB 处理较 FM 处理对大豆荚数的贡献少 7 百分点;FMB 处理对大豆荚数的贡献为 15%。相比于配施有机肥的处理,增施微生物菌剂对大豆单株荚数的贡献增加并不明显。随着同时配施有机肥和微生物菌剂,土壤的贡献率呈逐渐下降的趋势,但对复合肥贡献率的影响不明显。FM、FB、FMB 处理对单株荚数的贡献率分别为 13%、6%、15%。

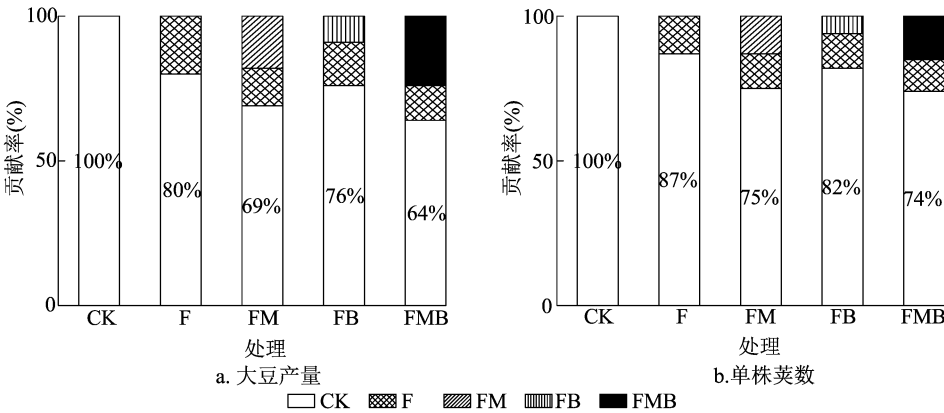


图3 不同处理对大豆产量及单株荚数的影响

2.4 不同处理大豆产量构成因素的主成分分析

大豆产量构成因素 PCA 分析显示,不同处理的产量构成要素呈现各自聚类,样品间距离近代表差异小,距离远代表差异明显(图 4)。CK、F 处理的产量构成要素相对独立且分散,说明与其他处理相比差异较大。FM 处理分布聚集性不高,FB、FMB 处理有较高的聚集性,说明施加微生物菌剂处理的组间相似度较高,产量构成因素较为稳定。不同处理的大豆产量构成要素的区别主要体现在 PC1 上,以上结果能充分反映不同处理大豆产量构成因素的总体特征和组间差异。

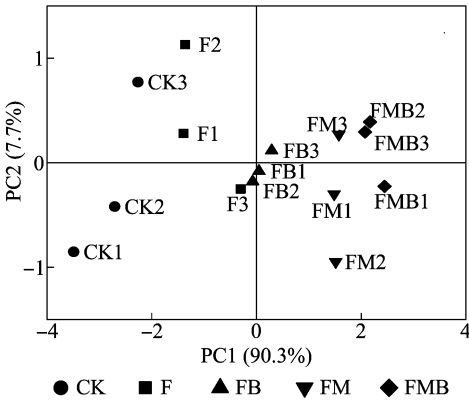


图4 不同处理下产量构成因素的主成分分析

### 3 讨论

#### 3.1 不同肥料施加对大豆株高、茎粗和叶面积指数的影响

有研究表明,配施有机肥和微生物菌剂效果显著,主要体现在大豆植株的性状优化度和促进生长发育方面<sup>[19-21]</sup>。本试验中,FB 处理促大豆生长的效果优于 F 处理,在生育前期有加快大豆生长的作用,但差异不显著;添加有机肥显著影响大豆各个时期的生长状况,更加有利于大豆的生长。FMB 处理和 FM 处理差异并不明显,说明有机肥对大豆生长起主导作用,微生物菌剂随着生育期的推进,对大豆的影响不断减弱。本试验中,株高和茎粗的整体变化趋势基本一致,盛花期至盛荚期增长速度较快,鼓粒期之后基本停止生长(图 2),这与前人的研究<sup>[22]</sup>基本一致;叶面积指数基本都在盛荚期达到顶峰,往后不断减小,这主要是由于盛荚期之后,大豆对叶片的养分供应逐渐停止,致使叶片枯黄脱落。FMB 处理的叶面积指数在鼓粒期有轻微提升,这可能是由于微生物菌剂与有机肥一起施用,增强了大豆的生长活性。有机肥增加土壤肥力、改善土壤结构,并提供大豆所需养分;微生物菌剂降低病害发生和增强大豆的抗逆性,延长生育中期叶片的寿命,这一过程可以扩大功能叶的面积,有利于植株光合产物的形成,实现大豆产量增加<sup>[23]</sup>。

#### 3.2 不同肥料施加对大豆产量和产量构成要素的影响

本研究表明,各施肥处理可有效提高大豆产量,这与以往研究结果<sup>[24-26]</sup>相同。在化肥施用过程中混入有机肥和微生物菌剂,能够促进有机肥中的有机酸更有效地释放,提高微生物数量并加速其代谢活性,提高土壤中丛枝菌根的丰度,通过增强宿主的抗氧化酶活性、水分利用效率、生物量等,增加植物抗逆能力,促进大豆对化肥和水分的吸收和利用,从而充分满足大豆在生长发育各个阶段所需的营养物质,进而有利于大豆产量的提高<sup>[27-29]</sup>。另外,长期施用化肥与有机肥,可以促进土壤团聚体的生成,并提高土壤孔隙度比例,改善耕层土壤结构,增加盐碱地中的有机碳和全氮含量;在大量施用有机肥情况下,这种促进效果更为显著<sup>[30-31]</sup>。此外,大量施用有机肥还间接对大豆生长发育及产量产生积极影响<sup>[32-33]</sup>。Zaid 等的研究表明,与未施肥处理相比,复合肥和有机肥的配施使大豆的生物

量、产量分别提高 128%、73%;根瘤菌的接种对大豆的单株根瘤数、单株荚数、生物量和籽粒产量有显著影响<sup>[34]</sup>。Hati 等的研究表明,连续 3 年施用农家肥和有机肥,与未施肥料的对照相比,大豆产量、水分利用效率分别提高 103%、76%<sup>[25]</sup>。Yuniarti 等的研究表明,在黏性偏盐碱的土壤种植大豆,微生物有机肥对植株高度、根长度、根瘤数量、饱满豆荚数量有更高的生长响应,大豆产量从 1.57 t/hm<sup>2</sup> 提高到 1.81 t/hm<sup>2</sup><sup>[35]</sup>。有机肥、微生物菌的品种和数量以及试验地点的差异,导致不同试验中化肥配施有机肥和微生物菌的效果不同。

化肥配施有机肥和微生物菌剂,同样会影响大豆单株荚数、单荚粒数、单株粒质量等产量构成因素;能够提高大豆的株高、茎粗,并显著促进植株茎、叶、荚的生长,降低空壳率,从而提高大豆的经济效益。本研究中,化肥配施有机肥和微生物菌剂处理下,大豆产量除了与株高无显著相关性外,与单株荚数、单株粒数、单株粒质量、百粒质量呈显著的正相关关系。这与前人的研究结果相似。Mandal 等的研究发现,大豆产量与株荚数( $r=0.98$ )和株粒质量( $r=0.86$ )显著相关<sup>[36]</sup>。Egli 等的研究也表明,单株荚数是决定大豆产量的关键<sup>[37]</sup>。此外,本研究使用灰色关联度分析发现,化肥和化肥配施有机肥和微生物菌剂对大豆产量构成因素具有影响,对产量的贡献程度也存在差异。复合肥配施有机肥和微生物菌剂条件下,单株荚数对大豆产量的影响最大,其次是株高、单株粒质量。王囡囡等通过灰色关联分析对大豆进行不同施肥处理的研究,指出单株荚数对产量的影响最为显著,其次是单株粒质量和单株粒数<sup>[38]</sup>,这个结论与本研究的发现一致。虽然不同的产量构成因素对大豆产量的贡献率不一样,但这些因素彼此之间存在相互关系。

本研究中,依靠土壤基础地力,大豆产量能达到 1 981.96 kg/hm<sup>2</sup>(表 3)。施用复合肥后,大豆产量达到 2 362.32 kg/hm<sup>2</sup>,化肥对大豆产量的贡献为 380.36 kg/hm<sup>2</sup>,占大豆产量的 20%。复合肥配施有机肥和微生物菌剂均有效增加对大豆产量的贡献率,分别为 18%、9%、24%,有机肥对大豆产量的贡献较为明显。但有研究表明,施用有机肥的量越少,复合肥料对大豆产量的贡献作用越为突出<sup>[39]</sup>。而当增加有机肥的施用量时,复合肥对产量的作用逐渐减小,直至达到一定阈值时,有机肥可能会取代化肥在增加大豆产量方面的作用。有机肥含有

丰富的氮、磷、钾和有机碳等养分,还能提供相当数量的中量元素、微量元素以及氨基酸、核酸和微生物营养成分。有机肥不仅可以为植物提供直接的养分,还能够激活土壤中的潜在养分并促进生物学活性,从而提高作物的生物量并增强土地生产力<sup>[40]</sup>。然而,高量有机肥可能会对大豆的生长和产量带来不利影响,因为土壤分解大量有机肥的能力是有限的。Xin 等研究发现,有机肥并不能完全取代化肥,但用有机肥替代不到一半的化肥可能是一种具有前途的施肥方案<sup>[41]</sup>。本研究结果表明,无论是配施有机肥还是微生物菌剂,都有助于提高大豆产量。然而当有机肥的施用量超过 15 t/hm<sup>2</sup> 时,其作用开始下降,此时进一步增加有机肥的投入反而会产生浪费<sup>[42]</sup>。

相关性分析是一种用于研究 2 个或更多连续型变量之间关系的统计方法,为了进一步从不同处理的大豆产量构成因素中挖掘重要信息,进行了主成分分析<sup>[43]</sup>。图 4 表明,配施有机肥和微生物菌剂对大豆产量构成因素有显著的促进作用。无论是有机肥还是微生物菌剂均能有效提升盐碱土地肥力,得到更高的作物产量。

## 4 结论

滨海盐碱地肥力较低,该地区要获得大豆高产,仍然需要施用化肥和其他肥料,补充土地肥力和改良土壤品质。本研究中,化肥配施有机肥和微生物菌剂能有效提升大豆生长情况和产量,促进干物质合理分布。配施有机肥和微生物菌剂处理,能够显著提高大豆株高、茎粗、叶面积指数,进而有效促进大豆的干物质积累,并在生育后期促进干物质向籽粒转移和分配,显著提高大豆产量。大豆产量构成因素间关联度大小表现为单株荚数 > 株高 > 单株粒质量 > 百粒质量,其中单株荚数和株高是影响大豆产量的关键因素。此外通过计算明确了与常规肥料配施情况下,FM、FB、FMB 处理对大豆产量的贡献率分别达 18%、9%、24%,对大豆荚数的贡献率为 13%、6%、15%。对大豆的产量构成因素进行主成分分析,配施微生物菌剂的 FB、FMB 处理聚集性较好,组间相似性较高,CK、F 处理与其他处理间相对分散对立,与其他处理差异明显。FM、FMB 处理之间产量差异并不明显,综合考虑微生物菌剂的价格,可采取配施有机肥的措施以实现盐碱地大豆高产的目标。

## 参考文献:

- [1] Amundson R, Berhe A, Hopmans J, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. Science, 2015, 348(6235): 1261071.
- [2] Yang Y, Zhou B B, Feng L. Effects of different soil modifiers on salt improvement and distribution, crop growth of the gully land consolidation on loess plateau[J]. Journal of Sensors, 2022, 1 - 17.
- [3] 赵英, 王丽, 赵惠丽, 等. 滨海盐碱地改良研究现状及展望[J]. 中国农学通报, 2022, 38(3): 67 - 74.
- [4] Bao S C, Wang Q, Bao X H, et al. Biological treatment of saline - alkali soil by sulfur - oxidizing bacteria[J]. Bioengineered, 2016, 7(5): 372 - 375.
- [5] Pearson - Stuttard J, Kypridemos C, Collins B, et al. Estimating the health and economic effects of the proposed US Food and Drug Administration voluntary sodium reformulation: microsimulation cost - effectiveness analysis[J]. PLoS Medicine, 2018, 15(4): 1002551.
- [6] Chen W, Marchant M, Muhammad A. China's soybean product imports: an analysis of price effects using a production system approach[J]. China Agricultural Economic Review, 2012, 4: 499 - 513.
- [7] Ashraf M. Breeding for salinity tolerance in plants[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1994, 13(1): 17 - 42.
- [8] 唐让云, 曹靖, 董放, 等. 淋洗与植物作用耦合对盐渍化土壤的改良效应[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5686 - 5694.
- [9] 张彦威, 刘国峰, 李伟, 等. 黄淮海地区大豆种质资源耐盐性鉴定[J]. 山东农业科学, 2018, 50(11): 33 - 36.
- [10] Mnasri B, Saïdi S, Chihaoui S A, et al. *Sinorhizobium americanum* symbiovar mediterraneense is a predominant symbiont that nodulates and fixes nitrogen with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in a Northern Tunisian field[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2012, 35(4): 263 - 269.
- [11] Yang Y, Liu L, Singh R P, et al. Nodule and root zone microbiota of salt - tolerant wild soybean in coastal sand and saline - alkali soil[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 2178.
- [12] Xie W J, Wu L F, Zhang Y P, et al. Effects of straw application on coastal saline topsoil salinity and wheat yield trend[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 169: 1 - 6.
- [13] Wang S B, Gao P L, Zhang Q W, et al. Biochar improves soil quality and wheat yield in saline - alkali soils beyond organic fertilizer in a 3 - year field trial[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(7): 19097 - 19110.
- [14] Chen M M, Zhang S R, Liu L, et al. Organic fertilization increased soil organic carbon stability and sequestration by improving aggregate stability and iron oxide transformation in saline - alkaline soil[J]. Plant and Soil, 2022, 474(1): 233 - 249.
- [15] Li H Y, Luo N Y, Ji C L, et al. Liquid organic fertilizer amendment alters rhizosphere microbial community structure and co - occurrence patterns and improves sunflower yield under salinity - alkalinity stress[J]. Microbial Ecology, 2022, 84(2): 423 - 438.

- [16] Han Q, Ma Q, Chen Y, et al. Variation in rhizosphere microbial communities and its association with the symbiotic efficiency of rhizobia in soybean[J]. The ISME Journal, 2020, 14(8): 1915 – 1928.
- [17] Gao Y M, Han Y Q, Li X, et al. A salt – tolerant *Streptomyces paradoxus* D2 – 8 from rhizosphere soil of *Phragmites communis* augments soybean tolerance to soda saline – alkali stress[J]. Polish Journal of Microbiology, 2022, 71(1): 43 – 53.
- [18] 齐思远, 王福林, 兰佳伟. 宽窄行种植模式对大豆生长发育和产量的影响[J]. 大豆科学, 2022, 41(5): 557 – 563.
- [19] Liu M, Linna C, Ma S M, et al. Effects of biochar with inorganic and organic fertilizers on agronomic traits and nutrient absorption of soybean and fertility and microbes in purple soil[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 871021.
- [20] 鹿 鑫, 赵敦厚, 关法春, 等. 复合菌剂添加对盐碱地大豆生长发育及产量的影响[J]. 大豆科学, 2022, 41(5): 588 – 593.
- [21] Herawati N, Hidayah B N, Ghulamhamdi M. Influence of phosphorus and organic fertilizers on the growth and yield of Indonesian new superior variety of soybean in dry climate rice fields [J]. IOP Conference Series ( Earth and Environmental Science ), 2020, 457(1): 012053.
- [22] Liu X B, Li Y S, Han B J, et al. Yield response of continuous soybean to one – season crop disturbance in a previous continuous soybean field in Northeast China[J]. Field Crops Research, 2012, 138: 52 – 56.
- [23] Jo S G, Kang Y I, Om K S, et al. Growth, photosynthesis and yield of soybean in ridge – furrow intercropping system of soybean and flax [J]. Field Crops Research, 2022, 275: 108329.
- [24] Bandyopadhyay K K, Misra A K, Ghosh P K, et al. Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 110(1): 115 – 125.
- [25] Hati K M, Mandal K G, Misra A K, et al. Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, and water – use efficiency of soybean in vertisols of central India[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(16): 2182 – 2188.
- [26] Marra R, Lombardi N, D'Errico G, et al. Application of *Trichoderma* strains and metabolites enhances soybean productivity and nutrient content[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(7): 1814 – 1822.
- [27] Maheshbabu H M, Hunje R, Patil N, et al. Effect of organic manures on plant growth, seed yield and quality of soybean[J]. Karnataka Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(2): 219 – 221.
- [28] Thirkell T J, Charters M D, Elliott A J, et al. Are mycorrhizal fungi our sustainable saviours? Considerations for achieving food security [J]. Journal of Ecology, 2017, 105(4): 921 – 929.
- [29] 朱海荣. 减氮条件下增施根瘤菌肥和叶面液肥对大豆生长发育和产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(1): 60 – 65.
- [30] Xiao Y, Zhou M, Li Y S, et al. Crop residue return rather than organic manure increases soil aggregate stability under corn – soybean rotation in surface mollisols[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 265.
- [31] Fontana M B, Novelli L E, Sterren M A, et al. Long – term fertilizer application and cover crops improve soil quality and soybean yield in the northeastern Pampas region of Argentina[J]. Geoderma, 2021, 385: 114902.
- [32] Ding X L, Han X Z, Liang Y, et al. Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a Mollisol in China [J]. Soil and Tillage Research, 2012, 122: 36 – 41.
- [33] Jiang H, Han X Z, Zou W X, et al. Seasonal and long – term changes in soil physical properties and organic carbon fractions as affected by manure application rates in the Mollisol region of Northeast China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 268: 133 – 143.
- [34] Zaid K, Bashir A, Mohammad N K, et al. Stand establishment, growth, and yield enhancement response of soybean to inoculation and NPK compound and organic fertilizers[J]. Gesunde Pflanzen, 2022, 74(4): 1123 – 1135.
- [35] Yuniarti S, Mulyaqin T, Hadiatry M C, et al. Improvement of soybean yields using organic fertilizer enriched with microbes under dry land condition of Banten Province[J]. IOP Conference Series ( Earth and Environmental Science ), 2021, 782(3): 032013.
- [36] Mandal K G, Hati K M, Misra A K. Biomass yield and energy analysis of soybean production in relation to fertilizer – NPK and organic manure[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(12): 1670 – 1679.
- [37] Egli D B. Cultivar maturity and potential yield of soybean[J]. Field Crops Research, 1993, 32(1/2): 147 – 158.
- [38] 王囡囡, 韩旭东, 张春峰, 等. 三江平原测土配方 TRPF 系统在大豆优化施肥中的应用[J]. 中国农学通报, 2017, 33(1): 24 – 28.
- [39] Kumari G, Thakur S K, Kumar V, et al. Long term effect of fertilizer, farm – yard manure and lime on yield sustainability and soil organic carbon pools under soybean (*Glycine max*) – wheat (*Triticum aestivum*) cropping system in Alfisol[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 18(2): 196.
- [40] 葛家麒, 侯中田, 徐中儒. 黑龙江省大豆区域性农业生产数学模型的建立及应用[J]. 东北农学院学报, 1990, 21(4): 380 – 385.
- [41] Xin X L, Qin S W, Zhang J B, et al. Yield, phosphorus use efficiency and balance response to substituting long – term chemical fertilizer use with organic manure in a wheat – maize system[J]. Field Crops Research, 2017, 208: 27 – 33.
- [42] Li S X, Wang Z H, Hu T T, et al. Chapter 3 nitrogen in dryland soils of China and its management[M]//Advances in agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2009: 123 – 181.
- [43] 李 炜, 毕影东, 刘建新, 等. 寒地野生大豆资源农艺性状的关联性和主成分分析[J]. 土壤与作物, 2022, 11(1): 10 – 17.